DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/15

Análise de mecanismos de ruptura em taludes rochosos por meio de regressão linear múltipla: aplicação em taludes da BR-470 (RS)

Amanda Fetzer Visintin
Mestre em Engenharia Civil, Solution IPD, Curitiba, Brasil, amanda.visintin@solution-ipd.com

Diogo Larocca Cestari
Engenheiro Civil, Solution-IPD, Curitiba, Brasil, diogocestari@solution-ipd.com

Jacqueline Cristina Patzsch
Mestre em Engenharia Civil, Solution-IPD, Curitiba, Brasil, jacpatzsch@solution-ipd.com

Victor Tozato Cunha
Geólogo, Solution-IPD, Curitiba, Brasil

Vítor Pereira Faro
Doutor em Engenharia Civil, Solution-IPD, Curitiba, Brasil, vpfaro@ufpr.br

RESUMO: A estabilidade de taludes rochosos representa um importante desafio na engenharia geotécnica, especialmente em rodovias implantadas em maciços rochosos fraturados, onde a presença de descontinuidades estruturais pode favorecer diferentes mecanismos de ruptura. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência de parâmetros geomecânicos na ocorrência de mecanismos de instabilidade em taludes rochosos por meio da aplicação de modelos de regressão linear múltipla. Os dados utilizados foram obtidos a partir de levantamentos estruturais realizados em taludes localizados ao longo da rodovia BR-470, no estado do Rio Grande do Sul, região que apresentou diversos processos de instabilidade associados aos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2024. A caracterização estrutural foi realizada em quatro taludes rochosos, subdivididos em setores de análise, resultando na construção de um banco de dados contendo parâmetros como RQD (Rock Quality Designation), GSI (Geological Strength Index), ângulo de atrito das descontinuidades e mergulho da face do talude. A partir desses dados, foram ajustados modelos de regressão para estimar a possibilidade de ocorrência de ruptura planar, ruptura em cunha e tombamento flexural. Os resultados indicaram melhor desempenho dos modelos associados à ruptura em cunha (R^2 = 0,86) e ao tombamento flexural (R^2 = 0,88), enquanto o modelo de ruptura planar apresentou menor capacidade explicativa (R^2 = 0,57). Os resultados evidenciam o potencial da aplicação de técnicas estatísticas multivariadas como ferramenta complementar na avaliação da estabilidade de taludes rochosos.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de taludes; maciço rochoso; regressão múltipla; descontinuidades; geotecnia.

ABSTRACT: Rock slope stability represents an important challenge in geotechnical engineering, particularly along highways excavated in fractured rock masses where structural discontinuities may favor the development of different failure mechanisms. In this context, the present study aims to evaluate the influence of geomechanical parameters on the occurrence of instability mechanisms in rock slopes through the application of multiple linear regression models. The data used in this study were obtained from structural surveys carried out on rock slopes located along the BR-470 highway, in the state of Rio Grande do Sul, southern Brazil, a region that experienced several slope instability processes associated with extreme rainfall events in 2024. Structural characterization was performed in four rock slopes, subdivided into analysis sectors, resulting in the construction of a database containing parameters such as Rock Quality Designation (RQD), Geological Strength Index (GSI), discontinuity friction angle, and slope face dip. Based on these data, regression models were adjusted to estimate the probability of occurrence of planar failure, wedge failure, and flexural toppling. The results indicated better performance for the models associated with wedge failure (R^2 = 0.86) and flexural toppling (R^2 = 0.88), while the planar failure model showed lower explanatory capacity (R^2 = 0.57). The results

highlight the potential application of multivariate statistical techniques as a complementary tool for the evaluation of rock slope stability.

KEYWORDS: Rock slope stability; rock mass; multiple regression; discontinuities; geotechnical engineering.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes rochosos constitui um dos principais desafios da engenharia geotécnica aplicada a obras lineares, especialmente em rodovias implantadas em regiões montanhosas ou com maciços rochosos intensamente fraturados. Nesses contextos, a presença de descontinuidades estruturais, associada às características geomecânicas do maciço e à geometria dos taludes escavados, exerce papel fundamental no controle dos diferentes mecanismos de ruptura que podem se desenvolver.

Entre os principais mecanismos de instabilidade em taludes rochosos destacam-se a ruptura planar, a ruptura em cunha e o tombamento. Esses processos estão diretamente relacionados à orientação das descontinuidades, à resistência ao cisalhamento ao longo dessas superfícies e às condições geométricas entre os planos estruturais e a face do talude. De acordo com Hoek e Bray (1981) e Wyllie e Mah (2004), a análise desses mecanismos requer a integração entre caracterização estrutural do maciço, avaliação de parâmetros geomecânicos e análise da geometria do talude.

Em rodovias implantadas em maciços rochosos vulcânicos, como aqueles associados à Formação Serra Geral, a estabilidade dos taludes pode ser particularmente influenciada pela presença de sistemas de fraturas originados durante o resfriamento dos derrames basálticos. Essas estruturas frequentemente resultam em maciços com blocos prismáticos delimitados por juntas subverticais e sub-horizontais, que podem favorecer mecanismos de instabilidade como ruptura em cunha e tombamento (Priest, 1993).

Além das características geológicas e estruturais do maciço, fatores ambientais também podem desempenhar papel importante na evolução de processos de instabilidade. Eventos pluviométricos extremos, por exemplo, podem provocar alterações nas condições de tensões e nas propriedades mecânicas ao longo das descontinuidades, contribuindo para a redução da resistência ao cisalhamento e aumentando a suscetibilidade à ocorrência de rupturas em taludes rodoviários.

Nesse contexto, métodos quantitativos têm sido cada vez mais utilizados como ferramentas complementares às análises cinemáticas tradicionais. Técnicas estatísticas multivariadas, como a regressão linear múltipla, permitem investigar a relação entre diferentes parâmetros geomecânicos e a ocorrência de mecanismos de ruptura, possibilitando identificar quais variáveis exercem maior influência na estabilidade dos taludes (Priest, 1993; Bieniawski, 1989).

Nos últimos anos, a ocorrência de eventos climáticos extremos no sul do Brasil tem evidenciado a importância de estudos voltados à avaliação da estabilidade de taludes rodoviários. Em 2024, intensas precipitações registradas no estado do Rio Grande do Sul provocaram diversos processos de instabilidade em encostas naturais e taludes escavados ao longo de rodovias, resultando em interrupções de tráfego e danos à infraestrutura.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência de parâmetros geomecânicos na ocorrência de diferentes mecanismos de instabilidade em taludes rochosos por meio da aplicação de modelos de regressão linear múltipla. Para isso, foram utilizados dados obtidos a partir de levantamentos estruturais realizados em taludes localizados ao longo da rodovia BR-470, no estado do Rio Grande do Sul.

A partir da construção de um banco de dados contendo parâmetros como RQD, GSI, ângulo de atrito das descontinuidades e mergulho da face do talude, foram desenvolvidos modelos estatísticos voltados à estimativa da possibilidade de ocorrência de ruptura planar, ruptura em cunha e tombamento flexural. Os resultados obtidos permitem discutir a influência relativa desses parâmetros na estabilidade dos taludes e contribuir para o entendimento dos mecanismos de instabilidade associados a maciços rochosos basálticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A caracterização de maciços rochosos converte observações geológicas e estruturais em parâmetros de engenharia que orientam o dimensionamento, a seleção de suportes e a modelagem numérica. Sistemas de classificação condensam dados de campo e de laboratório em índices compactos, cada um enfatizando aspectos distintos do comportamento rochoso: alguns privilegiam resistência da rocha intacta e medidas discretas,

outros descrevem a estrutura geológica ou a mecânica das descontinuidades. Esses índices são valiosos por sintetizarem décadas de experiência de campo em regras reprodutíveis que agilizam o projeto preliminar; contudo, também introduzem juízo técnico e incertezas amostrais que devem ser reconhecidas quando as classificações são usadas de forma quantitativa (BIENIAWSKI, 1973; BIENIAWSKI, 1989).

O desenvolvimento histórico dos esquemas de classificação surgiu da necessidade prática de relacionar propriedades observáveis do maciço com o comportamento de engenharia em túneis, taludes, fundações e reservatórios. Sistemas iniciais foram derivados de histórias de caso e correlações de campo e desde então foram adaptados para uma ampla gama de problemas de engenharia. Como cada sistema codifica ênfases distintas, por exemplo, ensaios mecânicos versus mapeamento descritivo ou mecânica de descontinuidades, o praticante deve escolher o esquema (ou a combinação de esquemas) que melhor se ajusta ao modo de ruptura dominante, aos dados disponíveis e ao tipo de entrada de projeto requerida (BIENIAWSKI, 1973; BIENIAWSKI, 1989).

Um índice empírico amplamente utilizado atribui pontuações a parâmetros chave como resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, Rock Quality Designation (RQD), espaçamento de juntas, condição das descontinuidades (rugosidade, preenchimento, intemperismo), estado de água subterrânea e um ajuste por orientação desfavorável das juntas. As pontuações numéricas desses parâmetros são somadas para produzir um índice que classifica o maciço, com interpretações empíricas para seleção de suportes e estimativas de módulo. As forças desse método são a transparência e o extenso histórico de calibração; suas limitações residem na discretização, na subjetividade do observador (especialmente na medição do RQD e na avaliação da condição das juntas) e na sensibilidade à escala de amostragem, razão pela qual protocolos padronizados de mapeamento e análises de sensibilidade são recomendados quando esse índice alimenta modelos de projeto (BIENIAWSKI, 1973; BIENIAWSKI, 1989).

Outra classificação influente foi formulada especificamente para projeto de suporte em obras subterrâneas e destaca a geometria das descontinuidades associada a efeitos hidro-mecânicos. Seu índice escalar é calculado pela combinação de termos que representam RQD, número de conjuntos de juntas (Jn), rugosidade das juntas (Jr), alteração/preenchimento (Ja), fator redutor pelo efeito da água (Jw) e fator de redução por tensões (SRF). Essa forma modular torna explícito o papel mecânico da geometria das descontinuidades, do preenchimento e da água e mapeia empiricamente para classes de suporte recomendadas; entretanto, permanece sensível a vieses de amostragem e a avaliações subjetivas de rugosidade e alteração, e o termo SRF pode ser difícil de estimar em contextos tectônicos complexos (BARTON; LIEN; LUNDE, 1974).

Uma terceira abordagem amplamente aplicada fornece uma estimativa descritiva, centrada na geologia, da qualidade do maciço que se liga diretamente a um critério empírico de ruptura em contínuo. Esse método atribui um índice geológico de resistência (GSI) a partir da avaliação visual da estrutura do maciço (por exemplo, blocado versus intensamente cisalhado) e das condições das superfícies de descontinuidade (de muito bom a muito pobre). O GSI é então usado em relações empíricas para derivar parâmetros de contínuo reduções da resistência e do módulo da rocha intacta e os parâmetros necessários para o critério de ruptura adotado o que o torna atraente quando modelos numéricos de contínuo são a ferramenta de projeto. Orientações práticas e advertências quanto à aplicação dessas relações, especialmente para maciços muito fracos ou fortemente fraturados, estão documentadas em notas técnicas e artigos de relação de parâmetros (HOEK, 2005; HOEK; CARRANZA-TORRES; CORKUM, 2002).

Apesar de as três famílias de classificação se sobreporem conceitualmente, elas desempenham papéis complementares na prática. O primeiro provê um escore compacto útil para correlações empíricas de suporte e rigidez; o segundo é calibrado para rupturas controladas por descontinuidades e instabilidades em blocos, em especial em tunelamento; o terceiro é concebido para fornecer parâmetros de resistência e deformação de contínuo para análise numérica. A escolha entre eles deve ser guiada pelo modo de ruptura predominante, pelo tipo de dados disponíveis e pela necessidade de representar explicitamente a mecânica das descontinuidades ou de obter entradas efetivas de contínuo. Verificações cruzadas entre sistemas e a adoção de intervalos de valores em vez de escore único reduzem o risco de excesso de confiança em um único resultado classificação (BIENIAWSKI, 1973; BARTON; LIEN; LUNDE, 1974; HOEK; CARRANZA-TORRES; CORKUM, 2002).

A análise probabilística de fraturas amplia essas abordagens determinísticas ao tratar atributos de descontinuidades como variáveis estatísticas: orientação, espaçamento, comprimento/persistência, abertura e preenchimento passam a ser descritos por distribuições de probabilidade em vez de valores pontuais. Modelos de Rede Discreta de Fraturas (DFN — Discrete Fracture Network) são veículos comuns para gerar ensembles

estocásticos de geometrias de fratura consistentes com as distribuições ajustadas; esses ensembles servem para propagar a incerteza em predições de escoamento, transporte e comportamento mecânico. Revisões sobre meios fraturados enfatizam que as caudas das distribuições de comprimento e espaçamento e a conectividade da rede frequentemente dominam o comportamento do sistema, de modo que a caracterização estatística realista e a atenção à conectividade são essenciais para estimativas probabilísticas confiáveis (BERKOWITZ, 2002; BONNET et al., 2001).

As boas práticas em modelagem probabilística de fraturas começam com a aquisição cuidadosa e o pré-processamento dos dados estruturais (por exemplo, scanlines, registros televiewer de sondagem e mapeamento em afloramento), seguidos pelo ajuste estatístico apropriado: modelos de dispersão angular (ex.: Fisher) para orientação, modelos exponenciais ou de lei de potência para comprimento, e modelos log-normal ou gama para espaçamento, sempre com correções explícitas para vieses de amostragem como truncamento por comprimento de traço. Simulação de Monte Carlo, atualização bayesiana e análises de sensibilidade são ferramentas usuais para quantificar incertezas e atualizar priors à medida que dados adicionais se tornam disponíveis. As realizações produzidas por geradores de DFN podem ser acopladas diretamente a simuladores hidro-mecânicos ou upscaladas para derivar propriedades equivalentes de contínuo para modelos em grande escala (BAECHER, 1983; SKB, 2022; LEI; LATHAM; TSANG, 2017).

Integrar classificações empíricas com análise probabilística de fraturas constitui um fluxo de trabalho pragmático que explora as forças de ambas as abordagens. Sistemas de classificação fornecem estimativas iniciais e priors de engenharia eficientes (por exemplo, faixas plausíveis para rigidez, resistência ou parâmetros de descontinuidades), enquanto métodos probabilísticos DFN substituem entradas determinísticas por distribuições informadas pela variabilidade mapeada e pela incerteza das classificações. Para projetos sensíveis ao risco, essa estratégia em camadas preserva o julgamento rápido do engenheiro nas etapas iniciais e quantifica a incerteza por meio de realizações estocásticas e análises de confiabilidade conforme o projeto evolui (BIENIAWSKI, 1989; BARTON; LIEN; LUNDE, 1974; HOEK, 2005).

Quando classificações são usadas como entradas de modelos, recomenda-se que os praticantes documentem explicitamente escolhas subjetivas e protocolos de mapeamento, apliquem correções estatísticas para vieses conhecidos antes de ajustar distribuições e propaguem a incerteza resultante por workflows de Monte Carlo ou bayesianos até as métricas finais de estabilidade ou desempenho. Esses passos aumentam a transparência e fornecem uma base defensável para decisões em que segurança, economia ou conformidade regulatória dependem de níveis quantificados de confiança. A combinação de classificações empíricas bem consolidadas com modelagem probabilística rigorosa de fraturas gera resultados de engenharia ancorados na experiência prática e explícitos quanto à sua incerteza, possibilitando escolhas de projeto mais informadas e resilientes (BERKOWITZ, 2002; SKB, 2022).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido a partir de levantamentos realizados em taludes rochosos localizados ao longo da rodovia BR-470, no estado do Rio Grande do Sul. Essa região foi severamente afetada por eventos extremos associados às enchentes ocorridas em 2024, que provocaram diversos processos de instabilidade em encostas naturais e taludes rodoviários.

A área de estudo está inserida em um domínio geológico caracterizado pela presença de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, pertencentes à Província Magmática do Paraná. Essas rochas são constituídas predominantemente por derrames de basalto, que apresentam estruturas internas associadas aos processos de resfriamento magmático, resultando em sistemas de fraturamento bem desenvolvidos.

Os maciços rochosos apresentam diferentes famílias de descontinuidades estruturais, formadas tanto por processos de contração térmica quanto por eventos tectônicos posteriores. A presença dessas descontinuidades, associada à elevada inclinação dos taludes rodoviários, favorece o desenvolvimento de diferentes mecanismos de ruptura.

Além disso, eventos pluviométricos extremos podem intensificar os processos de instabilidade ao promover alterações no estado de tensões do maciço e redução da resistência ao cisalhamento ao longo das descontinuidades, aumentando a suscetibilidade à ocorrência de rupturas.

3.2 Construção do banco de dados

A construção do banco de dados foi realizada a partir da caracterização estrutural de quatro taludes rochosos localizados ao longo do trecho estudado da rodovia. Para permitir uma análise mais detalhada das condições geomecânicas, cada talude foi subdividido em setores, totalizando doze setores de análise.

Em cada setor foram realizados levantamentos estruturais das descontinuidades, incluindo a determinação da orientação das fraturas, avaliação das características geomecânicas do maciço e identificação dos possíveis mecanismos de ruptura associados.

A partir dos levantamentos de campo, foi elaborado um banco de dados contendo os principais parâmetros geomecânicos utilizados nas análises estatísticas. Entre as variáveis consideradas destacam-se:

- RQD (Rock Quality Designation), utilizado como indicador da qualidade do maciço rochoso;
- GSI (Geological Strength Index), que representa a resistência geológica do maciço;
- Ângulo de atrito das descontinuidades (ϕ);
- Mergulho da face do talude (DIP).

Após a organização dos dados, foi realizada a padronização dos parâmetros, visando garantir consistência na análise estatística e permitir a comparação entre os diferentes setores analisados.

3.3 Análise estatística

Para investigar a relação entre os parâmetros geomecânicos e os mecanismos de instabilidade, foi inicialmente realizada uma matriz de correlação, com o objetivo de identificar possíveis relações entre as variáveis do banco de dados.

Posteriormente, foram ajustados modelos de regressão linear múltipla com o objetivo de estimar a possibilidade de ocorrência dos diferentes mecanismos de ruptura em função dos parâmetros geomecânicos do maciço rochoso.

Foram considerados três modelos independentes, correspondentes aos principais mecanismos de ruptura observados em taludes rochosos:

$$P_{planar} = f(RQD, GSI, \phi, mergulho) \quad (1)$$

$$P_{cunha} = f(RQD, GSI, \phi, mergulho) \quad (2)$$

$$P_{tombamento} = f(RQD, GSI, \phi, mergulho) \quad (3)$$

onde:

- RQD representa o índice de qualidade do maciço rochoso;
- GSI corresponde ao índice de resistência geológica;
- ϕ representa o ângulo de atrito das descontinuidades;
- o mergulho corresponde à inclinação da face do talude.

As análises estatísticas foram realizadas no software R, utilizando modelos de regressão linear múltipla para avaliar a influência conjunta das variáveis independentes na possibilidade de ocorrência de cada mecanismo de ruptura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os modelos obtidos para cada tipo de instabilidade foram expressos pelas seguintes equações:

Tabela 1. Estrutura do modelo

Tipo de Ruptura	Equação
Planar	$P = 26{,}33 - 0{,}21(RQD) + 0{,}37\ (GSI) - 0{,}74\ (\phi) - 0{,}07(DIP)$
Cunha	$P = \ 37{,}95 - 0{,}54(RQD) - 0{,}25(GSI) - 0{,}31(\phi) + 0{,}37(DIP)$
Tombamento	$P = \ -54{,}31 - 1{,}36(RQD) - 0{,}001(GSI) - 0{,}30(\phi) + 0{,}007(DIP)$

A qualidade dos modelos foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), da análise de significância estatística dos coeficientes e do teste F global, permitindo verificar a capacidade explicativa das variáveis geomecânicas na previsão dos diferentes mecanismos de ruptura.

A aplicação de modelos estatísticos para análise de instabilidade em taludes rochosos tem sido amplamente utilizada na literatura como ferramenta complementar às análises cinemáticas tradicionais, permitindo avaliar a influência relativa de diferentes parâmetros geomecânicos na ocorrência de mecanismos de ruptura (Priest, 1993; Wyllie & Mah, 2004).

4.1 Ruptura planar

Foi ajustado um modelo de regressão linear múltipla para avaliar a influência de parâmetros geomecânicos na possibilidade de ocorrência de ruptura planar. O modelo apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,5686$, indicando que aproximadamente 56,9% da variabilidade da variável resposta é explicada pelas variáveis independentes analisadas.

Entre os parâmetros avaliados, apenas o ângulo de atrito das descontinuidades (ϕ) apresentou significância estatística ($p = 0,033$), indicando que valores mais elevados desse parâmetro contribuem para a redução da possibilidade de ocorrência desse tipo de ruptura. Esse resultado é coerente com os modelos clássicos de estabilidade de taludes rochosos, nos quais a resistência ao cisalhamento ao longo das descontinuidades desempenha papel fundamental no controle da estabilidade (Hoek & Bray, 1981).

Os parâmetros RQD, GSI e mergulho do talude não apresentaram significância estatística ao nível de 5%. Além disso, o teste F global do modelo não foi significativo ($p = 0,1576$), sugerindo que o conjunto das variáveis analisadas apresenta capacidade limitada para explicar a variabilidade observada na possibilidade de ruptura planar.

Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que a ruptura planar depende fortemente da relação geométrica entre o plano de descontinuidade e a face do talude, especialmente quando o mergulho da descontinuidade é inferior ao da face do talude e superior ao ângulo de atrito do material (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). Dessa forma, fatores geométricos específicos das descontinuidades, não diretamente representados no modelo estatístico, podem exercer influência significativa nesse mecanismo de ruptura.

4.2 Ruptura em cunha

O modelo de regressão linear múltipla ajustado para a possibilidade de ruptura em cunha apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,863$, indicando que aproximadamente 86,3% da variabilidade da variável resposta é explicada pelos parâmetros geomecânicos analisados. O modelo apresentou significância estatística global ($F = 11,03$; $p = 0,0038$).

Entre as variáveis avaliadas, o RQD ($p = 0,005$) e o mergulho do talude ($p = 0,0005$) apresentaram significância estatística. Esses resultados indicam que maciços com maior grau de fraturamento e taludes com maiores inclinações apresentam maior suscetibilidade ao desenvolvimento de rupturas em cunha.

De acordo com Wyllie e Mah (2004), a ruptura em cunha ocorre quando duas ou mais descontinuidades se intersectam formando um bloco potencialmente instável, cuja linha de interseção possui direção favorável ao deslizamento em relação à face do talude. Nesse contexto, a geometria do talude e a intensidade do fraturamento do maciço rochoso desempenham papel determinante no desenvolvimento desse mecanismo.

O ângulo de atrito apresentou significância marginal ($p = 0,085$), sugerindo que maiores valores desse parâmetro contribuem para a redução da instabilidade. Já o GSI não apresentou significância estatística no modelo.

Esses resultados indicam que, embora a resistência do maciço influencie a estabilidade, a estrutura do maciço e a geometria do talude são fatores predominantes no controle da ruptura em cunha.

4.3 Tombamento flexural

O modelo de regressão linear múltipla ajustado para a possibilidade de tombamento flexural apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,8848$, indicando que aproximadamente 88,5% da variabilidade da variável resposta é explicada pelos parâmetros analisados. O modelo apresentou significância estatística global ($F = 13,44$; $p = 0,0021$).

Entre as variáveis avaliadas, apenas o RQD apresentou significância estatística ($p < 0,001$), indicando que maciços com blocos mais íntegros apresentam maior suscetibilidade ao desenvolvimento desse mecanismo de ruptura.

Esse comportamento está associado à natureza do tombamento flexural, que ocorre geralmente em maciços rochosos formados por blocos relativamente rígidos separados por descontinuidades subverticais, permitindo o desenvolvimento de rotações progressivas dos blocos em direção ao vazio (Goodman, 1989; Wyllie & Mah, 2004).

Os parâmetros GSI, ângulo de atrito e mergulho do talude não apresentaram significância estatística no modelo, indicando que a integridade estrutural dos blocos rochosos exerce papel predominante na ocorrência desse mecanismo.

4.4 Importância relativa das variáveis

A comparação entre os modelos permite identificar quais variáveis geomecânicas apresentam maior influência em cada mecanismo de ruptura.

Tabela 2. Variáveis mais influentes em relação ao mecanismo de ruptura

Mecanismos de ruptura	R^2	Variáveis ais influentes
Ruptura Planar	0,57	Ângulo de atrito
Ruptura em cunha	0,86	RQD e mergulho do talude
Tombamento flexural	0,88	RQD

Observa-se que os modelos associados à ruptura em cunha e ao tombamento flexural apresentaram os maiores coeficientes de determinação, indicando melhor capacidade explicativa quando comparados ao modelo de ruptura planar.

De modo geral, os resultados indicam que diferentes parâmetros geomecânicos controlam distintos mecanismos de instabilidade em taludes rochosos. A resistência ao cisalhamento das descontinuidades mostrou maior influência na ruptura planar, enquanto a estrutura do maciço e a geometria do talude desempenham papel predominante nos mecanismos de ruptura em cunha e tombamento.

Esses resultados estão em concordância com estudos clássicos sobre estabilidade de taludes rochosos, que destacam a importância da interação entre geometria do talude, orientação das descontinuidades e propriedades geomecânicas do maciço (Hoek & Bray, 1981; Bieniawski, 1989; Priest, 1993; Wyllie & Mah, 2004). Além disso, a influência do RQD observada nos modelos reforça o papel do grau de fraturamento do maciço no controle da estabilidade, uma vez que esse parâmetro condiciona o tamanho e o comportamento dos blocos potencialmente instáveis.

Os resultados também são compatíveis com o comportamento típico de taludes escavados em basaltos da Formação Serra Geral, caracterizados por sistemas de fraturas associados ao resfriamento dos derrames vulcânicos, que favorecem o desenvolvimento de mecanismos de ruptura em cunha e tombamento (Priest, 1993; Goodman, 1989; Wyllie & Mah, 2004).

5 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a influência de parâmetros geomecânicos na ocorrência de diferentes mecanismos de instabilidade em taludes rochosos por meio da aplicação de modelos de regressão linear múltipla, utilizando dados obtidos em levantamentos estruturais realizados ao longo da rodovia BR-470, no estado do Rio Grande do Sul, região afetada por eventos extremos de precipitação em 2024.

Os resultados indicaram que os modelos estatísticos permitiram identificar relações entre parâmetros geomecânicos do maciço rochoso e os mecanismos de ruptura analisados, evidenciando o potencial da aplicação de técnicas estatísticas multivariadas como ferramenta complementar na avaliação da estabilidade de taludes.

O modelo associado à ruptura planar apresentou coeficiente de determinação moderado ($R^2 = 0,57$), sendo o ângulo de atrito das descontinuidades a variável mais relevante. Já o modelo de ruptura em cunha apresentou elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,86$), com maior influência do RQD e do mergulho do talude. Para o mecanismo de tombamento flexural, foi observado o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,88$), sendo o RQD a variável mais significativa.