

## Estabilidade de Taludes Rochosos na BR-101/SC: Influência do Nível d'Água e Medidas de Mitigação

Cleyson Lima Melo

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

Mestrando, PGECIV/UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Armando Prestes de Menezes Filho

Professor, PGECIV-UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, armando.prestes.filho@uerj.br

Daniela Santos Rangel

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

Luís Diego Moraes Souza

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

Rafael Junqueira Villela

Engenheiro Geotécnico, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, rafael.villela@sondotecnica.com.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta uma análise de estabilidade de taludes rochosos, com ênfase na influência do nível d'água, em um trecho de intensa movimentação de veículos da rodovia BR-101 no estado de Santa Catarina. Para a caracterização das propriedades geomecânicas dos maciços rochosos, foi realizado mapeamento geológico-geotécnico utilizando o sistema de classificação geomecânico Rock Mass Rating – RMR (Bieniawski, 1989) com a aferição do parâmetro JRC (Coeficiente de Rugosidade de Junta) e resultados de sondagens mistas. A geologia do local apresenta corpos intrusivos graníticos (Unidade Granito Imaruí-Capivari) que compõem parte do embasamento cristalino do estado. A identificação dos possíveis modos cinemáticos de rupturas dos taludes rochosos e a definição de critérios de prioridade para o seu tratamento de estabilização foram realizadas utilizando-se os softwares Dips e SWedge. Importa destacar que o talude estudado possui histórico de movimentações, condição que orienta a interpretação dos resultados com maior conservadorismo quando comparada à de taludes historicamente estáveis.

Foram conduzidas análises de sensibilidade variando o grau de saturação das descontinuidades e parâmetros de resistência típicos de juntas em granitos alterados. Os resultados indicaram que a variação do nível d'água é o fator mais influente na redução/aumento do fator de segurança, superando, nas faixas avaliadas, o efeito de ajustes plausíveis em atrito e coesão. Nos trechos mais críticos, sob condições saturadas, fatores de segurança inferiores a 1,5 motivaram a implementação de drenos horizontais profundos (DHP), complementados por tela metálica e chumbadores para contenção de instabilidades superficiais. As simulações e a retroanálise sugerem que, com o controle efetivo da água, os fatores de segurança tendem a manter-se em níveis aceitáveis, reduzindo o risco de instabilidades.

**PALAVRAS-CHAVE:** Taludes rochosos, drenos horizontais profundos, análise cinemática, Classificação geomecânica (RMR), Mecânica das rochas.

**ABSTRACT:** This study presents a stability analysis of rock slopes, with emphasis on the influence of the groundwater level, in a section of the BR-101 highway in the state of Santa Catarina, Brazil, with high traffic volume. To characterize the geomechanical properties of the rock masses, geological-geotechnical mapping was carried out using the Rock Mass Rating (RMR) classification system (Bieniawski, 1989), along with Joint Roughness Coefficient (JRC) measurements and results from mixed drilling tests. The local geology consists of granitic intrusive bodies (Imaruí-Capivari Granite Unit), which are part of the crystalline basement of the region. The identification of possible kinematic failure modes of the rock slopes and the definition of prioritization criteria for stabilization treatment were performed using the Dips and SWedge software. It is important to highlight that the slope studied has a history of movements, which calls for a more conservative interpretation of the results when compared to historically stable slopes.

Sensitivity analyses were conducted by varying the degree of discontinuity saturation and typical strength parameters of joints in weathered granites. The results indicated that changes in the groundwater level are the most influential factor in reducing or increasing the safety factor, surpassing, within the evaluated ranges, the effect of plausible adjustments to friction angle and cohesion. In the most critical sections, under saturated conditions, safety factors below 1.5 led to the implementation of deep horizontal drains (DHD), complemented by metallic mesh and rock bolts to control superficial instabilities. Simulations and back-analysis suggest that, with effective water control, the safety factors tend to remain within acceptable levels, reducing the risk of slope instabilities.

**KEYWORDS:** Rock slopes, deep horizontal drains, kinematic analysis, geomechanical classification (RMR), rock mechanics.

## 1 INTRODUÇÃO

As obras de infraestrutura em regiões acidentadas e com afloramentos rochosos frequentemente enfrentam problemas associados à estabilidade de encostas. No caso da BR-101/SC, a adequação do acostamento da rodovia demandou a execução de cortes significativos em maciços rochosos. Estes cortes, por sua vez, expuseram superfícies fraturadas que, submetidas à ação de águas subterrâneas e pluviais, tornam-se suscetíveis a diferentes modos de ruptura.

Nesse contexto, a análise de estabilidade torna-se fundamental para garantir a segurança viária e a durabilidade das intervenções. Este estudo concentra-se nos mecanismos de instabilidade e nas soluções aplicadas a taludes rochosos afetados por fraturas intensas e pelo nível d'água elevado, com base em dados de campo, observações históricas e simulações computacionais com os softwares Dips e SWedge.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia adotada contempla uma abordagem integrada de classificação geomecânica e análise estrutural, com base em dados de campo e ferramentas computacionais. Utilizou-se o sistema Rock Mass Rating (RMR) para qualificar o maciço, e os softwares Dips e SWedge para realizar as análises de estabilidade dos taludes. A metodologia permitiu identificar os mecanismos cinemáticos de ruptura e simular o comportamento dos taludes frente a diferentes níveis de saturação, possibilitando a proposição de soluções específicas para os trechos mais críticos.

### 2.1 Dips

O Dips é um software de análise estatística e visualização de dados estruturais, como orientação de fraturas e juntas. Com base nas medições de campo, foi possível construir estereogramas que evidenciam as principais direções de fraturas.

No trecho estudado, identificaram-se famílias distintas de descontinuidades, cujas orientações estruturais foram correlacionadas com a geometria dos taludes. Essa análise permitiu prever rupturas do tipo cunha, tombamento e planar, especialmente em trechos com alta densidade de fraturas e ângulos favoráveis à instabilidade.

### 2.2 SWedge

O software SWedge, da Rocscience, foi utilizado para análises de estabilidade por ruptura em cunha. A partir das famílias de fraturas identificadas com o Dips, foram geradas simulações considerando diferentes níveis de saturação das descontinuidades. Adotaram-se parâmetros típicos para juntas em granitos alterados: coesão igual a 5 kPa e ângulo de atrito de 30°.

As análises foram realizadas com base no método de equilíbrio limite, utilizando uma abordagem determinística, com amostragem do tipo Latin Hypercube para variação paramétrica, permitindo explorar as

incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos. As superfícies de ruptura em cunha foram definidas com base nos dados estruturais obtidos no Dips.

Foram simuladas condições de saturação variando entre 0% e 100% de preenchimento com água nas discontinuidades. Os resultados evidenciaram uma forte sensibilidade da estabilidade à presença de água, com fatores de segurança significativamente reduzidos nas condições saturadas — o que reforça a importância da implementação de sistemas de drenagem profunda como medida de controle e correção.

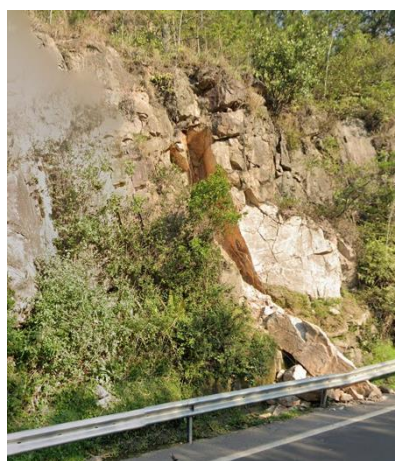
### 3 ESTUDO DE CASO

O trecho analisado está localizado entre os km 259+810 e 259+945 da Rodovia BR-101/SC, em área caracterizada por relevo montanhoso, cortes profundos e presença de maciços rochosos graníticos da unidade Granito Imaruí-Capivari. A ocorrência de fraturas intensas, associadas ao histórico de desmontes, configura um cenário propício ao desenvolvimento de instabilidades estruturais.

Durante o levantamento de campo, foi identificado um talude com histórico de movimentações, cuja evolução foi registrada por imagens da plataforma Google Street View (Figura 1). As fotografias documentam a condição da encosta antes do evento de instabilidade (julho de 2019), logo após o movimento de massa (agosto de 2021) e após a implantação das medidas corretivas (dezembro de 2021), destacando-se a instalação dos Drenos Horizontais Profundos (DHPs) como solução principal de estabilização.



(a)



(b)



(c)

Figura 1 – Situação do talude entre os km 259+810 e 259+945: (a) julho/2019 – antes da instabilidade, (b) agosto/2021 – após o movimento de massa, (c) dezembro/2021 – após implantação dos DHPs.

A retroanálise do evento forneceu subsídios importantes para a calibração dos parâmetros utilizados nas simulações computacionais. Os resultados confirmaram que a saturação das fraturas foi o principal fator desencadeador da ruptura, e que a instalação dos DHPs foi fundamental para restabelecer os níveis de segurança exigidos pelas normas técnicas.

#### 3.1 Geologia e tipos de ruptura

O trecho estudado está inserido no embasamento cristalino do sul de Santa Catarina, onde predominam os granitos da unidade Imaruí-Capivari, pertencentes à Suíte Intrusiva Pedras Grandes. Estas rochas apresentam características típicas de sienogranitos e monzogranitos porfíricos, com fraturamento intenso decorrente de processos tectônicos e desmontes prévios realizados durante intervenções rodoviárias anteriores. Durante o mapeamento estrutural, foram identificadas três famílias principais de discontinuidades:

- Subhorizontais, com inclinação entre 15° e 30°;
- Inclínadas, entre 31° e 69°;
- Subverticais, com ângulos superiores a 70°.



A partir dessas famílias, os seguintes **modos de ruptura** foram considerados:

### 3.1.1 Ruptura Planar

Ocorre quando uma descontinuidade individual apresenta orientação paralela à superfície do talude e emerge na face do corte, tendo baixa resistência ao cisalhamento e atrito insuficiente para conter o deslizamento ao longo da junta. No trecho analisado, esse tipo de instabilidade foi identificado pontualmente, principalmente em locais onde fraturas subhorizontais interceptam o plano do talude.

### 3.1.2 Ruptura em Cunha

É o modo de ruptura mais recorrente em cortes rochosos, especialmente em maciços graníticos fraturados. Trata-se da formação de um corpo instável limitado pela interseção de duas descontinuidades não paralelas. Para que a ruptura em cunha ocorra, a linha de interseção entre os dois planos deve ter direção e inclinação compatíveis com o escorregamento. Este mecanismo foi amplamente verificado por meio da modelagem no software Dips, e validado por retroanálises feitas com SWedge, sobretudo no trecho entre os km 259+810 e 259+945.

### 3.1.3 Ruptura por Tombamento (Toppling)

Este mecanismo ocorre quando blocos relativamente altos e estreitos são separados por juntas subverticais e tombam para frente, geralmente por gravidade. A ruptura por tombamento foi considerada em segmentos com fraturas verticais paralelas ao plano do talude. No entanto, a sua ocorrência foi menos expressiva que a ruptura em cunha no trecho estudado.

### 3.1.4 Ruptura Circular ou Rotacional

A ruptura circular ou rotacional é caracterizada por uma superfície de escorregamento com geometria curva, comum em materiais homogêneos como solos residuais, saprólitos ou sedimentos pouco consolidados. Esse tipo de instabilidade está geralmente associado à resistência ao cisalhamento do solo e ao nível do lençol freático. No entanto, no presente estudo, que se concentra em cortes executados predominantemente em maciços rochosos fraturados, esse mecanismo não se mostrou aplicável. Assim, não foi objeto de análise detalhada neste trabalho.

## 3.2 Influência do nível d'água

A presença de água foi o fator de maior influência negativa na estabilidade dos taludes. A elevação do nível freático dentro das fraturas atuou reduzindo a resistência por cisalhamento, devido ao aumento da pressão neutra. A retroanálise mostrou que trechos anteriormente estáveis tornaram-se instáveis após eventos de saturação, como observado em imagens históricas.

A implantação dos Drenos Horizontais Profundos (DHPs) foi essencial para restabelecer os fatores de segurança aos níveis exigidos pelas normas técnicas.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para analisar os mecanismos de ruptura em cunha, foram utilizados os parâmetros de resistência ao cisalhamento das descontinuidades. No talude localizado entre os km 259+810 e 259+945, adotou-se um ângulo de atrito de  $30^\circ$ , conforme indicado por Goodman (1989) como valor típico para juntas em granitos alterados, e um intercepto coesivo de 5,0 kPa, representando um ajuste linear da envoltória de Mohr-Coulomb.

De acordo com o relatório geomecânico (CCR Via Costeira, 2024), foram identificadas três famílias principais de descontinuidades no maciço: subhorizontais ( $15^\circ$ – $30^\circ$ ), inclinadas ( $31^\circ$ – $69^\circ$ ) e subverticais ( $>70^\circ$ ). As superfícies de contato foram caracterizadas como ondulado-planas, segundo o critério da ISRM (1978), o que influencia diretamente na resistência das juntas.

A Figura 2, gerada no software Dips, apresenta a análise estereográfica das famílias de fraturas mapeadas, ilustrando a possibilidade de ruptura por cunha a partir da interseção entre planos desfavoráveis.

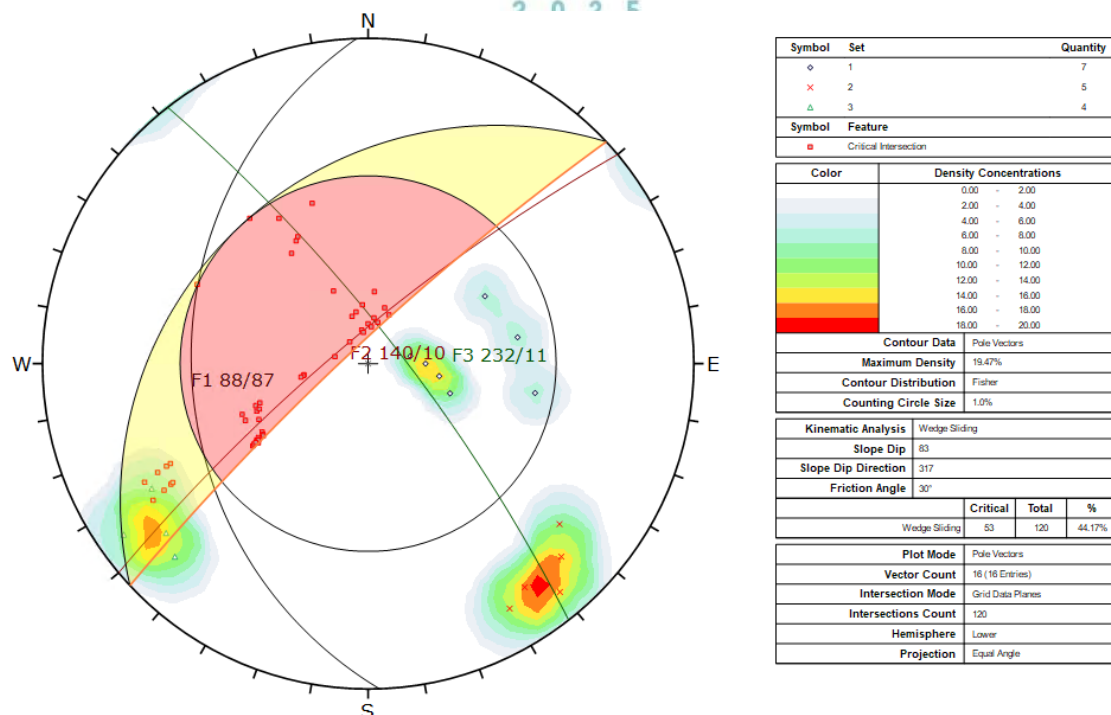
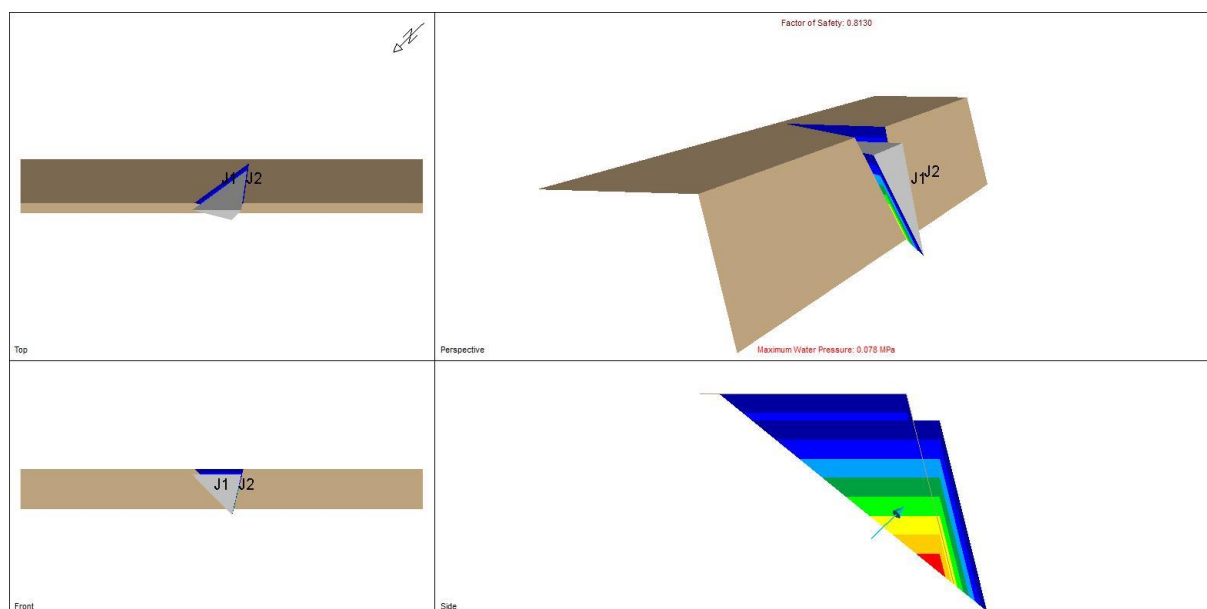


Figura 2 – Análise estereográfica das descontinuidades estruturais (software Dips)

O trecho entre os km 259+810 e 259+945 apresentou registros históricos de movimentações, como evidenciado por imagens do Google Street View, e confirmou-se por retroanálise que a saturação das fraturas foi o principal gatilho da ruptura. Isso é coerente com o que afirma Fiori (2015), que aponta a percolação como fator de instabilidade ao reduzir a tensão efetiva nas juntas.

As análises de estabilidade foram conduzidas com o software SWedge, baseadas em equilíbrio limite com abordagem determinística do tipo Latin Hypercube, considerando variações no nível de saturação entre 0% e 100%. A Figura 3 ilustra a situação de 100% de saturação, onde o fator de segurança foi de apenas  $FS = 0,81$ , evidenciando condição de colapso. A Figura 4, por sua vez, mostra o cenário com 25% de saturação, apresentando um fator de segurança de  $FS = 1,54$ , considerado aceitável para condição de operação.

Figura 3 – Trecho do km 259+810 ao 259+945 – 100% de água –  $FS = 0,81$  (software SWedge)

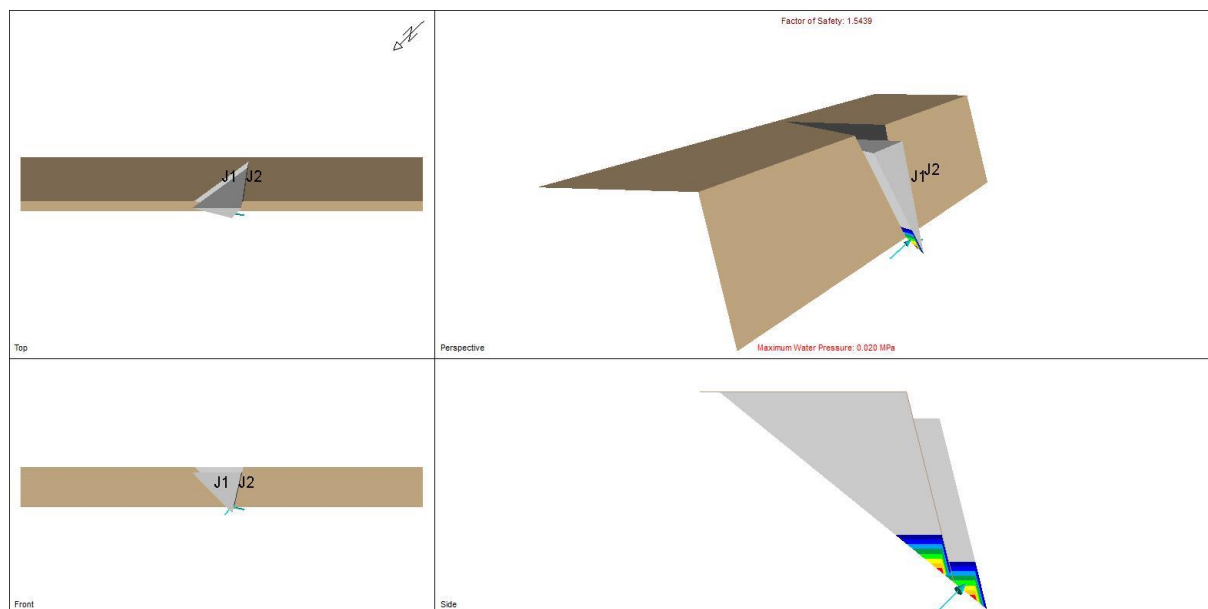


Figura 4 – Trecho do km 259+810 ao 259+945 – 25% de água – FS= 1,54 (software SWedge)

Após a instalação dos Drenos Horizontais Profundos (DHPs), em conjunto com telas metálicas e chumbadores, observou-se um desempenho satisfatório do talude, sem registro de novas movimentações significativas em inspeções visuais realizadas após períodos chuvosos. Embora as simulações indiquem que a redução do nível d'água para aproximadamente 25% da altura do talude eleva o fator de segurança para 1,54, não há monitoramento sistemático que comprove que os DHPs mantêm permanentemente o nível d'água abaixo desse valor. Ainda assim, a ausência de sinais recentes de instabilidade sugere que o sistema de drenagem tem contribuído para manter a encosta em condições estáveis, atendendo aos critérios de segurança previstos na NBR 11682:2009.

A análise de sensibilidade indicou que a redução do nível d'água nas discontinuidades exerceu influência significativamente maior sobre o fator de segurança do que variações plausíveis nos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Testes adicionais — realizados no âmbito do relatório técnico da CCR Via Costeira (2024) — apontam que ajustes no ângulo de atrito e na coesão, dentro de intervalos geotécnicos razoáveis para juntas em granitos alterados, resultaram em alterações pouco significativas no fator de segurança. Esses resultados sugerem que, no caso estudado, o controle do nível d'água desempenha papel mais relevante para a estabilização do talude do que modificações nos parâmetros de resistência.

Cabe destacar que os percentuais de 25% e 100% utilizados nas simulações referem-se à altura relativa de água no talude considerada para estimar pressões neutras, e não ao grau de saturação do maciço. Esse critério foi adotado para representar, de forma simplificada, diferentes condições de percolação nas discontinuidades.

Dessa forma, observa-se a coerência entre os resultados computacionais e a solução adotada em campo. A presença de água teve papel determinante na instabilidade observada, e a drenagem profunda se mostrou eficaz como medida de estabilização.

## CONCLUSÕES

As análises realizadas confirmaram que a estabilidade dos taludes rochosos da BR-101/SC é extremamente sensível à presença de água. As simulações e observações de campo demonstraram que a redução da pressão neutra por meio de drenagem eficaz é fundamental para garantir a segurança das encostas.

O uso combinado da classificação geomecânica, modelagem cinemática e simulação computacional se mostrou eficiente na identificação de trechos críticos e no dimensionamento das soluções. As medidas de estabilização adotadas — como DHPs, telas metálicas e chumbadores — apresentaram desempenho



satisfatório, elevando os fatores de segurança e reduzindo o risco de acidentes.

Os resultados reforçam que, no caso estudado, a variação do nível d'água nas discontinuidades tem impacto mais significativo na estabilidade do que ajustes nos parâmetros de resistência, destacando a importância de considerar cenários de diferentes alturas de água na modelagem.

Esse estudo evidencia a importância da drenagem e do mapeamento estrutural detalhado para a estabilidade de taludes rochosos em obras rodoviárias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York, USA.

Fiori, A. P. (2015). *Geotecnia aplicada à estabilização de taludes*. Apostila do curso de pós-graduação em Engenharia Geotécnica, Instituto IDD, Curitiba.

Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. Wiley, 2nd ed., New York, USA.

CCR Via Costeira (2024). *Relatório Técnico VCO-101SC-257-258-MOP-EXE-RT-D3-001-R00 – Estabilidade de Taludes e Fundação de Aterros*. Projeto de Geotecnia, BR-101/SC – Km 257+200 a Km 260+600.