



Alternativa de retaludamento para a estabilidade de um talude rochoso rodoviário em cenário crítico executivo na BR-101/SC

Cleber Floriano

Diretor, SF Engenharia Diferenciada, Porto Alegre, Brasil, cleber@souzafloriano.com

Emily Quevedo

Acadêmica, PUCRS, Porto Alegre, Brasil, emily@souzafloriano.com

Flávio Ramos

Geotécnico, CCR Rodovias, São Paulo, Brasil, flavio.amos@motiva.com.br

Adriano Marchiorreto

Geofísico, Alta Resolução, São Paulo, Brasil, adriano@altaresolucao.com.br

Leandro Fagundes

Eng. Minas, SF Engenharia, Porto Alegre, Brasil, leandro.fagundes.eng@gmail.com

RESUMO: Este artigo apresenta o estudo e a solução adotada para a estabilização de um talude rochoso no km 337 da BR-101/SC, no município de Tubarão, em uma área com geologia complexa e suscetível a instabilidades. O maciço rochoso local é formado por granitos faneríticos intensamente fraturados, com zonas de alteração que geram materiais de transição, propensos à formação de blocos esfoliados e rupturas por desagregação. A caracterização geotécnica incluiu métodos diretos (mapeamento geológico, abertura de picadas e sondagens) e indiretos (sísmica de refração e eletrorresistividade), permitindo a identificação de descontinuidades, zonas de baixa coesão e a profundidade da interface rocha-solo. O principal mecanismo de instabilidade diagnosticado foi o tombamento planar de blocos destacados por fraturas inclinadas em direção à rodovia. Restrições como a presença de uma torre de transmissão e a passagem do túnel da pista oposta impuseram desafios adicionais à concepção da solução. O projeto previu desmonte controlado em bancadas, drenagem profunda (DHPs), valetas revestidas, grampeamento e contenções pontuais. A abordagem multidisciplinar, integrando geotecnia, geologia, geofísica, engenharia de minas, projeto viário e ambiental, foi fundamental para garantir a segurança, viabilidade técnica e funcionalidade da solução implantada.

PALAVRAS-CHAVE: Instabilidade de taludes rochosos, geologia estrutural, desmonte controlado.

ABSTRACT: This paper presents the study and solution adopted for stabilizing a rock slope at km 337 of the BR-101/SC highway, in Tubarão/SC, within a geologically complex and instability-prone area. The local rock mass consists of intensely fractured phaneritic granitoids, with weathered zones producing transitional materials, susceptible to exfoliated block formation and disaggregation failures. Geotechnical characterization combined direct methods (geological mapping, trail clearing, drilling) and indirect methods (seismic refraction, electrical resistivity), enabling the identification of discontinuities, low-cohesion zones, and the soil-rock interface depth. The main instability mechanism was planar toppling of blocks defined by fractures dipping toward the road. Constraints such as a transmission tower and the tunnel on the opposite lane added design challenges. The solution involved controlled bench blasting, deep horizontal drains (DHDs), lined ditches, soil nailing, and localized retaining structures. A multidisciplinary approach integrating geotechnics, geology, geophysics, mining, road design, and environmental aspects ensured the safety and technical feasibility of the intervention.

KEYWORDS: Rock slope instability, structural geology, controlled blasting.

1 INTRODUÇÃO

A duplicação da BR-101/SC representa uma das obras de infraestrutura viária mais relevantes para a conectividade logística do sul do Brasil. Durante sua execução, diversos segmentos apresentaram condicionantes geotécnicos desafiadores, especialmente em regiões com afloramentos rochosos intensamente fraturados, como no km 337, no município de Tubarão/SC, onde foi identificado um talude com evidentes sinais de instabilidade, como a queda de blocos, exigindo um projeto executivo específico de estabilização.

A condição geológica local, caracterizada por granitos com alto grau de fraturamento e intemperismo, associada à geometria desfavorável do corte e à presença de estruturas sensíveis, como uma torre de transmissão e o túnel da pista oposta, impôs restrições adicionais ao projeto. A proximidade com essas infraestruturas e a complexidade de intervenções mais invasivas, como desmontes por explosivos, tornaram necessária uma abordagem integrada de diagnóstico e projeto.

Este artigo apresenta o estudo de caso do talude rochoso apresentado, abordando os aspectos geológicos, metodologias de investigação aplicadas, mecanismos de instabilidade identificados, restrições operacionais e soluções de engenharia propostas. A experiência evidencia a importância da caracterização multidisciplinar e da compatibilização entre segurança geotécnica e condicionantes operacionais em obras inseridas em ambientes rochosos complexos.

2. IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL

A Figura 1 apresenta uma imagem de satélite do local, o talude em estudo encontra-se na pista norte. A Figura 2 apresenta fotos do local, que tem sua geometria em corte caixão, ou seja, apresenta cortes quase verticalizados.



Figura 1. Localização do ponto de estudo, Google Earth.



Figura 2. Fotos do local de estudo.

2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

O segmento da BR-101/SC no km 337 localiza-se sobre um maciço rochoso composto por rochas graníticas pré-cambrianas e arqueanas, o relevo é moldado principalmente pelas drenagens, cujas linhas estruturais resultam em um fracionamento distinto em comparação aos outros maciços rochosos. De acordo com o Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, o local foi mapeado como Granito Imaruí-Capivari (NP3ypc), conforme apresentado na Figura 3. Essa litologia foi descrita como Sienogranitos e Monzogranitos leucocráticos de coloração cinza a rósea, inequigranulares porfíricos, com raros enclaves máficos.

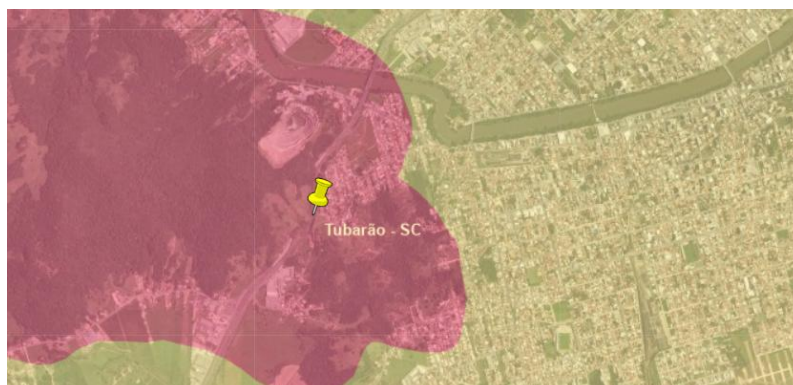


Figura 3. Geologia local segundo CPRM (2022) - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. A área em rosa representa a unidade Corpo Granito Imaruí-Capivari.

O Granito Imaruí-Capivari é descrito por Silva & Leite (2000) como um sienogranito a monzogranito, de cor cinza a rosa, de granulação média a grossa e textura porfírica, com abundantes fenocristais de K-feldspato de 1 a 5 cm que ocupam de 30 a 80% do volume total da rocha. Também são comuns fenocristais de plagioclásio e quartzo, de tamanhos reduzidos. A matriz é descrita como quartzo-feldspática média a grossa. A biotita ocupa de 5 a 10% do volume total da rocha. As observações macroscópicas realizadas em campo, apresentadas na Figura 4, coincidem com a descrição proposta por Silva & Leite (2000). O sienogranito grosso de rosa a cinza é a principal litologia do maciço. A mineralogia inclui feldspato alcalino (cerca de 60% do volume total), quartzo, plagioclásio e biotita. A textura porfírica está presente em amostras de alguns setores do alvo. Nenhuma foliação significativa foi identificada macroscopicamente.

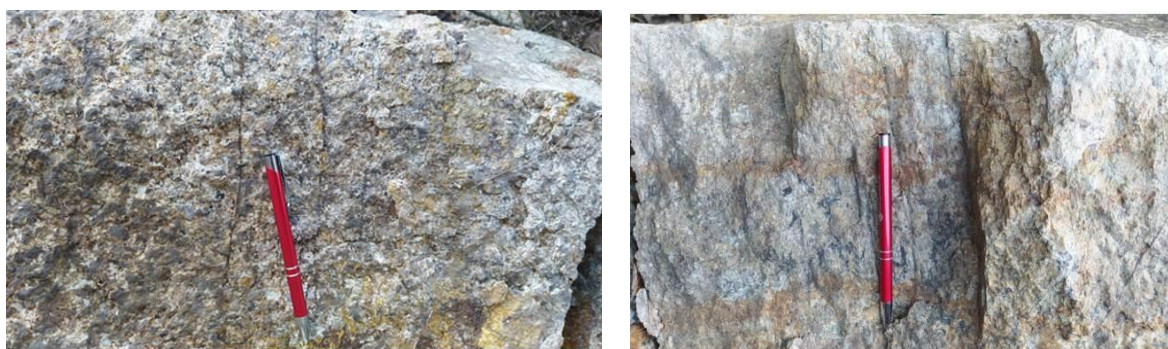


Figura 4. Granito Imaruí-Capivari: granito maciço, matriz grosseira e rico em K-feldspato.

Os taludes apresentam diversas cicatrizes de deslizamento, além de inúmeros blocos decimétricos acumulados no sopé do maciço. A infiltração de água é um fenômeno recorrente, intensificando-se durante episódios de precipitação, favorecendo a percolação ao longo das discontinuidades e zonas de fraturamento da rocha. Observam-se também gotejamentos no talude esquerdo, e a conseqüente pressão hidrostática contribui para o desprendimento de blocos. As maiores cicatrizes de deslizamento estão localizadas nos setores mais intemperizados de ambos os taludes (esquerdo e direito), evidenciando o papel do intemperismo e dos altos índices pluviométricos como os principais condicionantes dos processos de instabilidade.



Figura 5. Raízes e cipós crescendo nas aberturas de fraturas.

Ao observar as marcas do relevo do local, visto por imagens de satélite, Figura 6 (a), pode-se correlacionar com as marcas dos principais planos de fraturamento observados na face do talude, Figura 6 (b). O mapeamento geoestrutural foi conduzido diretamente na face exposta do talude de corte, permitindo a identificação das principais discontinuidades presentes no maciço. Essa abordagem possibilitou a caracterização visual e estrutural dos planos de fratura, considerando parâmetros como espaçamento, abertura, preenchimento e orientação relativa. O projeto *as built* do túnel também mostra o estudo geológico indicando que as discontinuidades também são convergentes com o levantamento da face do talude.



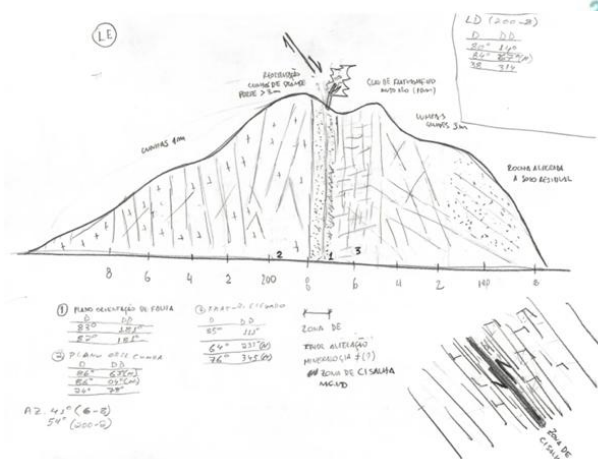
(a)



(b)

Figura 6: (a) Cruzamentos de falhas tectônicas próximo a região do corte, (b) Direção dos planos de discontinuidades visíveis no talude.

Cabe observar que a direção destes lineamentos é visível e correspondente, diagonalizados do lado direito e esquerdo do corte caixão. Este conjunto de lineamento, ajuda a identificar que existem zonas de maciços mais íntegros, caminhos de percolação e zonas mais intemperizadas. A zona mais alternada e crítica do talude esquerdo corresponde a metade final do talude (sentido do fluxo rodoviário), conforme apresentado na Figura 7.



(a)



(b)

Figura 7: (a) Croqui de campo demarcando as principais regiões variacionais do talude rochoso, em vista frontal, (b) Planos de descontinuidades visíveis no talude e cunha mobilizada.

3 METODOLOGIA, INVESTIGAÇÕES E PERFIL GEOTÉCNICO

A caracterização geotécnica do talude foi realizada por meio de metodologia integrada, combinando investigações diretas e indiretas, conforme diretrizes da NBR 6484 (2001) para sondagens e práticas recomendadas pelo ISRM (1981) para caracterização de maciços rochosos. As atividades de campo incluíram mapeamento geológico detalhado, abertura de caminhos para alinhamentos topográficos, resgate de sondagens rotativas do túnel, ensaios de eletrorresistividade e ensaios de sismica de refração.

Através de uma bússola tipo Brunton foram coletados 72 dados estruturais de atitudes de descontinuidades (mergulho e direção de mergulho). O ajuste de declividade magnética na região é de $19^{\circ} 15'$. Com auxílio do Software Dips 6.0 (Rocscience), as medidas foram organizadas em quatro famílias principais, seguindo os princípios de análise cinemática, conforme Hoek & Bray (1981). A família 3 apresentou uma variação grande de mergulho (9 a 49°) com direção de 96° e espaço médio de $0,73\text{m}$. Já a família 1 representou as fraturas mais recorrentes nos taludes, são subverticais e desenharam mergulhos tanto para NW quanto para SE. A família 2, a segunda mais comum no maciço, mergulha para a direção NE. Juntas, as famílias 1 e 2 representam mais que a metade das medidas realizadas.

A família 4 possui a menor quantidades de medidas, foi reconhecida em campo, como uma família de descontinuidades sub-horizontais (junta de alívio de pressão), entretanto é contribuinte do conjunto de descontinuidades e das combinações para gerar potenciais mecanismos de movimentos cinemáticos. A dificuldade de obter medidas sub-horizontais em uma parede quase vertical e a alto espaçamento entre as descontinuidades justificam as barreiras técnicas da análise desta família. O espaçamento desta família é, em média, de $1,5$ metros. Através do Software Dips 6.0 (Rocscience), as medidas foram plotadas em um estereograma.



(a)



(b)

Figura 8: (a) Famílias 1 e 2, (b) Família 4 (juntas de alívio de pressão).

Foi realizada a disposição das famílias medidas no espaço em relação ao talude, a intersecção das famílias 1 e 2, as duas mais persistentes no afloramento, sugerem uma tendência de orientação para o sentido NE. O projeto *as built* do túnel apresenta um estudo geológico indicando descontinuidades convergentes com o levantamento da face do talude. Além disso, o projeto apresenta classes geológicas correspondentes a aquelas levantadas em campo, com maciço de classe III na classificação RMR, segundo os critérios estabelecidos por Bieniawski (1989) e adotados pela ISRM (1981), mas cruzam zonas mais pobres de classe IV e V.

Nota-se que os níveis freáticos são elevados ao longo das juntas, localizadas acima do túnel, favorecendo a percolação da água. Essa condição estabelece caminhos preferenciais de fluxo com gradiente direcionado às regiões de menor pressão ou altimetria inferior, como ocorre na face do talude no lado esquerdo. Os levantamentos geofísicos por eletrorresistividade colaboram com essa interpretação, evidenciando maior condutividade elétrica na região central do talude, compatível com elevados teores de umidade ou presença de água livre nas descontinuidades rochosas.

Além disso foram realizadas análises estatísticas considerando a variação dos percentuais dos mecanismos cinemáticos potenciais, obtidos a partir das sobreposições (*overlays*) de mecanismos de cunha, planar e tombamento. Essas avaliações foram conduzidas com o auxílio do software Dips (Rocscience), que possibilita a organização dos dados estruturais em estereogramas e a aplicação de critérios cinemáticos de estabilidade conforme Hoek & Bray (1981).

Além dos levantamentos de campo, foram realizados levantamentos geofísicos e sísmicos, conforme metodologias descritas em Telford et al. (1990) para prospecção geofísica aplicada à engenharia, foram implantados seis alinhamentos no trecho do Morro do Formigão, sendo quatro longitudinais à rodovia e dois transversais. A Figura 9 apresenta a localização aproximada da área investigada com as posições finais dos seis alinhamentos desta campanha (alinhamentos geoeletricos em vermelho e sísmicos em azul, sobrepostos).

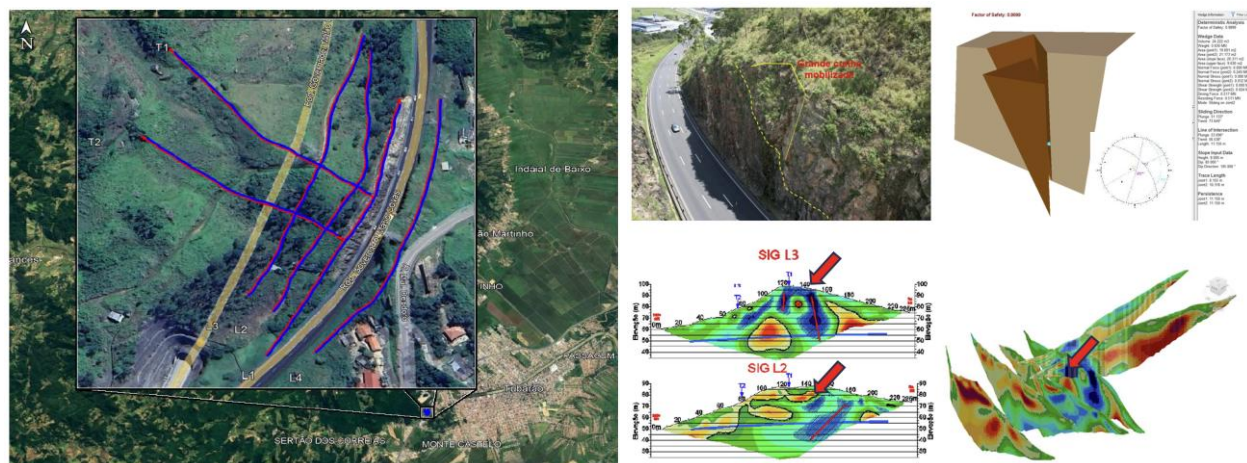


Figura 9: Localização aproximada da área investigada e as posições finais dos seis alinhamentos geoeletricos (linhas em vermelho) e sísmicos (linhas em azul) executados nesta campanha.

A Figura 10 apresenta o perfil geotécnico mais representativo da transição entre solo residual e maciço rochoso no local. As rochas graníticas de textura fanerítica com graus variáveis de intemperismo, apresentam espaçamentos entre descontinuidades decimétricos a métricos. Esses espaçamentos favorecem processos de esfoliação esferoidal, resultando em blocos de rocha. A porção superior do maciço apresenta uma zona de transição solo-rocha que pode ser classificada pedogeneticamente como horizonte C a saprolítico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), ou como material de segunda ou terceira categoria, conforme DNIT (2009), sendo essa classificação aplicada com base na dificuldade de escavação.

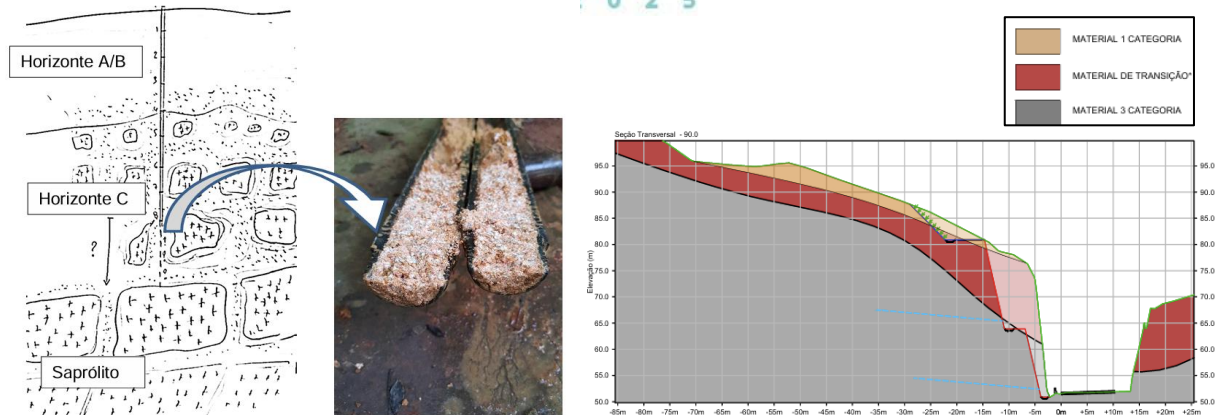


Figura 10: Modelo geotécnico interpretativo do perfil do maciço, representando a evolução do intemperismo dos granitos locais, com identificação dos horizontes pedogenéticos (A/B, C e saprólito) e classificação por categorias de escavação conforme a DNIT 106/2009 – ES. A seção apresentada à direita foi obtida com base na interpretação de dados de geofísica e sísmica de refração e indica a profundidade estimada das diferentes camadas.

4 ALTERNATIVAS PROPOSTAS

Com base nas informações disponíveis foram avaliadas duas soluções diferentes (apresentadas na Figura 11): a primeira com retaludamento utilizando 2 patamares em rocha e a segunda com retaludamento parcial, contemplando um patamar e eventualmente chumbamento de maciços instáveis localizados, de acordo com as diretrizes para taludes em rocha de Hoek & Brown (1997).

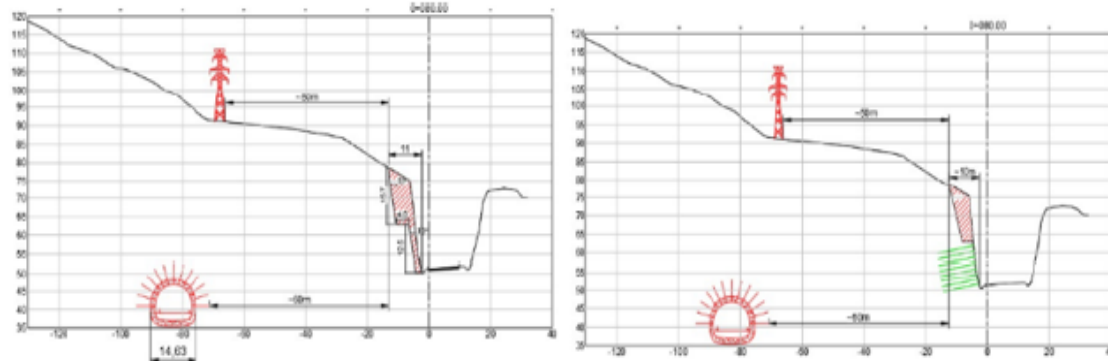


Figura 11: Soluções propostas para a estabilização do talude.

Nos casos de altura menor que 12,50 m pode ser realizado apenas uma bancada, alturas maiores que essa, a indicação é de no mínimo duas bancadas, conforme pode ser visto na Figura 12.



Figura 12: Perfil das Bancadas e dos Cortes no Terreno.

Para a solução proposta, foi realizada uma simulação da queda de blocos a partir da crista do talude, com base em parâmetros de restituição e energia de impacto conforme recomendações de Dorren (2003), com o objetivo de avaliar os riscos associados à instabilidade superficial decorrente da variabilidade do maciço. A análise considerou dois cenários: o desprendimento de blocos pequenos (até 70 cm) e de blocos grandes (até 2,0 m), utilizando coeficientes de restituição de rocha e considerando a geometria do talude em bancadas com inclinação de 5°. Em ambos os casos, os blocos simulados - incluindo um bloco de 1 tonelada com 73 cm de dimensão e outro de 21,6 toneladas deslocado 1 m da crista - foram contidos nos patamares intermediários. A



energia de impacto máxima estimada foi de 280 kJ. Com base nos resultados, concluiu-se que uma barreira rígida de 1,00 m nos patamares é suficiente para reter os fragmentos, sendo a vala na base do talude eficaz como bacia de amortecimento. Assim, a recomendação é que dispositivos adicionais de contenção, como barreiras rígidas junto à pista, sejam implementados apenas em caso de insucesso da geometria proposta. Antes disso, medidas como limpeza, bate-choco, grampeamentos localizados e estabilização superficial com grama e solo podem ser adotadas como ações complementares.

5 CONCLUSÃO

A estabilização do talude rochoso no km 337 da BR-101/SC exigiu uma abordagem integrada, em função do maciço intensamente fraturado e do intemperismo variável. O diagnóstico geotécnico, com apoio de investigações diretas e geofísicas, identificou o tombamento planar e cunha como principal mecanismo de instabilidade, descritos por Hoek & Bray (1981) como sendo os principais mecanismos de instabilidades em taludes rochosos. A solução executiva incluiu reperfilamento em bancadas, drenagem profunda, grampeamentos e uso pontual de telas metálicas. Simulações de queda de blocos auxiliaram na definição de medidas complementares de contenção. O caso reforça a importância da compatibilização entre características geológicas, modelagem geotécnica e limitações operacionais para garantir a segurança e funcionalidade da infraestrutura rodoviária.

AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem a CCR Via Costeira e a equipe da SF Engenharia Diferenciada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (2022). Mapa *Geológico do Estado de Santa Catarina* – escala 1:500.000. Brasília: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Disponível em: <https://geoportal.cprm.gov.br>
- Silva, M.A.S., Leites, S.R. & Caruso, Jr. F. 2000. *Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil*. Criciúma, Folha SH.22-X-B. Estado de Santa Catarina. Escala 1:250.000. CPRM, Brasília.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001). NBR 6484. *Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics. (1981). *Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods*. Brown, E.T. (Ed.). Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. Wiley, New York, 240 p.
- Hoek, E.; Bray, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering*. 3rd ed., Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. (2009). *Norma DNIT 106/2009 – ES: Terraplenagem – Cortes: Especificação de Serviço*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, Rio de Janeiro, 17 p.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990) – *Applied Geophysics*, 2nd ed.
- Dorren, L.K.A. (2003) – “A review of rockfall mechanics and modeling approaches”, *Progress in Physical Geography*.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.