



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
MINAS



APLICABILIDADE DE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE PERIGO DE
QUEDA DE BLOCOS ROCHOSOS EM TALUDES RODOVIÁRIOS

ISABELLA MARTINS DE SOUZA VIEIRA

OURO PRETO

2022

ISABELLA MARTINS DE SOUZA VIEIRA

APLICABILIDADE DE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE PERIGO DE
QUEDA DE BLOCOS ROCHOSOS EM TALUDES RODOVIÁRIOS

Monografia apresentada ao curso de
Engenharia de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito
para obtenção do título de bacharelem
Engenharia de Minas.

Orientadora: Tatiana Barreto dos Santos

OURO PRETO

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V658a Vieira, Isabella Martins de Souza.

Aplicabilidade de metodologias para análise de perigo de queda de blocos rochosos em taludes rodoviários. [manuscrito] / Isabella Martins de Souza Vieira. - 2022.

75 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Tatiana Barreto dos Santos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 2. Geotecnia. 3. Geodinâmica. 4. Risco geotécnico. I. Santos, Tatiana Barreto dos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.131.54

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Isabella Martins de Souza Vieira

Aplicabilidade de metodologias para análise de perigo de queda de blocos rochosos em taludes rodoviários

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 01 de dezembro de 2022

Membros da banca

Dr^a Tatiana Barreto dos Santos - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Daniel Silva Jaques - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr^a Larissa Regina Costa Silveira - Universidade Federal da Bahia

Tatiana Barreto dos Santos, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Barreto dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/12/2022, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0440967** e o código CRC **E01AE3D2**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me permitir superar todos os obstáculos encontrados ao longo da graduação e na realização desse trabalho.

A minha mãe Elizabeth pelo apoio incondicional, por não medir esforços para as minhas conquistas e por trilharmos esse caminho juntas. Ao meu pai, Wagner, por acreditar e confiar em mim, sempre me fazendo uma pessoa melhor.

Às famílias Martins de Souza e Vieira, principalmente minha dinda Simone e tia Vivian, por sempre me incentivarem nos momentos difíceis e sempre entenderem minha ausência quando foi necessário. Já dizia Isaac Newton: “se eu vi mais longe, foi porque estava sobre os ombros de gigantes”.

Ao Mateus, pelo incentivo, apoio, paciência e por ser abrigo nos momentos de incertezas e ansiedade. Esse trabalho tem muito de você. Obrigada por tanto.

À UFOP pelo ensino público de qualidade e ao DEMIN por todas as oportunidades concedidas. A Eng. De Minas 17.1 pela amizade, auxílio, e ferração durante esses anos. Vocês foram fundamentais.

À minha orientadora, Tati, que em meio ao caos, me deu a mão e me orientou durante o desenvolvimento desse trabalho. Obrigada pelo conhecimento compartilhado e pelo exemplo de pessoa e profissional.

Agradeço à Ouro Preto e a todas amigadas que essa cidade me deu, em especial à minha casa, República MM's, onde conheci as melhores pessoas, que compartilharam a vida comigo e que mesmo de longe, me incentivaram a concluir esse trabalho.

RESUMO

As rodovias brasileiras, devido à sua proximidade com os maciços rochosos, encontram-se suscetíveis a eventos como a queda de blocos. Esses maciços podem ser heterogêneos e descontínuos e podem gerar riscos geotécnicos. A fim de evitar a exposição dos usuários das rodovias aos perigos relacionados a esses eventos, é necessário conhecer os locais onde o maciço possa ser potencialmente instável e investigá-los. Para isso, foram desenvolvidos sistemas de classificação para a análise de perigo de queda de blocos de fácil aplicabilidade, que visam identificar e classificar locais de perigo, onde demandam intervenções urgentes ou estudos detalhados. O presente trabalho busca comparar a aplicabilidade de metodologias de análise de perigo de queda de blocos propostas na literatura em um talude localizado na Rodovia dos Inconfidentes - BR356, próximo à cidade de Itabirito, Minas Gerais. As metodologias escolhidas foram o Rockfall Hazard Rating System (RHRS), Colorado Rockfall Hazard Rating System (CRHRS) e a adaptação proposta por Gomes (2009) para rodovias capixabas. O objetivo é analisar se as metodologias propostas são eficazes para o talude rodoviário em estudo. Dessa forma, foram necessárias consultas à literatura e levantamentos de campo, uma vez que a probabilidade de ruptura em taludes rochosos está relacionada às características da rocha intacta e das descontinuidades presentes nos maciços rochosos. A escolha do talude se deu por meio de observações, pois é um talude aparentemente susceptível ao evento de queda de blocos e que pode trazer consequências graves como acidentes materiais e/ou físicos. Foram levantadas as características geológicas-geotécnicas do talude e também do trecho da rodovia onde ele se localiza, apesar das dificuldades técnicas encontradas. Assim, os parâmetros de cada metodologia foram pontuados de acordo com os dados obtidos. Essa pontuação determinou o fator/índice de queda de blocos, que auxilia na mitigação dos riscos do talude. O CRHRS recebeu um valor muito mais alto quando comparado às outras metodologias e isso é reflexo do aumento do número de parâmetros analisados, além de considerar uma pontuação exclusiva para a matriz rochosa e outra para as descontinuidades, enquanto os outros métodos consideram apenas o bloco “características geológicas”. Apesar do CRHRS ser menos subjetivo, o método de melhor aplicabilidade em vista do contexto aplicado é a metodologia proposta por Gomes (2009), uma vez que é um método que destaca a importância das características do maciço rochoso mas permanece enxuto e de fácil execução. Além disso, foi possível propor medidas mitigadoras para as situações encontradas.

Palavras-chave: taludes rodoviários; risco geotécnico; quedas de blocos.

ABSTRACT

Brazilian highways, due to their proximity to rock masses, are susceptible to events such as rockfalls. These masses can be heterogeneous and discontinuous and can result in geotechnical risks. In order to avoid exposing road users to the hazards related to these events, it is necessary to know where the rock mass can be potentially unstable and investigate them. For this, classification systems were developed, aiming to identify and classify places of danger, which demand urgent interventions or detailed studies. This project seeks to compare the applicability of methodologies for analyzing the danger of rockfalls proposed in the literature on a slope located on Rodovia dos Inconfidentes - BR356, near the city of Itabirito, Minas Gerais. The methodologies chosen were the Rockfall Hazard Rating System (RHRS), Colorado Rockfall Hazard Rating System (CRHRS) and the adaptation proposed by Gomes (2009) for Espírito Santo highways. The objective is to analyze whether the proposed methodologies are effective for the road slope under study. Therefore, it was necessary to consult the literature and field investigations, since the probability of failure in rocky slopes is related to the characteristics of the intact rock and the discontinuities present in the rock masses. The choice of slope was made through observations as it is a slope apparently susceptible to the event of rockfall and which can have serious consequences such as material and/or physical accidents. The geological-geotechnical characteristics of the slope and also of the stretch of the highway where it is located were surveyed, despite the technical difficulties. Thus, the parameters of each methodology were scored according to the data obtained. This score determined the rockfall index, which helps to mitigate slope risks. The CRHRS received a much higher value when compared to the other methodologies and this is a reflection of the increase in the number of parameters analyzed, in addition to considering an exclusive score for the sound rock and another for the discontinuities, while the other methods consider only the block "geological features". Although the CRHRS is less subjective, the method with the best applicability in view of the context applied is the methodology proposed by Gomes (2009), since it is a method that highlights the importance of the characteristics of the rock mass but remains dry and easy to perform. In addition, it was possible to propose mitigating measures for the situations encountered.

Keywords: road slopes; geotechnical risk; rockfall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características das descontinuidades (Adaptado de ISRM, 1981).	17
Figura 2 - Perfis de rugosidade para determinação de coeficiente de rugosidade (Barton e Choubey, 1977).	19
Figura 3 - Trajetória de queda de blocos em taludes (GOMES, 2009 adaptado de RITCHIE, 1963).	23
Figura 4 - Causas básicas para queda de blocos (SILVEIRA, 2017 adaptado de CARVALHO, 1991).	25
Figura 5 - Modelo de queda livre do bloco (adaptado de FU et. al, 2020).	25
Figura 6 - Sistema de gestão de risco (adaptado de STANDARDS AUSTRALIA, 2004).	28
Figura 7 - Ábaco de Ritchie, 1969 (GOMES, 2009 adaptado de FHWA, 1989).	31
Figura 8 – Ábaco de de Maerz et al. (2005) para pontuação referente ao ângulo médio de inclinação. (adaptado de Santi et al., 2009)	35
Figura 9 - Classificação de feições de lançamento (modificado de Russel et al., 2008).	36
Figura 10 - Classificação de amostras de rochas submetidas ao Jar Slake (adaptado de Russel et al., 2008)	39
Figura 11 - Mapa geológico simplificado do QF com as associações de litofácies do Supergrupo Rio das Velhas (modificado de Baltazar & Zucchetti, 2005).	50
Figura 12 - Localização do talude escolhido para análise via Google Earth.	Erro!
Indicador não definido.	
Figura 13 - Amostra de mão do granitoide em estudo.	56
Figura 14 - Famílias de descontinuidades do talude dadas pelo Dips.	58
Figura 15 - Descontinuidades em evidência no talude em estudo.	59
Figura 16 - Famílias de descontinuidades do talude rochoso.	60
Figura 17 - Ábaco de Maerz et al. (2005) para dados do talude.	65
Figura 18 - Ábaco de Ritchie para dados do talude.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grau de resistência das rochas (Adaptado de ISRM, 1981).....	16
Tabela 2 - Classificação do espaçamento médio das descontinuidades (ISRM, 1983)..	18
Tabela 3 - Classificação da persistência (ISRM, 1983).....	19
Tabela 4 - Classificação da abertura das descontinuidades (ISRM, 2007).	20
Tabela 5 - Tabela 5 - Classificações de movimentos de massa (AUGUSTO FILHO, 1992).....	21
Tabela 6 - Classificação do movimento de massa segundo VARNES (1978) adaptado por GOMES (2009).	22
Tabela 7 - Categorias e pontuações do sistema RHRS (Pierson et al, 1990).	29
Tabela 8 - CRHRS modificado.....	33
Tabela 9 - Eficácia da área de captação quanto a forma da vala (adaptado de Santi et al. 2009).....	37
Tabela 10 - Equações adotadas para cada parâmetro quantitativo avaliado na metodologia de GOMES, 2009.	43
Tabela 11 - Proposta de classificação para taludes rochosos em rodovias do Espírito Santo (GOMES, 2009).	44
Tabela 12 - Fatores de correção para cálculo do SMR (Romana, 1985).....	47
Tabela 13 - Classificação da condição das descontinuidades - RMR (Bieniawski, 1989)	48
Tabela 14 - Distância de visibilidade requerida de acordo com os limites de velocidade da via (Pierson e Van Vickle, 1993).....	53
Tabela 15 - Resistência à compressão uniaxial estimada a partir do teste do martelo de geólogo	57
Tabela 16 - Resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial pelo ensaio do Esclerômetro de Schmidt.....	58
Tabela 17 - Orientação média das famílias de descontinuidades.	59
Tabela 18 - Condição das descontinuidades no talude.	60
Tabela 19 – Parâmetros utilizados para pontuação utilizando o RHRS original.....	62
Tabela 20 - Pontuação final para o talude de acordo com o RHRS original.	63
Tabela 21 - Parâmetros utilizados para pontuação utilizando o CRHRS.....	64
Tabela 22 - Resultados obtidos para área de captação.	65
Tabela 23 - Pontuação final para o talude de acordo com o CRHRS.....	66
Tabela 24 - Resultados RMR e SMR.	67
Tabela 25 - Pontuação final para o talude de acordo com o Gomes (2009).....	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	14
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1 Maciços rochosos.....	14
4.1.1 Definições e considerações gerais	14
4.1.2 Rocha intacta	15
4.1.3 Descontinuidades	17
4.2 Movimento de massa	20
4.2.1 Queda de blocos.....	22
4.2.2 Mecânica de ruptura da queda de blocos	24
4.3 Análise de risco geotécnico	26
4.3.1 Conceitos e definições	26
4.3.2 Gestão de risco.....	27
4.4 Sistemas de avaliação de perigo de queda de blocos.....	29
4.4.1 Avaliação do perigo de queda de blocos – Rockfall Hazard Rating System	29
4.4.2 Colorado Rockfall Hazard Rating System – CRHRS.....	32
4.4.2.1 Taludes	34
4.4.2.2 Características geológicas	38
4.4.2.3 Tráfego.....	42
4.4.3 Adaptação do método RHRS por GOMES (2009).....	42
4.4.3.1 Classificação SMR e RMR	46
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
5.1 Localização e descrição do talude	49
5.2 Levantamentos de campo.....	51
5.3 Análise de perigo de queda de blocos.....	52
5.3.1 RHRS	52
5.3.2 CRHRS	54
5.3.3 GOMES (2009).....	55
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56

6.1 Características geológico-geotécnicas do talude	56
6.1.1 Estimação da resistência da rocha intacta.....	57
6.1.2 Definição das famílias de descontinuidades	58
6.2 Análise de perigo de queda de blocos.....	60
6.3.1 RHRS	61
6.3.2 CRHS	63
6.3.3 GOMES (2009).....	67
6.3 Comparativo da aplicabilidade das metodologias utilizadas	68
7 CONCLUSÃO.....	70
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Risco é uma medida da probabilidade de um evento ocorrer, considerando sua gravidade. Ele pode ser estimado como o produto “probabilidade x consequência” (FELL et al., 2008). Por sua vez, probabilidade é uma medida do grau de certeza de um determinado evento acontecer, obtida a partir de descrições qualitativas e/ou quantitativas. Infelizmente, toda atividade humana está inerente ao risco, seja ele associado a acidentes domésticos, industriais e de circulação de veículos, perigos naturais (terremotos, deslizamentos de terra e furacões), falhas de estruturas e falha de sistemas de engenharia.

As rodovias brasileiras encontram-se suscetíveis a eventos relacionados aos movimentos de massa, devido estarem localizadas ao lado de maciços rochosos. Esses maciços quando heterogêneos e descontínuos podem gerar riscos geotécnicos. Os riscos envolvem não somente danos físicos às cidades ou rodovias, mas coloca em risco a população que trafega por essas zonas e podem causar diversos problemas indiretos, como a interrupção das conexões entre locais distintos. Portanto, controlar a o risco de rupturas em taludes rochosos é uma preocupação em taludes urbanos, rodoviários e de mina (SANTOS, 2015).

Fatores como presença de descontinuidades, relevo acidentado como o da cidade de Ouro Preto e clima tropical úmido, além de facilitar processos erosivos, favorecem a ação do intemperismo, que contribui para a alteração dos maciços rochosos. Essas características, quando combinadas, podem levar a problemas geotécnicos como a queda de blocos (SILVEIRA, 2017).

Queda de blocos é um termo que se refere ao movimento abrupto de blocos rochosos ao longo de uma encosta, que se dão principalmente por queda livre, saltando, rolando ou deslizando (BOZZOLO & PAMINI, 1986; VARNES, 1978). É um processo complexo, de difícil previsibilidade, pois ocorrem de forma repentina e indícios de movimentação prévia não são percebidos. Esse tipo de ruptura pode ter alto poder destrutivo, devido à energia desenvolvida durante o movimento do bloco rochoso. Assim, faz-se ainda mais necessário o estudo desse movimento de massa a fim de mitigar os riscos e evitar maiores transtornos.

Esse trabalho de conclusão de curso apresenta a aplicabilidade e a comparação de diferentes metodologias para a análise de perigo de queda de blocos em um talude rochoso

situado na Rodovia dos Inconfidentes - BR356, que liga Ouro Preto à Belo Horizonte, próximo à cidade de Itabirito, no estado de Minas Gerais. As metodologias utilizadas para análise baseiam-se em sistemas de análise risco de queda de blocos propostos na literatura, a saber: Rockfall Hazard Rating System (RHRS) e suas variantes, o Colorado RHRS e uma adaptação proposta por Gomes (2009) para as rodovias do Estado do Espírito Santo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em comparar as análises do perigo de queda de blocos em um talude situado na Rodovia dos Inconfidentes - BR356, que liga Ouro Preto à Belo Horizonte, próximo à cidade de Itabirito, no estado de Minas Gerais, através do método RHRS e suas variantes: Colorado RHRS e a adaptação RHRS proposta por GOMES (2009).

2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos tem-se:

- realizar levantamento geológico-geotécnico do maciço rochoso a fim de determinar parâmetros para sua caracterização;
- realizar avaliação geométrica e de trafegabilidade da rodovia;
- estimar o perigo de queda de blocos com base na metodologia de RHRS e suas variantes: Colorado RHRS e a adaptação RHRS proposta por GOMES (2009);
- comparar os resultados de perigo de queda de blocos obtidos e avaliar a aplicabilidade.

3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A malha rodoviária brasileira está inserida num ambiente geológico bastante heterogêneo, onde as rodovias transpõem, por vezes, maciços rochosos diversos e descontínuos, com características geotécnicas muitas vezes desconhecidas ou incertas (GOMES, 2009). Entretanto, não existe um órgão responsável pelo levantamento desses maciços quanto sua estabilidade e nenhuma norma específica que aborde esse problema. Dessa forma, o estudo a seguir é de suma importância para o conhecimento das características do talude que se encontra na rodovia e para o conhecimento de como ele pode afetar a segurança dos usuários que ali trafegam.

Além disso, a análise de perigo da queda de blocos previamente realizada auxilia na gestão de projetos e riscos do ambiente, permitindo que medidas sejam tomadas de forma a evitar grandes transtornos. Portanto, conhecer e aplicar as metodologias que analisam esse movimento de massa se torna cada vez mais importante, uma vez que aumenta a segurança física do usuário e fornece informações para que sejam feitas intervenções nos locais de maior perigo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Maciços rochosos

4.1.1 Definições e considerações gerais

Por maciço rochoso entende-se uma massa de rocha interrompida por discontinuidades, constituída de blocos discretos, estes últimos com propriedades de rochas intactas; rocha intacta é uma designação aplicada a rochas que não apresentam discontinuidades ou planos de fraqueza (FIORI & CARMIGNANI, 2013). Em geral, as propriedades das discontinuidades são mais importantes quando comparadas às características da rocha intacta, devido à sua maior influência na resistência, deformabilidade e estabilidade do maciço rochoso.

Quanto à uma de suas classificações, os maciços podem ser classificados como competentes ou brandos. Os maciços competentes têm alta resistência mecânica e normalmente apresentam uma certa facilidade no levantamento de suas propriedades,

facilitando a aplicação das classificações geomecânicas e estimação de parâmetros. No entanto, os maciços brandos apresentam baixa resistência mecânica, na faixa de 0,5 a 25 MPa (ISRM,1981), o que gera dualidade rocha-solo a depender das condições de alteração, e grande dificuldade no levantamento de suas propriedades (SANTOS, 2015).

Conhecer as características principais das discontinuidades e da rocha intacta que compõem o maciço rochoso são de suma importância para compreender possíveis mecanismos de ruptura e conhecer sua condição de estabilidade.

4.1.2 Rocha intacta

De acordo com Hudson e Harrison (1997), a rocha intacta é definida em termos de engenharia como rocha que não contém fraturas significativas. No entanto, em pequena escala é composto de grãos com a forma da microestrutura sendo governada pelos processos básicos de formação de rochas.

A rocha intacta pode ser classificada por meio de sua resistência e grau de intemperismo. Para se obter a resistência de rochas intactas, são realizados ensaios laboratoriais, como o teste de resistência à compressão uniaxial, ou testes de campo, como o teste do martelo do geólogo e Esclerômetro de Schmidt.

O teste de resistência à compressão uniaxial da rocha intacta fornece o parâmetro quantitativo. É um teste bastante utilizado e fornece, como resultado principal, a resistência à compressão não confinada (σ_c). Nesse ensaio, obtêm-se a relação tensão-deformação do material, a partir das medidas do carregamento aplicado ao corpo de prova e as deformações tanto axiais quanto radiais. Em geral, são usados corpos de prova cilíndricos devido a sua fácil confecção e axissimetria (VITALI et al, 2012).

O Esclerômetro de Schmidt é um equipamento inicialmente criado para medir resistência de corpos de prova de concreto, que foi adaptado para medir também a resistência de rochas. Entretanto, para que se possa obter a resistência a compressão uniaxial da rocha intacta através desse método, é necessário correlacionar a média da dureza de Schmidt dado pelo equipamento à alguma equação proposta na literatura, que seja associada a litologia da rocha intacta em estudo. Esse fato pode se tornar um impeditivo, uma vez que nem todo tipo litológico possui uma equação apropriada e

algumas equações existentes podem ser usadas para vários tipos litológicos, o que pode tornar a análise subjetiva (SILVEIRA, 2017).

Por fim, o teste do martelo de geólogo consiste em análises simples, com instrumentos tipicamente utilizados em trabalhos de campo, para se obter uma estimativa de faixas de resistência a compressão uniaxial da rocha intacta. Devido à sua maior facilidade de realização, ele será o método utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho. A Tabela 1 apresenta as informações que devem ser coletadas em campo para execução do teste e classificação da rocha intacta quanto ao seu grau de resistência.

Tabela 1 - Grau de resistência das rochas (Adaptado de ISRM, 1981).

Grau	Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
R0	Solos estruturados e rijos à rochas muito brandas	Penetrada pela ponta do dedo polegar; moldada pelas mãos; facilmente penetrada pelo canivete e martelo de geólogo; escavada por equipamento manual	0,25 – 1,0
R1	Rochas muito brandas	Esmigalha-se facilmente sob o impacto de martelo de geólogo; riscada facilmente pela ponta fina do martelo de geólogo; riscada e raspada facilmente pelo canivete; deslocamentos ao longo da foliação sob pressão dos dedos; bordas dos fragmentos facilmente quebradas pela pressão dos dedos; pequenos fragmentos (2 X 2 X 2 cm) não quebram sob pressão dos dedos; escavação mecanizada	1,0 – 5,0
R2	Rochas brandas	Quebra-se sob único impacto do martelo; cavidade rasa sob impacto firme da ponta fina do martelo de geólogo; as bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos; a lâmina do canivete provoca sulco acentuado na superfície do fragmento; podem ser raspadas pelo canivete; escavação por equipamentos mecanizados, exigindo em alguns casos, fogo de afrouxamento do maciço.	5,0 – 25,0
R3	Rochas mediamente resistentes	Espécimes de mão podem ser quebrados sob poucos golpes firmes do martelo de geólogo; bordas finas dos fragmentos podem ser quebradas pelas mãos com certa dificuldade; superfície pouco riscável por lâmina de aço; não pode ser raspada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	25,0 – 50,0
R4	Rochas resistentes	Espécimes de mão requerem alguns golpes do martelo para serem quebrados; bordas dos fragmentos dificilmente quebradas pelas mãos; superfície dificilmente riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	50,0 – 100,0
R5	Rochas muito resistentes	Espécimes de mão requerem muitos golpes do martelo para serem quebrados; fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço; superfície praticamente não riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	100,0 – 250,0
R6	Rochas extremamente resistentes	Espécimes somente lascados com o uso do martelo	>250,0

4.1.3 Descontinuidades

Segundo Fiori (2016), as descontinuidades são planos de fraqueza presentes nas rochas, ao longo dos quais o material rochoso é estruturalmente descontínuo e apresenta menor resistência ao cisalhamento em relação à rocha intacta, fazendo com que as rupturas tendam a ocorrer preferencialmente ao longo delas. As descontinuidades mais comumente encontradas nos maciços rochosos são falhas, juntas, foliações metamórficas e contatos litológicos.

Os maciços rochosos são materiais que foram submetidos, naturalmente, por um longo período de tempo, a processos mecânicos, térmicos e químicos. É devido a esses processos que surgem as descontinuidades, que tem sua ocorrência ligada à eventos geológicos e mudanças no estado de tensão ao qual a rocha está submetida. Esse processo de formação implica também na mudança das propriedades geométricas e mecânicas do maciço rochoso, sendo necessário entendê-los a partir de sua geologia estrutural (FIORI & CARMIGNANI, 2009).

No contexto estudado, as descontinuidades têm um importante papel na deformabilidade, resistência e permeabilidade do maciço rochoso e, de acordo com ISRM (1981), as principais características das descontinuidades, que alteram o comportamento geotécnico dos maciços rochosos são a orientação, o espaçamento, a persistência, a rugosidade, o preenchimento e a abertura, que podem ser vistos na Figura 1 abaixo.

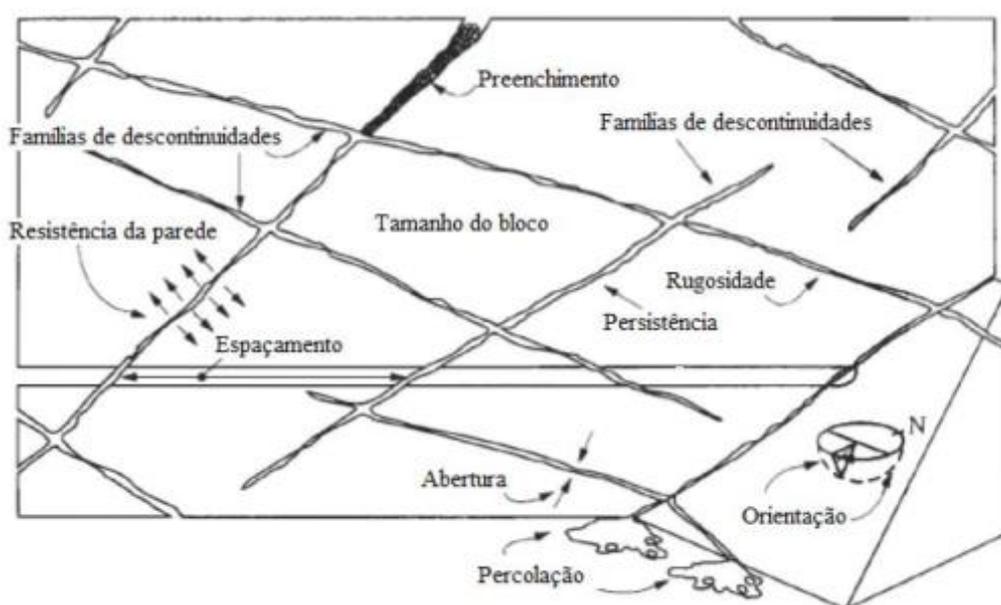


Figura 1 - Características das descontinuidades (Adaptado de ISRM, 1981).

Como são características fundamentais que regem o comportamento dos maciços rochosos, esses termos serão conceituados abaixo, de acordo com Fiori e Carmignani (2009):

- **Orientação:** é expressa em termos de direção de mergulho e mergulho da descontinuidade, e são tomadas com auxílio de uma bússola. A orientação juntamente com o espaçamento das famílias de juntas determinam a forma dos blocos individuais que formam o maciço rochoso e seus modos de ruptura.
- **Espaçamento:** é dado pela distância entre descontinuidades, sendo as distâncias tomadas geralmente ao longo de linhas de varredura. Quando os espaçamentos são muito densos, o maciço adquire um comportamento mais próximo ao de materiais granulares. Já quando os espaçamentos são grandes, o comportamento do maciço rochoso é fortemente influenciado pelas propriedades da rocha intacta, o que tende a refletir um maciço rochoso de melhor qualidade geomecânica. A classificação descritiva do espaçamento médio é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do espaçamento médio das descontinuidades (ISRM, 1983).

Termo	Espaçamento (mm)
Extremamente pequeno	< 20
Muito pequeno	20 – 60
Pequeno	60 – 200
Moderado	200 – 600
Grande	600 – 2.000
Muito grande	2.000 – 6.000
Extremamente grande	>6.000

- Persistência: é o comprimento do traço da descontinuidade. Este comprimento pode ser classificado de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da persistência (ISRM, 1983).

Termo	Persistência (m)
Muito pequena	< 1
Pequena	1,0 – 3,0
Média	3,0 – 10,0
Grande	10,0 – 20,0
Muito grande	>20,0

- Rugosidade: quantifica as ondulações presentes nas paredes das descontinuidades abertas, sendo uma característica potencialmente importante no comportamento de sua resistência ao cisalhamento. Essa importância diminui à medida que se aumenta a abertura da descontinuidade e a espessura do material de preenchimento. Medidas visuais de perfis de rugosidade em juntas foram propostas por Barton e Choubey, em 1977 e estão apresentadas na Figura 2.

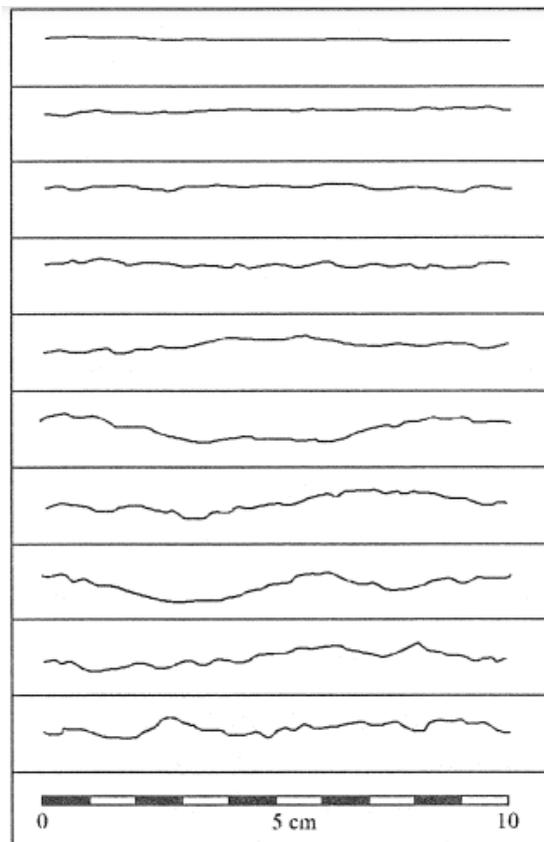


Figura 2 - Perfis de rugosidade para determinação de coeficiente de rugosidade (Barton e Choubey, 1977).

- **Abertura:** é a distância entre as paredes de uma mesma descontinuidade. Caso haja essa abertura, pode haver percolação de água, alteração das paredes e preenchimento, influenciando na resistência ao cisalhamento do maciço rochoso. É usualmente maior junto à superfície do terreno e torna-se menor à medida em que aumenta a profundidade. A classificação da abertura das descontinuidades é dada pela Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação da abertura das descontinuidades (ISRM, 2007).

Termo	Abertura (mm)
Muito fechada	< 0,1
Fechada	0,1 – 0,25
Parcialmente fechada	0,25 – 0,5
Aberta	0,5 – 2,5
Larga	2,5 – 10
Muito larga	10 – 100
Extremamente larga	100 – 1.000
Cavernosa	>1.000

- **Preenchimento:** o espaço entre as descontinuidades pode estar vazio, parcialmente preenchido ou completamente preenchido. O material que o preenche pode ser argila, silte, areia ou material grosseiro, que tipicamente apresentam grandes variações nas características mecânicas, mas no geral, apresentam baixa resistência ao cisalhamento.

4.2 Movimento de massa

Os movimentos de massa podem acontecer devido à presença de descontinuidades, sendo elas o plano preferencial de ruptura, ou também devido às características do maciço rochoso, que pode estar muito alterado e fragmentado, em processo de transformação de rocha para solo, que é conhecido como dualidade rocha-solo (SILVEIRA, 2017).

Esses movimentos correspondem aos mecanismos de transporte de sedimentos, solos ou rochas, que são induzidos pela força gravitacional e pela ação conjunta ou isolada de fatores como a presença de águas superficiais e subterrâneas ou ações antrópicas como desmatamentos, cortes e aterros, entre outras (CREA – PR, 2017). Na área urbana, esses

movimentos são responsáveis por inúmeros problemas, resultando em danos que vão de materiais até mesmo em vítimas fatais.

Augusto Filho (1992) classificou os movimentos de massa mais comuns, de acordo com o movimento, o material e a geometria das encostas ou taludes em que ocorrem. Essa classificação pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificações de movimentos de massa (AUGUSTO FILHO, 1992).

Processos	Características do Movimento, Material e Geometria
Rastejo (“creep”)	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solos, depósitos, rocha alterada/fraturada • Geometria indefinida
Escorregamentos (“slides”)	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) • Pequenos a grandes volumes de material • Geometria e materiais variáveis <p>Planares ⇒ solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Circulares ⇒ solos espessos, homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha ⇒ solos e rochas com dois planos de fraqueza</p>
Quedas (“falls”)	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamento • Movimentos tipo de queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Pequenos a médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. • Rolamento de matacão • Tombamento
Corridas (“flows”)	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias a altas • Mobilização de solo, rocha, detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Segundo Bonuccelli (1999), o primeiro passo para qualquer ação, na tentativa de solucionar ou minimizar os problemas relacionados à ocorrência desses movimentos gravitacionais de massa, deve ser a caracterização desses processos e dos atributos do

meio físico que neles influenciam. Dessa forma, o movimento de massa considerado no presente estudo é descrito como um movimento de queda livre ou em plano inclinado, com velocidade muito alta e geometria variável. Portanto, a partir dessa definição e de posse dos dados relativos à área de estudo, pode-se estabelecer o comportamento do maciço e permitir uma previsão de futuros problemas a partir intervenções.

4.2.1 Queda de blocos

A queda de blocos é definida como um movimento de massa em que blocos de diferentes tamanhos são destacados de uma parede rochosa íngreme ou escarpada (GIANI, 1992). Varnes (1978) classificou os movimentos de massa pelo tipo de movimento e tipo de material (Tabela 6) e dentre essa classificação, ele afirma que as quedas podem ser de materiais rochosos, detritos ou solos.

Tabela 6 - Classificação do movimento de massa segundo VARNES (1978) adaptado por GOMES (2009).

Tipo de movimento			Tipo de material		
			Rocha	Solo (engenharia)	
Quedas			de rochas	de detritos	de solos
Tombamentos			de rochas	de detritos	de solos
Escorregamentos	rotacional	poucas unidades	deslizamento de rochas	deslizamento de detritos	deslizamento de solos
	translacional	poucas unidades	de blocos rochosos	de blocos de detritos	de blocos de solos
		muitas unidades	de rochas	de detritos	de solos
Espalhamentos laterais			de rocha	de detritos	de solos
Escoamentos			de rocha (rastejo profundo)	de detritos (rastejo de solo)	de solos (rastejo de solos)
Complexos: combinação de 2 ou mais dos principais tipos de movimentos					

A queda de blocos um movimento extremamente rápido, geralmente iniciados por algum evento climático ou biológico que causa uma mudança no estado de tensões que atuam sobre o maciço rochoso. Esses eventos podem incluir aumento da poropressão devido à infiltração da água da chuva ou variação do nível do lençol freático, erosão do material durante fortes tempestades, processos de congelamento-degelo em climas frios, degradação química ou intemperismo da rocha e crescimento de raízes vegetais (HOEK, 1998).

De acordo com Ritchie *et al.* (2001), o movimento da queda de blocos pode ocorrer por queda livre, salto, rolamento ou deslizamento. Ainda, segundo o autor, para qualquer forma ou tamanho do bloco rochoso, o modo de deslocamento do bloco pela encosta é função do ângulo de inclinação da face do talude, como mostrado na Figura 3.

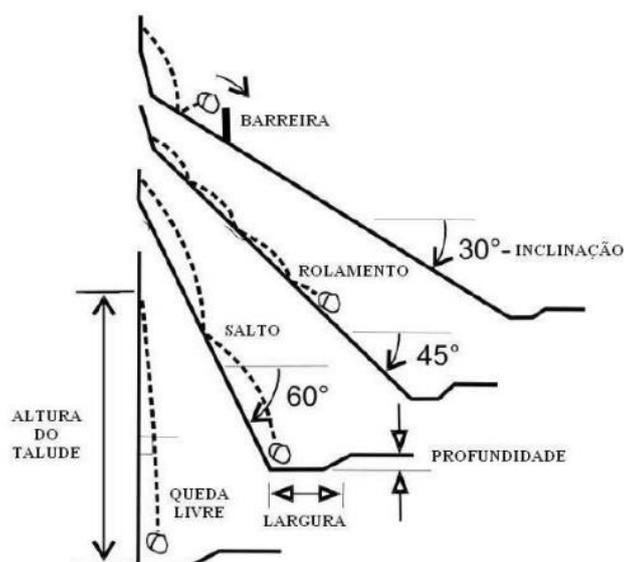


Figura 3 - Trajetória de queda de blocos em taludes (GOMES, 2009 adaptado de RITCHIE, 1963).

Em taludes verticais, geralmente o bloco cai em queda livre e raramente dão um salto alto após o impacto. À medida que o ângulo de inclinação da face do talude diminui, ainda que o movimento inicial seja rolando, o que predomina é o salto, em que o bloco sofre impactos com a superfície do talude. Para ângulos de inclinação mais suaves, o bloco tende a rolar ou deslizar (SILVEIRA, 2017, RITCHIE, 1963).

Hoek (2000) afirma que uma vez iniciado o movimento de um bloco rochoso que se encontra no topo de um talude, o fator mais importante que controla sua trajetória de queda é a geometria do talude. Em particular, a inclinação da face é importante porque atribui uma componente horizontal à trajetória do bloco, fazendo com que elas tenham

maior alcance. As mais perigosas dessas superfícies atuam como “ski-jumps” e conferem uma alta velocidade horizontal à rocha em queda, fazendo com que ela atinja uma distância considerável do pé do talude.

Essa distância, ou alcance, na qual o bloco rochoso tem seu movimento interrompido deve-se também à superfície de impacto. As superfícies com baixo grau de alteração e alta dureza são mais perigosas, uma vez que não retardam o movimento do bloco em nenhum grau significativo. Por outro lado, superfícies cobertas com tálus, seixos ou cascalho absorvem uma quantidade considerável de energia da queda do bloco e, em muitos casos, a interrompem completamente (RITCHIE, 1963).

A capacidade de absorção de energia do material que compõe a superfície é medida por meio de uma variável denominada coeficiente de restituição. Esse coeficiente depende da natureza dos materiais que formam a superfície de impacto. As superfícies com baixo grau de alteração e alta dureza apresentam altos coeficientes de restituição, enquanto solo e cascalho, por exemplo, apresentam baixos coeficientes de restituição.

4.2.2 Mecânica de ruptura da queda de blocos

De acordo com Carvalho (1991) a queda de blocos rochosos pode se dar em duas situações:

- Devido às discontinuidades do maciço rochoso, que propiciam o isolamento de blocos unitários de rocha e devido à pressão através do acúmulo de água nestas discontinuidades ou a presença de raízes nas mesmas.
- Ocorrência em rochas sedimentares, quando camadas mais alteráveis estão intercaladas com camadas menos alteráveis. Nesse caso, as camadas mais alteráveis sofrem o fenômeno de desagregação, provocando o descalçamento de blocos da camada superior, originando blocos de grandes dimensões.

A Figura 4 apresenta as situações acima descritas. A figura 4(A) apresenta blocos delimitados por discontinuidades e potencialmente instáveis e o seu processo de queda. A figura 4(B) apresenta uma situação em que a chuva pode causar erosão de rochas frágeis ou solos, que muitas vezes estão encaixados em rochas mais competentes, o que deixa blocos de rocha livres para se movimentarem (SILVEIRA, 2017).

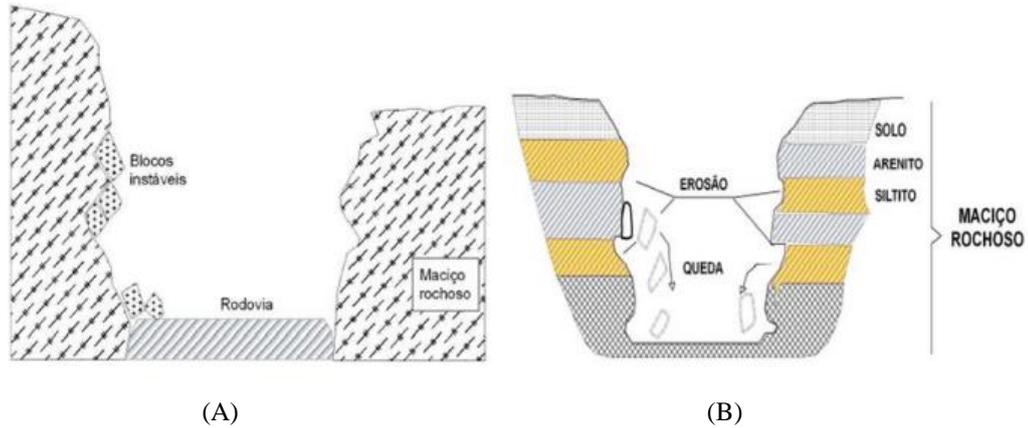


Figura 4 - Causas básicas para queda de blocos (SILVEIRA, 2017 adaptado de CARVALHO, 1991).

Dentre os mecanismos de ruptura que governam a queda de blocos tem-se a queda livre, salto, rolamento ou deslizamento. A queda livre da rocha (Figura 5) está relacionada com a geometria do talude e como ocorre o movimento inicial da queda do bloco. Sob a ação da gravidade, a energia potencial gravitacional da queda de blocos é convertida em energia cinética e, ignorando a resistência do ar, a queda livre pode ser descrita como um simples movimento de arremesso oblíquo, onde a trajetória do bloco é uma parábola entre uma série de pontos de colisão (FU *et. al*, 2020).

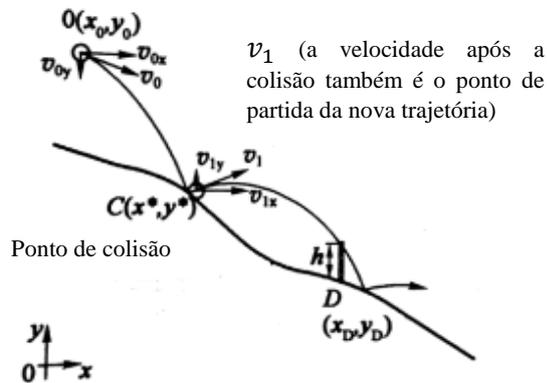


Figura 5 - Modelo de queda livre do bloco (adaptado de FU *et. al*, 2020).

Os saltos ocorrem quando a rocha encontra o talude durante uma queda livre, sendo essa a parte incerta na estimativa da trajetória da queda do bloco. A colisão pode ser elástica ou inelástica, dependendo das propriedades físicas e mecânicas do material, do ângulo de inclinação no momento da colisão, da massa do bloco em queda e da velocidade inicial do bloco. Já o rolamento refere-se ao rolar da rocha ao longo da face do talude e é um movimento visto raramente. Ele está relacionado ao grau de irregularidade do talude, ao tamanho do bloco, à velocidade de deslocamento do bloco e ao atrito entre o bloco e o talude (FU *et. al*, 2020).

Por fim, o deslizamento pode ocorrer no início e no final do movimento de queda de rochas, especialmente em taludes onde a inclinação é plana ou não muito íngreme. O bloco pode deslizar por alguns centímetros a vários metros. Devido à existência de atrito durante o deslizamento, a velocidade da queda de blocos é muitas vezes baixa e a perda de energia é grande. A distinção entre o rolamento e o deslizamento é difícil mesmo quando se observa o deslocamento de um bloco, pois pode ocorrer uma combinação dos dois movimentos. Quando energeticamente possível, o deslizamento se transforma em rolamento (FU *et. al.*, 2020).

4.3 Análise de risco geotécnico

4.3.1 Conceitos e definições

O risco é inerente a qualquer atividade humana e para classificá-los foram propostos diversos conceitos. Entretanto, devido à essa gama de conceitos propostos, é preciso padronizar o seu entendimento para que a análise de risco geológico-geotécnico seja eficaz, evitando más interpretações em pesquisas e projetos.

Fell et al. (2008) define o risco geotécnico como uma medida da probabilidade de ruptura e da gravidade dessa ruptura para a saúde, propriedade ou meio ambiente. O risco é estimado pelo produto da probabilidade x consequências de um fenômeno, dada Equação (1).

$$\text{Risco} = \text{probabilidade de ruptura ou falha (evento)} \times \text{consequência} \quad (1)$$

Além desse termo, os autores propõem as outras definições mostradas a seguir.

- Perigo (hazard): condição com potencial para causar uma consequência indesejável dentro de um determinado período de tempo. Em uma análise de perigo de movimento de massa deve-se incluir a localização, o volume, a velocidade e qualquer material resultante dos potenciais movimentos.
- Elementos em risco: população, infraestruturas, atividades econômicas, serviços públicos e meio ambiente nas áreas potencialmente afetadas pelos movimentos de massa.
- Vulnerabilidade: grau de perda de um determinado elemento ou conjunto de elementos dentro da área afetada pelos movimentos de massa. É expresso em uma

escala de 0 – sem perda a 1 – perda total. Para bens materiais, a perda será o valor do dano relativo ao valor do bem; para pessoas, será a probabilidade de que uma determinada vida (ou elemento em risco) seja perdida.

- Análise de risco: uso de informações disponíveis para estimar o risco de perigos para indivíduos, população, propriedade ou meio ambiente. As análises de risco são divididas em: definição do escopo, identificação do perigo e estimativa do risco.
- Gestão de risco: tomada de decisão para gerenciamento de risco, implementação ou aplicação de medidas de mitigação e a reavaliação de sua eficácia em determinado tempo.

4.3.2 Gestão de risco

Para entender o contexto do gerenciamento de risco geotécnico, pode se fazer uma análise do panorama geral, que quando utilizado da forma correta, se torna uma ferramenta eficaz para a tomada de decisões. Para que isso seja possível, é necessário que haja uma compreensão e percepção detalhada dos riscos envolvidos em uma atividade, a avaliação do risco e seus procedimentos de forma documentada, comunicação e consulta desenvolvidas e, por fim, lideranças que estejam envolvidas suficiente para a implementação da cultura de mitigação dos mesmos.

Na Figura 6 é apresentado um sistema de gestão de risco presente nas normas da AS/NZ 4360 (STANDARDS AUSTRALIA, 2004), em que são consideradas três fases: análise, avaliação e mitigação dos riscos. A figura mostra ainda que comunicação e a consulta são essenciais em todas as etapas do processo e que o monitoramento e a avaliação formam os ciclos do gerenciamento.

Para cada análise é necessário adaptar este procedimento, levando em consideração as características e os fatores especiais envolvidos na gestão de risco. Logo, primeiramente deve-se estabelecer o contexto da análise bem como desenvolver os critérios de risco e a estrutura que serão utilizados. Em seguida, deve-se analisar o risco levantando perguntas como quando, onde e assim, pode-se determinar a probabilidade de ocorrência do evento e suas eventuais consequências. Dessa forma, a análise de risco é concluída.

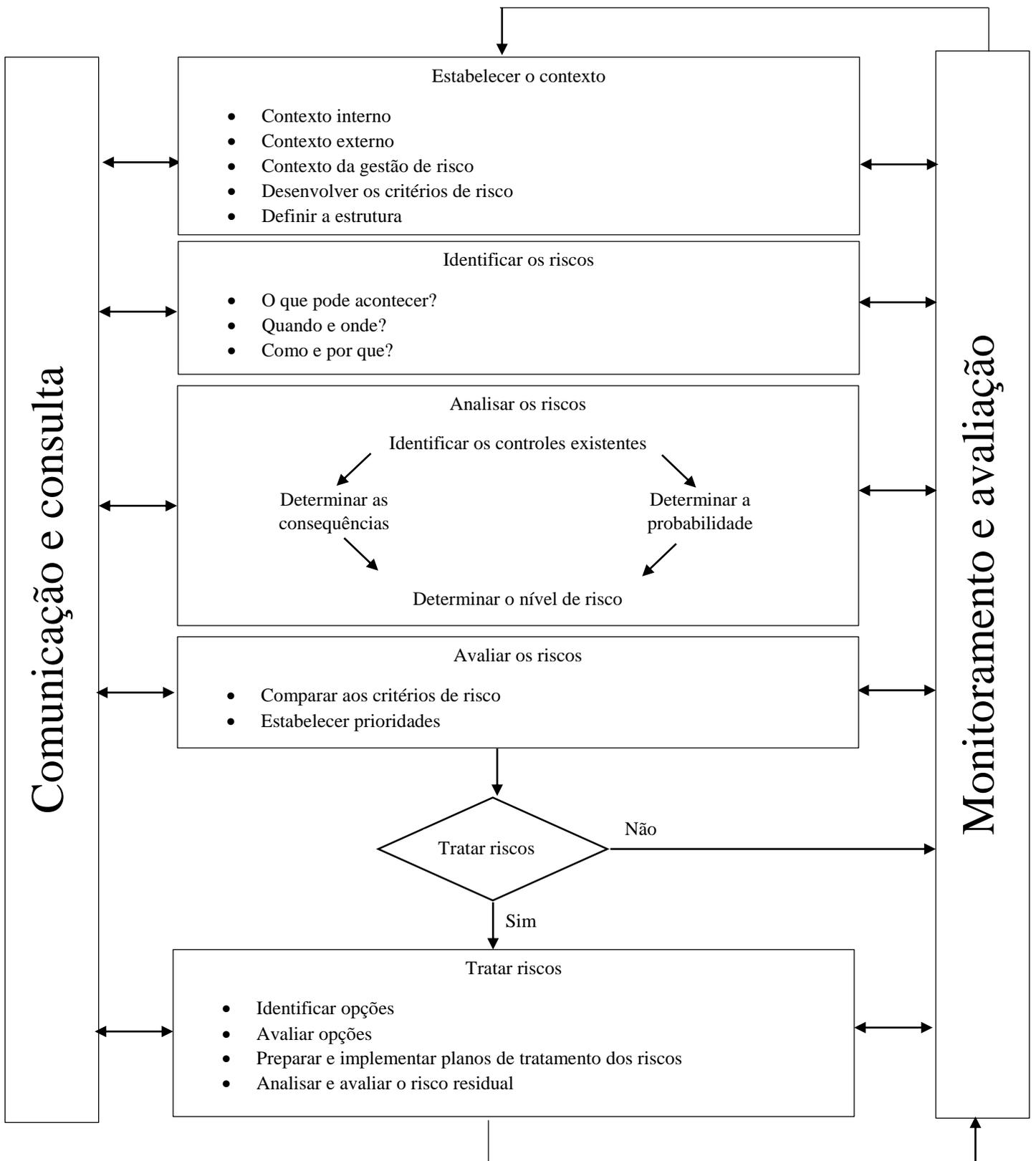


Figura 6 - Sistema de gestão de risco (adaptado de STANDARDS AUSTRALIA, 2004).

Já avaliação dos riscos são comparados os níveis de risco obtidos com os critérios de risco pré-estabelecido, onde toma-se a decisão em relação a quais riscos requerem tratamento e quais são as prioridades. Caso não exijam tratamento os riscos passam a ser monitorados e regularmente avaliados. Na última fase os riscos são tratados e, depois, monitorados e regularmente avaliados. São desenvolvidas e implementadas estratégias

rentáveis e planos de ação para mitigar os riscos. Além disso, é realizado o monitoramento para garantir a eficácia de todas as etapas do processo de gestão de riscos (SANTOS, 2019).

4.4 Sistemas de avaliação de perigo de queda de blocos

4.4.1 Avaliação do perigo de queda de blocos – Rockfall Hazard Rating System

Para a avaliação do perigo de queda de blocos em rodovias, como é o caso do estudo em questão, Pierson *et. al* propôs o Rockfall Hazard Rating System (RHRS). O RHRS é um sistema desenvolvido pela Divisão de Rodovias do Estado de Oregon – Estados Unidos, que visa classificar e identificar encostas que apresentam perigo de queda de bloco rochosos e requerem trabalho de correção urgente ou estudo mais detalhado. Através da implementação do RHRS, a administração das rodovias obtém informações detalhadas que pode ajudá-los a tomar decisões práticas sobre onde alocar dinheiro para projetos de encostas rochosas (PIERSON *et al.*, 1990).

O método avalia o grau de exposição da rodovia quanto ao risco de queda de blocos utilizando parâmetros como: altura do talude, efetividade da área de captação, risco médio ao veículo, distância de visibilidade e tomada de decisão, largura do pavimento, características geológico-estruturais do maciço rochoso, dimensão dos blocos, clima e histórico de queda.

Nessa metodologia, para cada parâmetro atribui-se uma nota de 3 a 81, onde 3 pontos são dados para as situações mais favoráveis à estabilidade e 81 para as mais desfavoráveis. Dessa forma, pode-se diferenciar os taludes com maior potencial de queda e assim hierarquizá-los em ordem de perigo e prioridade. A Tabela 7 mostra como é atribuída as pontuações a cada um dos parâmetros.

Tabela 7 - Categorias e pontuações do sistema RHRS (Pierson et al, 1990).

Categoria	Critérios e pontuação			
	3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Altura do talude	7,5m	15,0m	22,5m	30m
Efetividade da área de captação	Boa captura	Captura moderada	Captura limitada	Sem captura
Risco médio ao veículo	25% do tempo	50% do tempo	75% do tempo	100% do tempo

Porcentagem da distância de visibilidade			100% Distância de visibilidade adequada	80% Distância de visibilidade moderada	60% Distância de visibilidade limitada	40% Distância de visibilidade muito limitada
Largura da rodovia			13,2 m	10,8 m	8,4 m	6,0 m
Característica geológica	Classe 1	Condição estrutural	Fraturas descontínuas, com orientação favorável	Fraturas descontínuas, com orientação aleatória	Fraturas descontínuas, com orientação adversa	Fraturas contínuas, com orientação adversa
		Atrito nas discontinuidades	Rugoso, irregular	Ondulado	Planar	Preenchimento argiloso ou polido
	Classe 2	Condição estrutural	Poucas feições de erosão diferencial	Feições de erosão diferencial ocasionais	Muitas feições de erosão diferencial	Maiores feições de erosão diferencial
		Diferença nas taxas de erosão	Pequena diferença	Diferença moderada	Grande diferença	Extrema diferença
Tamanho do bloco Volume de queda			0,30m 2,3m ³	0,60m 4,6m ³	0,90m 6,9m ³	1,20m 9,2m ³
Clima e presença de água no talude			Baixa a moderada precipitação, sem a presença de neve, sem água no talude	Moderada precipitação ou curto período de neve ou baixa presença de água no talude	Alta precipitação ou longo período de neve ou água no talude contínua	Alta precipitação e longo período de neve ou água no talude contínua e longo período de neve
Histórico de queda			Poucas quedas	Quedas ocasionais	Muitas quedas	Quedas constantes

Segundo Pierson *et al.* (1990), a altura do talude representa a altura vertical do mesmo. Rochas em encostas altas têm mais energia potencial do que aquelas em encostas mais baixas representando um risco maior, logo tem maior valor atribuído.

Já a efetividade da área de captação é dada por sua capacidade de evitar que o bloco atinja a rodovia e é definida como a área entre o limite do pavimento de uma rodovia e a base do talude rochoso (GOMES, 2009). Para seu dimensionamento, é utilizado o Ábaco de Ritchie, que é resultado do trabalho desenvolvido por Ritche (1963), onde foram observadas diversas quedas de blocos em taludes, medindo e registrando as trajetórias dos blocos, bem como a distância que eles atingiam.

Através do ábaco (Figura 7), pode-se determinar a largura e a profundidade da área de captação em função da altura e do ângulo de inclinação do talude.

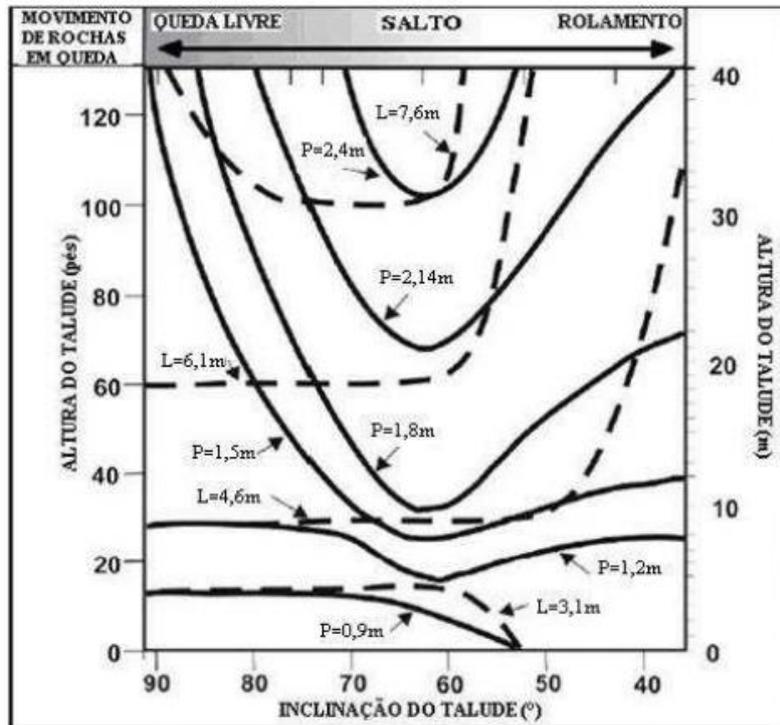


Figura 7 - Ábaco de Ritchie, 1969 (GOMES, 2009 adaptado de FHWA, 1989).

O risco médio ao veículo (RMV) mede a porcentagem de tempo que um veículo estará na zona de risco de queda de blocos. Essa porcentagem é dada pela Equação (2).

$$RMV = \frac{\text{tráfego médio diário (carros/hora)} \times \text{comprimento do talude (km)}}{\text{velocidade diretriz do local (km/h)}} \times 100 \quad (2)$$

Quando a taxa é de 100% significa que, em média, um carro estará dentro da área de queda em todos os momentos. Onde existem alto tráfego médio diário ou taludes de grande extensão, valores superiores a 100% poderão ocorrer, o que significa que, em qualquer momento específico, mais de um carro está presente na seção medida.

A distância de visibilidade é o comprimento da rodovia que um motorista deve ter para tomar uma decisão complexa ou instantânea, sendo fundamental quando os obstáculos na estrada são difíceis de perceber ou quando são necessárias manobras inesperadas ou incomuns. A porcentagem dessa distância requerida é dada pela Equação (3).

$$DV = \frac{\text{distância de visibilidade real}}{\text{distância de visibilidade de projeto}} \times 100 \quad (3)$$

A largura da rodovia representa a extensão da faixa pavimentada, incluindo o acostamento, medida perpendicularmente à linha central da rodovia. Ela representa o espaço disponível para o motorista efetuar uma manobra (GOMES, 2009).

Após a avaliação das condições da rodovia, as características geomecânicas do maciço rochoso devem ser avaliadas. Os autores as divide em duas categorias: a classe 1 para taludes onde juntas, planos de acamamento ou outras descontinuidades são as características estruturais dominantes e a classe 2 para taludes onde a erosão é a condição dominante. Deve-se utilizar a que melhor se adapta ao talude em estudo, entretanto se ambas as situações estiverem presentes e não estiver claro qual domina, ambas são pontuadas e apenas o pior caso (pontuação mais alta) é usado na classificação de perigo de queda de blocos.

Em relação ao tamanho/volume dos blocos, caso os blocos individuais sejam típicos do evento de queda, usa-se o tamanho do bloco in situ para pontuação, mas caso a massa de blocos seja o tipo dominante da queda, o volume por evento deve ser usado. A decisão sobre qual usar pode ser determinada a partir do histórico de manutenção ou estimada a partir de condições observadas quando não houver histórico disponível. As informações históricas são uma verificação importante do potencial de futuras quedas de blocos. Se a pontuação dada a uma seção não se compara com o histórico de queda de rochas, uma revisão da classificação é aconselhável.

Por fim, o clima e a presença de água no talude contribuem para o intemperismo e o movimento de materiais rochosos, principalmente quando há ciclos de gelo-degelo. Portanto, essa variável também é considerada no sistema de avaliação de perigo de queda de blocos

4.4.2 Colorado Rockfall Hazard Rating System – CRHRS

A versão modificada do RHRS, Colorado Rockfall Hazard Rating System (CRHRS) foi desenvolvida no Departamento de Transporte de Colorado (CDOT) por Russell *et al.* (2008). Nessa metodologia, foram adicionados 27 parâmetros, agrupados em 4 categorias: talude, características climáticas, geológicas e de tráfego, apresentados na Tabela 8. Essas modificações são utilizadas a depender da litologia do talude e tem como principal objetivo incorporar critérios de classificação mais específicos (ou descritivos) para remover a natureza subjetiva dos parâmetros do RHRS.

Tabela 8 - CRHRS modificado

Categoria		Critério e pontuação				
		3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos	
Talude	Altura do talude	7,5 a 15m	15 a 23m	23 a 30m	>30m	
	Frequência de quedas	> 2 anos	1 a 2 anos	Anualmente, sazonalmente	Durante todo o ano/eventos graves	
	Escore da inclinação do talude	0 a 2	2 a 4	4 a 8	>8	
	Feições de lançamento	Nenhuma (inclinação suave)	Pequena (<0,6m de variação da superfície)	Alta (variação de superfície de 0,6 a 1,8m)	Extrema (> 1,8m de variação da superfície)	
	Área de captação	95% a 100% / classe 1	65% a 94% / classe 2	30% a 64% / classe 3	< 30% / classe 4	
Clima	Precipitação anual	< 250mm	250 a 500mm	500 a 900mm	>900mm	
	Ciclos anuais de gelo-degelo	1 a 5	6 a 10	11 a 15	16 ou mais	
	Presença de água	Seco	Úmido/molhado	Gotejamento	Fluxo de água	
	Aspecto do talude	N	E, W, NE e NW	SE e SW	S	
Características geológicas	Rocha sedimentar	Grau de descalçamento	0 a 0,3m	0,3 a 0,6m	0,6 a 1,2m	>1,2m
		Jar slake	6	5	3 a 4	1 a 2
		Estratificações	1 a 2 estratificações, <15cm	1 a 2 estratificações, >15cm	>2 estratificações, <15cm	>2 estratificações, <15cm
	Rocha cristalina	Característica da rocha	Homogêneo/maciço	Pequenas falhas/veios fortes	Zonas de cisalhamento de xisto <15cm	Pegmatito fraco/micas/zonas de cisalhamento >15cm
		Grau de descalçamento	0 a 0,3m	0,3 a 0,6m	0,6 a 1,2m	>1,2m
		Grau de alteração	Fresca	Coloração de superfície	Ligeiramente alterado/suavizado	Alterações internas (core stones)

	Descontinuidade	Tamanho/volume do bloco	< 0,3m / <0,75m ³	0,3 a 0,6m / 0,75 a 2,3 m ³	0,6 a 1,5m / 2,3 a 7,6m ³	> 1,5m / > 7,6m ³
		Número de famílias	1	1 principal + aleatórias	2	> 2
		Persistência, orientação	< 3m mergulhando para dentro do talude	> 3m cortando o talude	< 3m mergulhando para fora do talude	> 3m mergulhando para fora do talude
		Abertura	Fechada	0,1 a 1mm	1 a 5mm	> 5mm
		Grau de alteração	Rocha sã	Descoloração na superfície da rocha	Preenchimento granular	Preenchimento argiloso
		Atrito	Rugoso	Ondulado	Planar	Polida
	Blocos em matriz	Tamanho do bloco (x3)	< 0,3m	0,3 a 0,6m	0,6 a 1,5m	> 1,5m
		Forma de bloco (x3)	Tabular	Maciço e compacto	Compactos angulares	Arredondado e liso
		Vegetação (x3)	Totalmente vegetado	Desigual	Plantas isoladas	Nenhuma
Pontuação total de perigo:						
Tráfego	Distância de visibilidade		> 80%	60% a 80%	40% a 60%	< 40%
	Risco médio ao veículo		0 a 24%	25 a 49%	50 a 74%	75% ou mais
	Nº de acidentes		0 a 2	3 a 5	6 a 8	>8

4.4.2.1 Taludes

Em relação à metodologia original do RHRS, foram adicionadas na categoria “taludes” informações em relação à frequência de queda de blocos, o ângulo médio do talude e as feições de lançamento. Como já dito, a altura do talude refere-se à altura do talude de corte ou a altura total do talude.

A frequência de quedas relaciona-se ao histórico de quedas utilizado originalmente; ela pontua a frequência de queda de blocos que ocorre em um determinado local e baseia sua pontuação em um tempo específico, ou seja, analisa de quanto em quanto tempo o evento ocorre. Em locais onde não há o monitoramento desses eventos, torna-se muito difícil obter esse parâmetro com exatidão.

O ângulo médio do talude teve sua pontuação alterada para expressar as chances de os blocos atingirem a rodovia, dada a trajetória de uma rocha em vários ângulos de inclinação. A pontuação é obtida de acordo com o ábaco adaptado de Maerz *et al.* (2005), mostrado na Figura 8, que funciona como um “ranking de consequência”. Portanto, os blocos provenientes de taludes com ângulos de maior pontuação têm maior probabilidade de atingir a rodovia.

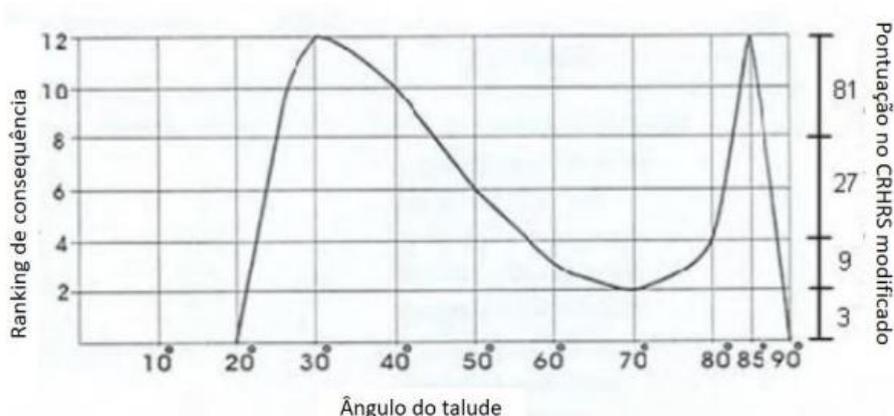


Figura 8 – Ábaco de de Maerz *et al.* (2005) para pontuação referente ao ângulo médio de inclinação. (adaptado de Santi *et al.*, 2009)

Por fim, a categoria de feições de lançamento era subjetiva, sendo considerada necessária uma abordagem mais descritiva. As feições medem a presença e magnitude das irregularidades na superfície do talude, que podem modificar a trajetória de um bloco fazendo com que o mesmo se projete para maiores distâncias ao colidir com essas feições (SILVEIRA, 2022). Sendo assim, as feições de lançamento são classificadas abaixo e exemplificadas na Figura 9.

- A. Nenhuma: talude suave, com pouca ou nenhuma variação topográfica ao longo da superfície.
- B. Pequena: pequenas variações topográficas no perfil do talude que podem causar o lançamento de rochas, como a presença de cicatrizes ou bancos que se estendem até 0,6 m da superfície do talude.
- C. Alta: variações topográficas maiores no perfil do talude que podem causar o lançamento de blocos, como a presença de cicatrizes ou bancos que se estendem entre 0,6m a 1,8 m da superfície do talude.
- D. Extrema: talude altamente irregular com grandes feições (cristas ou bancos) que se estendem por mais de 1,8 m da superfície do talude.

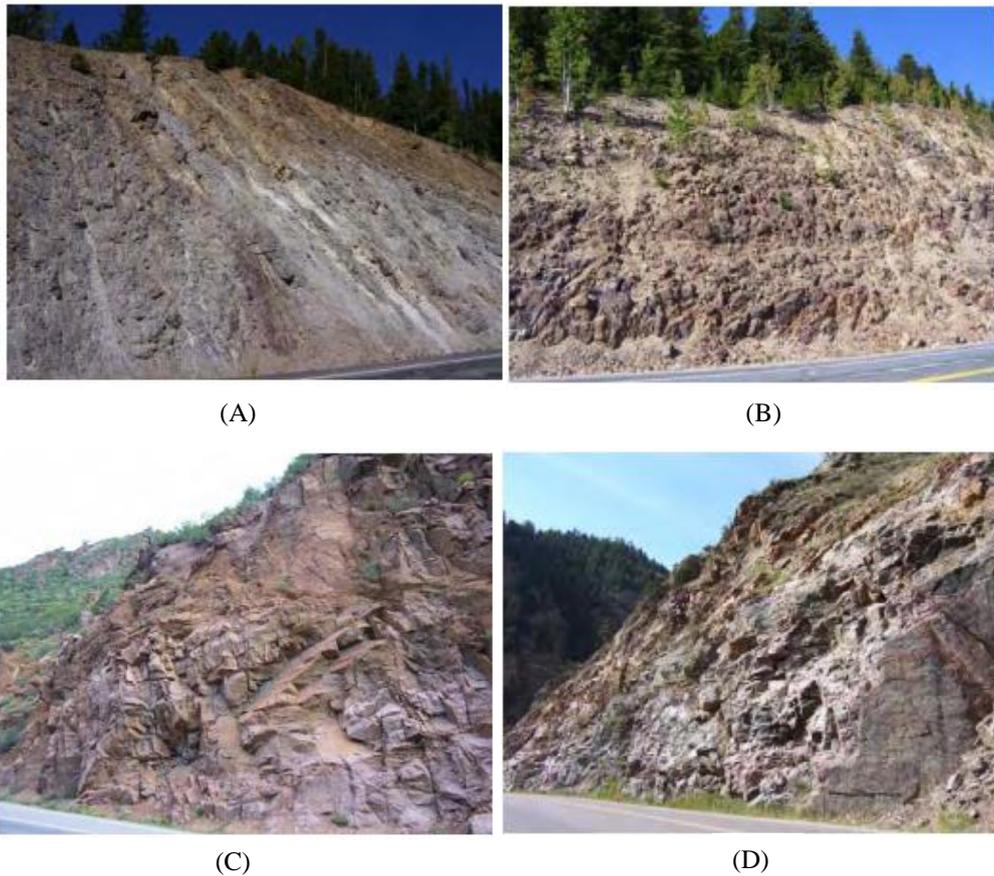


Figura 9 - Classificação de feições de lançamento (modificado de Russel *et al.*, 2008).

Sobre a área de captação dos blocos, no caso do CRHRS, ele classifica tanto a eficácia da dimensão da área da captação quanto a eficácia de sua forma, substituindo a linguagem subjetiva no sistema original por critérios numéricos. A mais alta das duas pontuações é utilizada para pontuar o parâmetro. Nesse caso, a eficácia da área de captação quanto às dimensões é avaliada comparando as dimensões reais da estrutura com as dimensões recomendadas por Ritchie (1963), em seu ábaco (Figura 7) e calculada pela Equação (4) abaixo.

$$Eficácia\ da\ área\ de\ captação = \frac{(D_m + W_m)}{(D_r + W_r)} \times 100 \quad (4)$$

Onde D_m é a profundidade medida da vala, W_m largura medida da vala, D_r a profundidade recomendada pelo Ábaco de Ritchie (1963) e W_r a largura recomendada pelo Ábaco de Ritchie (1963).

Já em relação à sua forma, a área de captação é avaliada conforme a Tabela 9 e tem como base o ângulo de inclinação da vala ou a presença de quaisquer barreiras entre a vala e a estrada. Nota-se que quanto maior o ângulo de inclinação para dentro da vala,

menor a chance de o bloco não ser contido caso caia nessa área de captação, logo menor o escore atribuído (SILVEIRA, 2022).

Tabela 9 - Eficácia da área de captação quanto a forma da vala (adaptado de Santi et al. 2009)

Eficácia da área de captação quanto à forma				
Classe	1	2	3	4
Inclinação da vala/barreira	>30° ou presença de barreira	21° a 30°	11° a 20°	0° a 10°
Escore	3	9	27	81

- Condições climáticas

Em relação às condições climáticas, os parâmetros adicionados no CRHRS foram precipitação anual, ciclos anuais de gelo-degelo, infiltração/água e aspecto do talude, agrupando as informações de precipitação, infiltração e exposição (efeitos de congelamento/degelo e luz solar direta na encosta).

A precipitação anual, nesse caso, especifica as quantidades reais de chuva e neve a fim de remover a subjetividade dos critérios “baixo, moderado, alto” originalmente usados. A presença de água no talude também foi alterada para adjetivos mais descritivos e, caso a classificação seja realizada durante uma estação seca, as taxas de infiltração ainda podem ser estimadas pela observação de faixas de água e zonas de descoloração nas faces das rochas.

Já o aspecto do talude, segundo Santi (2009), é baseado em evidências de que os taludes voltados para o Sul possuem mais ciclos de gelo-degelo em um ano do que as encostas voltadas para o Norte. Os taludes voltados para o Norte ficam na sombra a maior parte do dia, com menor variação de temperatura, logo, recebem a menor pontuação (3), já os taludes voltados para o Sul têm as maiores variações de temperatura em um período de 24 horas e recebem a maior pontuação (81).

4.4.2.2 Características geológicas

O CRHRS considera três tipos de rochas que devem ser analisadas separadamente devido às suas características e, assim pode-se ponderá-las adequadamente em relação à queda de blocos, sendo:

- Rocha sedimentar: solapamento e erosão diferencial tendem a controlar a queda de rochas.
- Rocha cristalina: a falta de homogeneidade do maciço rochoso e as fraturas tendem a controlar a queda de rochas.
- Materiais de bloco em matriz (colúvio, latifúndio glacial, depósitos de fluxo de detritos, etc.): erosão do material da matriz e o subsequente deslizamento dos blocos tendem a controlar a queda de rochas.

Essas categorias são ainda divididas em três parâmetros individuais, que só são empregados ao tipo de rocha definido previamente. Já as descontinuidades possuem seis parâmetros individuais, que são empregados apenas em taludes de rochas sedimentares e cristalinas. Então, quanto às características geológicas, tanto os taludes cristalinos quanto os sedimentares consideram e pontuam nove parâmetros (três próprios para cada tipo e seis para as descontinuidades).

- Rochas sedimentares

As rochas sedimentares são classificadas quanto ao grau de descalçamento, jar slake e as estratificações. O descalçamento de um talude pode ocorrer devido à erosão, alteração diferencial da rocha da base ou remoção de um “bloco chave”, criando novas fontes de instabilidade ao talude. Nesse caso, o parâmetro é pontuado de acordo com as dimensões desse descalçamento, visto que quanto maior a porção instável, mais a queda do bloco depende de outras condições estruturais; ou maiores as chances desse bloco que se comporta como uma “laje suspensa” se desprender (SILVEIRA, 2022).

Segundo Santi *et al.* (2009), o grau de descalçamento nas rochas sedimentares são devido à uma camada de rocha mais fraca intercalada com uma mais competente. Dessa forma, é desejável realizar o teste de durabilidade, conhecido como *Slake Durability test*, porém esse é um teste que demanda tempo e não é possível realiza-lo em campo. Uma alternativa é utilizar *jar slake*, um teste simples desenvolvido para determinar a reação do material rochoso fraco à água (MOHAMAD *et al.*, 2011). Nesse caso, são necessários 30

minutos, onde as amostras de rochas são colocadas em água e é possível observar e quantificar a degradação da amostra, classificando-as de acordo com a Figura 10.

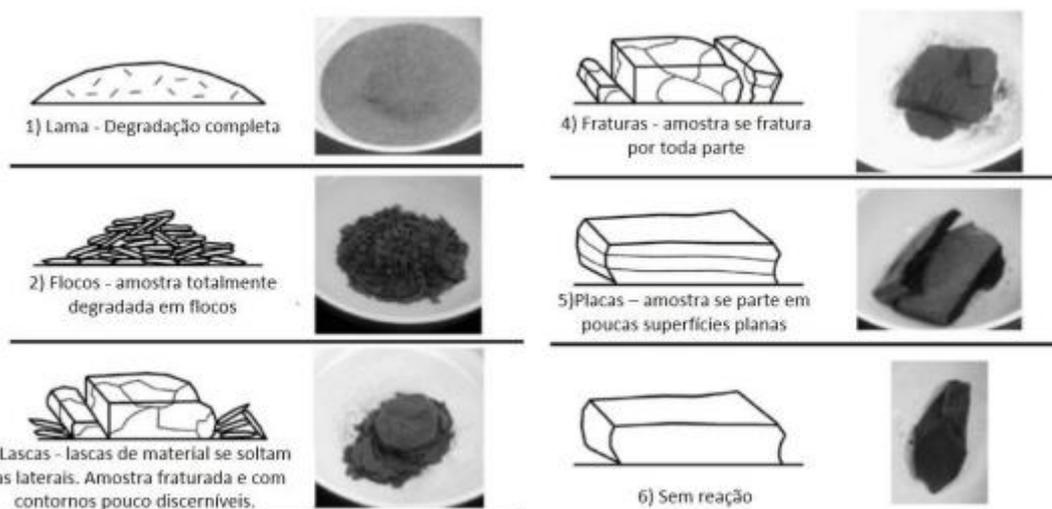


Figura 10 - Classificação de amostras de rochas submetidas ao Jar Slake (adaptado de Russel et al., 2008)

O tipo de queda de blocos e a gravidade com a qual ela ocorre é amplamente dependente da variação litológica e da espessura da camada no talude rochoso. Dessa forma, a observação das estratificações foi incluída no CRHRS, onde as principais características consideradas são o número de camadas fracas dentro do talude rochoso e suas espessuras correspondentes. (RUSSEL *et al.*, 2008).

- Rochas cristalinas

A queda de blocos em rochas cristalinas, como já dito, são controladas pela heterogeneidade do maciço e são pontuadas pelas características do maciço, o grau de descalçamento e grau de alteração. As características do maciço foram primeiramente classificadas em relação às características específicas das rochas metamórficas/ígneas no Colorado.

Um maciço classificado como “homogêneo/maciço” implica pouca variação mineralógica ou litológica. Já “pequenas falhas/veios fortes” é autoexplicativo mas deve-se notar que a presença de veios nesta categoria implica perda de resistência do maciço rochoso, ainda que não sejam zonas importantes de fraqueza.

As zonas de cisalhamento de xisto (<15cm) implicam na existência de zonas de xistosidade ou outras texturas dentro do maciço rochoso que podem contribuir para a instabilidade, pois enfraquecem o maciço rochoso e criam caminhos para o aumento do

intemperismo químico e físico. Por fim, pegmatitos fracos/micas/zonas de cisalhamento (>15cm) são classificados como fator dominante, controlando a instabilidade em grande escala e as falhas de taludes rochosos nas rodovias do Colorado, recebendo a maior pontuação desse parâmetro.

Embora normalmente não ocorra erosão diferencial que cause o descalçamento em rochas cristalinas, a queda frequente de rochas no talude pode criar feições salientes e condições instáveis. Dessa forma, grau de descalçamento é avaliado tomando como base as dimensões desse descalçamento, semelhante ao que é analisado nas feições de lançamento, porém aqui, o problema está relacionado à instabilização do talude, visto que novos blocos salientes ficarão suspensos, não ao alcance dos blocos (SILVEIRA, 2022).

Por fim, o grau de alteração é considerado um fator importante que contribui para a queda de rochas em rochas cristalinas. Em sua pontuação, utiliza parâmetros autoexplicativos que refletem graus de alterações típicos de rochas cristalinas, mas é importante salientar que leva em consideração o grau encontrado da rocha intacta e não ao longo das superfícies das descontinuidades.

- Descontinuidades

No CRHRS, as descontinuidades são divididas em seis parâmetros, sendo eles tamanho/volume do bloco, número de falhas, persistência/orientação, abertura, grau de alteração e atrito. A queda de blocos pode ser caracterizada por um único bloco ou por um volume de material de diferentes tamanhos.

O tamanho do bloco fornece informações inerentes sobre o espaçamento de descontinuidade, uma vez que o tamanho do bloco está relacionado a essa característica (RUSSEL *et al.*, 2008). É um parâmetro de suma importância pois evidencia a gravidade de um potencial evento de queda, já que os blocos maiores possuem maior alcance e são mais propensos a atingir a rodovia, podendo causar a colisão com um veículo ou quedas adicionais.

Quanto maior o número de famílias de descontinuidades presentes em um maciço, mais fraturado ele é. Isso implica em maior infiltração de água refletindo diretamente no grau de alteração e no preenchimento do maciço e na estabilidade do mesmo, uma vez que aumenta a chance da formação de blocos. Por tais motivos, esse parâmetro foi incluído no CRHRS.

O parâmetro de persistência e orientação foi alterado no CRHRS anexando números de Pierson e Van Vickle (1993), usados para definir persistência contínua ou descontínua ($>3m$ e $<3m$, respectivamente). A descrição da orientação foi esclarecida para definir “adverso” como descontinuidades que mergulham para fora da face do talude e “favorável” como aquelas que mergulham para dentro da face do talude (RUSSEL *et al.*, 2009).

Assim como o número de famílias, a abertura e o grau de alteração são importantes parâmetros que foram adicionados à análise. A abertura da descontinuidade aumenta a chance de infiltração de água no maciço, causando a instabilidade do mesmo devido ao aumento da poropressão. O grau de alteração, por sua vez, relaciona-se a existência de intemperismo nas paredes das descontinuidades. Tanto o intemperismo físico quanto o químico são fatores que contribuem para a queda de blocos, uma vez que o intemperismo químico altera a resistência do maciço, pois reduz a coesão e o atrito existentes.

Diferente do RHRS original, o parâmetro de atrito não inclui os materiais de preenchimento, que nesse caso são considerados quanto ao grau de alteração. Nesse caso, o atrito ao longo das descontinuidades é estimado tanto pela observação quanto pela sensação das superfícies das descontinuidades (SANTI *et al.*, 2008). São classificados em: superfícies ásperas, onde é possível perceber asperezas distintas e nítidas, além de uma textura rugosa quando se passa a mão sobre elas; ondular implica que as asperezas foram cortadas e são mais arredondadas e suaves; planar, onde não há asperezas, mas sim superfícies lisas em contato umas com as outras e polida, que implica que o movimento ocorreu no passado, resultando na formação de estrias nas superfícies de descontinuidade, caso em que a resistência ao cisalhamento seria reduzida ao valor residual (SANTI *et al.*, 2008).

- Blocos em matriz

Antes de aprofundar nos parâmetros utilizados para pontuar a matriz rochosa, é importante salientar que todas as classificações serão multiplicadas por um fator de 3, a fim de para classificar todos os fatores geológicos igualmente. Este multiplicador é usado para evitar que encostas de rochas tenham mais peso do que encostas de bloco em matriz, quando ambas poderiam ter o mesmo potencial de queda de blocos. Dito isso, a matriz rochosa é pontuada a partir de: tamanho e forma do bloco e vegetação.

No caso dos tamanhos do bloco, as pontuações devem ser atribuídas de acordo com os maiores blocos potencialmente instáveis naquele contexto e não observando apenas seu tamanho. Isso porque embora blocos maiores representem mais perigo, é provável que blocos menores caiam com muito mais frequência em taludes cujos blocos estão encrustados em matriz de solo e/ou detritos (blocos em matriz), pois uma quantidade menor de material que compõe a matriz precisa ser erodida para desalojar um bloco de, por exemplo, 0,3 m de dimensão média do que um bloco de cerca de 1,5 m (SILVEIRA, 2022).

Já a forma do bloco está associada ao alcance que ele terá em caso de queda. Corpos tabulares possuem menor chance de rolamento quando comparado à corpos arredondados. Por fim, o CRHRS pontua a vegetação considerando seu viés positivo, onde considera que ela ajuda a melhorar a estabilização de taludes de solo e taludes de blocos na matriz ao reduzir a erosão. Dessa forma, quanto mais vegetado é o talude, mais estável ele se torna.

4.4.2.3 Tráfego

Em relação ao RHRS original, os parâmetros de tráfego se mantiveram praticamente inalterados. As exceções são em relação à classificação de risco médio do veículo no lugar do tráfego médio diário e a adição do número de acidentes, entretanto o objetivo continua sendo classificar o risco geral de um veículo sofrer um acidente devido à ocorrência de queda de rochas.

4.4.3 Adaptação do método RHRS por GOMES (2009).

No contexto brasileiro, pode-se citar a adaptação da metodologia RHRS proposta por Gomes (2009), com o objetivo de avaliar o perigo relacionado à queda de blocos rochosos em taludes de rodovias do Estado do Espírito Santo. Para isso, o autor adequou os parâmetros de avaliação às características rodoviárias e lito-estruturais do estado brasileiro e adotou oito índices para classificação, mantendo os valores máximos e mínimos (81 e 3, respectivamente) da metodologia original, onde os menores valores correspondem às melhores condições de segurança na rodovia.

Para cada um dos parâmetros quantitativos propostos por Pierson *et al.* (1990) foram atribuídas equações, relacionadas sob forma de equações exponenciais, conforme Tabela 10. Não houveram modificações quanto à Efetividade da Área de Captação e ao Histórico de Quedas.

Tabela 10 - Equações adotadas para cada parâmetro quantitativo avaliado na metodologia de GOMES, 2009.

Parâmetros	Símbolo	Equação
Altura do talude (H)	I_{AT}	$I_{AT} = e^{0,1831H}$
Risco ao veículo (RV)	I_{RV}	$I_{RV} = e^{0,0439RV}$
Porcentagem da distância de visibilidade (DV)	I_{DV}	$I_{DV} = 243 e^{-0,0439DV}$
Largura do pavimento (LP)	I_{LP}	$I_{LP} = 1.262,7 e^{-0,4578LP}$
Dimensão do bloco (Db)	I_{Db}	$I_{Db} = e^{3,662Db}$
Condição climática (P)	I_{CC}	$I_{CC} = 0,0048 e^{0,0054P}$
Característica geológico-geotécnica (SMR)	I_{CG}	$I_{CG} = 19.683 e^{-0,11SMR}$
Efetividade da área de captação	I_{AC}	-

O resultado obtido da determinação dos parâmetros da tabela acima, somado a pontuação da área de captação e do histórico de quedas gera o Índice de Queda de Blocos (I_{QB}), que é dado pela Equação (5):

$$I_{QB} = I_{AT} + I_{AC} + I_{RV} + I_{DV} + I_{LP} + I_{Db} + I_{CC} + 2I_{CG} \quad (5)$$

Nesse caso, Gomes (2009) utilizou o fator multiplicador (x2) para atribuir maior peso às características geológicas, pois considera que a categoria possui maior influência nos processos de instabilidade quanto às quedas de blocos.

A Tabela 11 mostra, em resumo, a classificação de taludes rochosos proposta por Gomes (2009).

Tabela 11 - Proposta de classificação para taludes rochosos em rodovias do Espírito Santo (GOMES, 2009).

Parâmetros	Critérios e pontuação			
	3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Altura do talude	6,0 m	12,0 m	18,0m	24,0 m
Efetividade da área de captura	Boa captura + conformidade com o ábaco de Ritchie + proteção	Captura moderada + conformidade com o ábaco de Ritchie	Captura limitada + não-conformidade com o ábaco de Ritchie	Sem captura
Risco médio ao veículo	25% do tempo	50% do tempo	75% do tempo	100% do tempo
Porcentagem da distância de visibilidade	100% Distância de visibilidade adequada	75% Distância de visibilidade moderada	50% Distância de visibilidade limitada	25% Distância de visibilidade muito limitada
Largura do pavimento	13,2 m	10,8 m	8,4 m	6,0 m
Dimensão do bloco	0,30 m	0,60 m	0,90 m	1,2 m
Condição climática	Baixa precipitação média anual < 1.150 mm	Precipitação média anual moderada 1.150 – 1.450 mm	Precipitação média anual grande 1.450 – 1.750 mm	Alta precipitação média anual > 1.750 mm
Característica geológica (SMR)	80	70	60	50

Para o parâmetro de altura do talude, o autor assim como Pierson *et al.* (1990), considera a altura vertical do mesmo. Os blocos em cortes altos receberam a maior pontuação por apresentarem maior perigo quando comparados à maciços de menores amplitudes. A medida é realizada a partir do ponto mais alto em que a queda é esperada. Caso os blocos caiam de um talude natural acima do corte, soma-se esta altura adicional (GOMES, 2009).

A área de Captação, como já dito, é a área entre o limite do pavimento da rodovia e a base do talude de corte rochoso. Nesse caso, os taludes foram pontuados a partir da proposta de Budetta (2004), que modificou a avaliação qualitativa de Pierson *et al.* (1990) e van Vickle (1993) ao incrementar aspectos geométricos pioneiros de Ritchie (1963). Assim, o ângulo de inclinação e altura do talude, bem como a largura, a profundidade e a superfície da área de captação são analisadas (GOMES, 2009). As pontuações são: 3

pontos para áreas de boa captura, 9 pontos para captura moderada, 27 pontos para captura limitada e 81 pontos para áreas sem captura.

Tanto para o Índice de Risco ao Veículo quanto para a Porcentagem de Distância de Visibilidade utiliza-se as pontuações correspondentes à metodologia original do RHRS. No caso da distância de visibilidade, um objeto de 15 cm de diâmetro já pode ser considerado potencialmente perigoso, sendo utilizado como base para os cálculos da porcentagem da distância. Para a proposta de Gomes (2009), foram registradas as medidas das distâncias pelas quais o objeto poderia ser visto a uma altura de 1,10 m do centro da rodovia.

Para a Largura do Pavimento, utiliza-se a relação entre o índice I_{LP} e a largura do pavimento encontrada durante o desenvolvimento da adaptação, sendo os valores de referência determinados a partir das normas e diretrizes adotadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT e Departamento de Edificações e de Rodovias do Estado do Espírito Santo – DER-ES.

Em relação às dimensões do bloco, Gomes encontrou menos de 3 famílias de descontinuidades nas seções investigadas. Segundo Palmström (1995), existem diversas formas de dimensionar blocos em um maciço rochoso. No caso de blocos na superfície, o volume pode ser estimado diretamente, medindo as dimensões de um grupo representativo de blocos. Já quando essa tarefa se torna muito onerosa, é possível utilizar correlações que auxiliam nesse cálculo.

Nos casos encontrados pelo autor, é conveniente o uso da Equação (6), proposta por Palmström (1995), que determina o volume dos blocos a partir do contador volumétrico J_v e do fator de forma dos blocos β . O contador contador volumétrico J_v equivale ao número de descontinuidades em um volume unitário do maciço rochoso e β depende principalmente das diferenças entre os espaçamentos das descontinuidades.

$$Vb = \beta x J_v^{-3} \quad (6)$$

Com o valor de Vb , pode-se calcular a dimensão ou tamanho do bloco (Db) em metros, através da Equação (7), proposta por Budetta (2004).

$$Db = \sqrt[3]{Vb} \quad (7)$$

A condição climática foi pontuada em função da precipitação pluviométrica média anual devido às características das áreas em estudo. Considerando o sudeste brasileiro,

não se considera a presença de neve e a condição de água no talude já é abordada na classificação das características geológicas, o que justifica a escolha do autor.

O último parâmetro utilizado para a análise são as características geológicas. Para classificá-las foram avaliadas as informações geomecânicas obtidas de acordo com o Slope Mass Rating (SMR), proposto por Romana (1985), que é mais completa quando comparada a outros métodos, pois separa os parâmetros facilitando sua pontuação. Nesse caso, optou-se pela não utilização da classificação de Pierson et al (1990) devido às características geotécnicas dos taludes das rodovias capixabas, pois o método proposto por estes autores não é aplicável com precisão nas rodovias capixabas (GOMES, 2009).

4.4.3.1 Classificação SMR e RMR

O Slope Mass Rating (SMR), proposto por Romana (1985), é um sistema obtido a partir de um ajuste do Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989), que é acrescido por um termo fatorial dependente da relação talude – descontinuidade e por um valor referente ao método de escavação, conforme a Equação (8) abaixo (GOMES, 2009).

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad (8)$$

Onde:

F1: fator relacionado ao paralelismo entre a direção de mergulho do talude e das descontinuidades;

F2: fator relacionado à resistência ao cisalhamento das descontinuidades (Romana, 1993), que para o caso de rupturas planares, depende do ângulo de mergulho das descontinuidades. Para o caso de tombamentos, adotar 1;

F3: fator que depende da relação entre os ângulos de mergulho da face do talude e das descontinuidades;

F4: fator relacionado ao método de escavação.

Os fatores de correção relacionados ao talude são pontuados de acordo com a Tabela 12 abaixo.

Tabela 12 - Fatores de correção para cálculo do SMR (Romana, 1985).

Fatores de ajustamento para descontinuidades (F1, F2, F3)		$\alpha_j = \text{direção da descontinuidade}$ $\alpha_s = \text{direção do talude}$		$\beta_j = \text{mergulho da descontinuidade}$ $\beta_s = \text{mergulho do talude}$		
		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Rup. Planar $ \alpha_j - \alpha_s =$ Tombamento $ \alpha_j - \alpha_s - 180 =$		> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
Valor de F1		0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Relação		$F1 = (1 - \text{sen} \alpha_j - \alpha_s)^2$				
$\beta_j =$		< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	>45°
F2	Rup. Planar	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
	Tombamento	1,00				
Relação		$F2 = \tan^2 \beta_j$				
Ruptura planar $ \beta_j - \beta_s =$		>10°	10° - 0°	0°	0° - (-10°)	<(-10°)
Tombamento $ \beta_j + \beta_s =$		< 110°	110° - 120°	>120°	-	-
Valor de F3		0	-6	-25	-50	-60
Fatores de ajustamento para o método de escavação		Talude natural	Pré-fissuramento	Detonações suaves	Detonações normais	Detonações defeituosas
Valor de F4		15	10	8	0	-8

O SMR fornece como resultado, além da classe de qualidade do maciço, a condição de estabilidade e também a probabilidade de haver ruptura. É uma metodologia empírica para estimar a probabilidade de haver ruptura, aplicada a taludes em qualquer contexto (rodovias, minerações e qualquer outro), sem qualquer referência a perigo, consequências dessas rupturas ou riscos (SILVEIRA, 2022).

O RMR, por sua vez, baseia-se em seis parâmetros, a cada um dos quais são atribuídos pesos, e que Bieniawski (1989) considerou serem os que melhor descrevem o comportamento do maciço rochoso (SILVA, 2016). O valor final é a soma de cinco parâmetros (resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, RQD, espaçamentos entre

as descontinuidades, condições das descontinuidades e presença de água) e é adimensional, resultando no RMR básico.

Para classificação geomecânica com objetivo de determinação de parâmetros de resistência da rocha é utilizado o RMR básico na condição seca. O sexto parâmetro é um parâmetro de ajuste que considera a orientação das descontinuidades em relação à orientação da encosta ou obra civil como túneis, fundações ou taludes (SANTOS, 2015).

O Rock Quality Designation – RQD, parâmetro utilizado na classificação, é expresso em termos percentuais e corresponde a um índice de recuperação modificado. Pode ser dado pela Equação (9), que correlaciona o RQD com o espaçamento das descontinuidades e S é o espaçamento médio das descontinuidades (GOMES, 2009).

$$RQD = 110 * e^{\frac{-0,1}{S}} * \left(\frac{0,1}{S} + 1\right) \quad (9)$$

Dessa forma, o RMR pode ser obtido através da Tabela 13.

Tabela 13 - Classificação da condição das descontinuidades - RMR (Bieniawski, 1989)

Parâmetro	Intervalos						
	< 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	<25		
Resistência à compressão da rocha intacta (MPa)					25 - 5	5 - 1	<1
Peso RMR	15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)	100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25		
Peso RMR	20	17	13	8	3		
Espaçamento (mm) entre as descontinuidades	>2.000	2.000 - 600	600 - 200	200 - 60	<60		
Peso RMR	20	15	10	8	5		
Condição das descontinuidades	Superfícies muito rugosas, não contínuas. Sem abertura. Paredes não intemperizadas.	Superfícies ligeiramente rugosas. Abertura <1mm. Paredes ligeiramente intemperizadas.	Superfície ligeiramente rugosas. Abertura < 1mm. Paredes muito intemperizadas.	Superfícies lisas ou preenchimento < 5mm m ou aberturas contínuas com 1-5 mm	Preenchimento >5 mm ou aberturas contínuas >5 mm		

Peso RMR	30	25	20	10	0
Presença de água	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejamento	Fluxo abundante
Peso RMR	15	10	7	4	0

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Localização e descrição do talude

O talude escolhido para realizar a análise de perigo de queda de blocos localiza-se na Rodovia dos Inconfidentes - BR356, que liga Ouro Preto à Belo Horizonte, nas coordenadas 20°14'01.3"S 43°47'53.1"W (próximo ao Km 52), destacado em amarelo na Figura 11. A escolha do local de estudo baseou-se na seleção de um talude aparentemente susceptível ao evento de queda de blocos e que se, por ventura venha a ocorrer, pode trazer consequências graves como acidentes materiais e/ou danos a integridade física das pessoas que ali trafegam.

Geologicamente, o talude localiza-se na porção centro-sul do Quadrilátero Ferrífero – QF, mais especificamente na formação do Complexo Bação, composto principalmente por granitoides e gnaisses, como pode ser visto na Figura 12. Tal complexo constitui o embasamento cristalino granito-gnáissico-migmatítico das unidades geológicas do QF e tem como características básicas: composição global granodiorítica, com bandas tonalítica (bandas escuras) e granitóide rica em quartzo (bandas claras) (FIGUEIREDO *et al.*, 2004).

A partir de uma análise visual primária, pode-se notar que é um talude extenso, de aproximadamente 100m, bastante fraturado e que possui marcas de desmonte a fogo. Apresenta vegetação ao longo de toda sua extensão, o que auxilia na infiltração de água no maciço e descontinuidades abertas, que corroboram com a formação de blocos. Possui uma boa área de captação em certos segmentos do talude, mas não em toda sua extensão, além de não haver impedimento para que os blocos atinjam a rodovia.



Figura 11 - Localização do talude escolhido para análise via *Google Earth*.

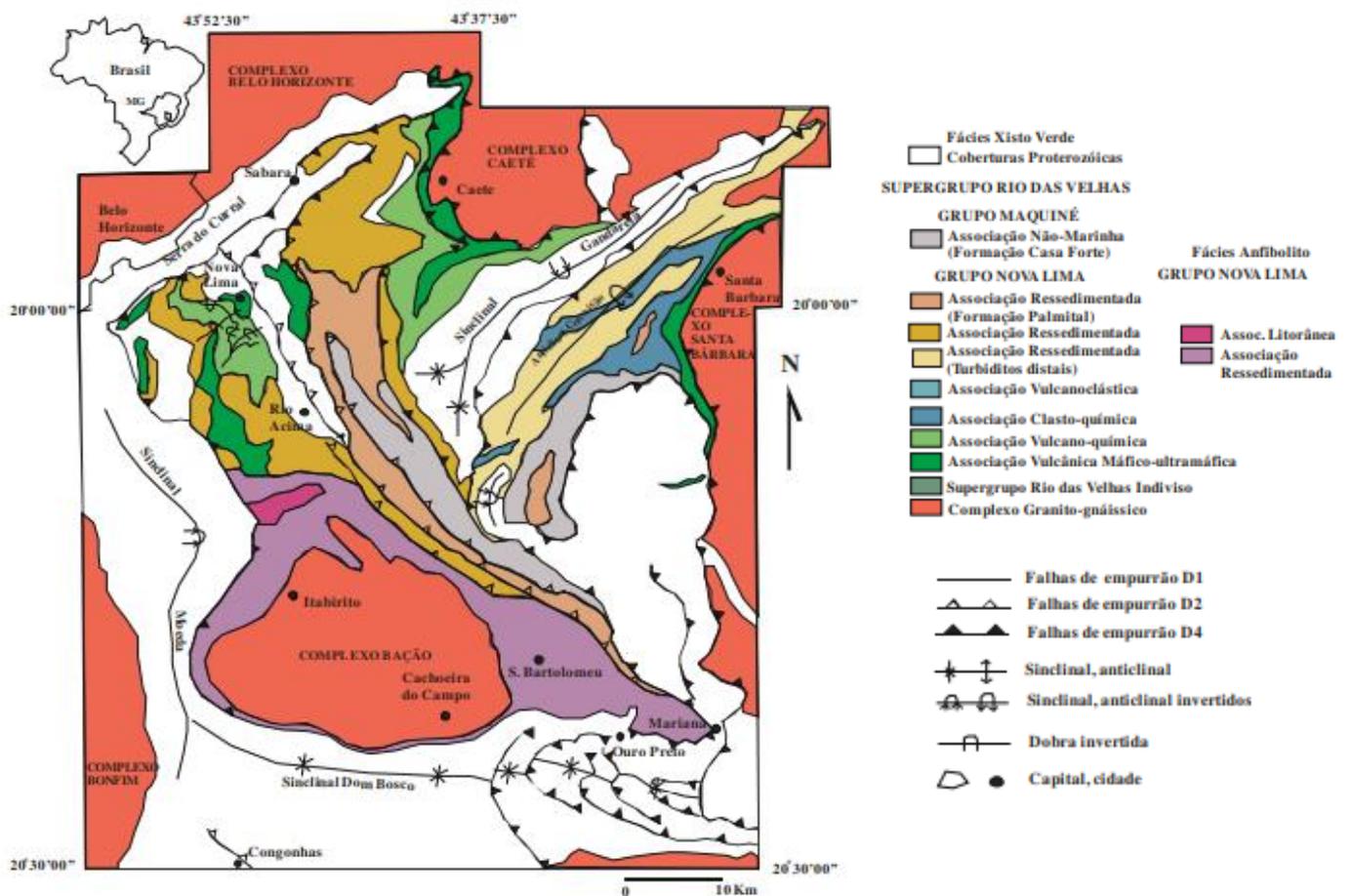


Figura 12 - Mapa geológico simplificado do QF com as associações de litofácies do Supergrupo Rio das Velhas (modificado de Baltazar & Zucchetti, 2005).

5.2 Levantamentos de campo

O levantamento geológico-geotécnico foi realizado a fim de coletar informações cruciais para a caracterização do talude. Consistiu basicamente no levantamento das descontinuidades e suas características, além da observação das condições de tráfego da rodovia.

Os parâmetros medidos e observados constam em planilhas de campo e estão descritos abaixo:

- Orientação das descontinuidades, utilizando uma bússola Brunton e o aplicativo de celular Clino como auxiliar em locais de difícil acesso.
- Altura do talude, obtida por meio de Silva (2016).
- Área de captação de blocos, espaçamento, persistência e abertura das descontinuidades, utilizando trena.
- Rugosidade, com o auxílio do Pente de Barton.
- Preenchimento nas aberturas das descontinuidades, com auxílio de canivete.
- Resistência do maciço, através do teste do martelo do geólogo e do Esclerômetro de Schmidt.
- Volume de blocos que já sofreram queda, com auxílio de trena.
- Observações físicas da condição do talude, como o grau de alteração das paredes e presença de marcas de desmonte e água no talude.

Foram coletados em 50 pontos a orientação das descontinuidades do talude. Desses 50 pontos, em 20 foram realizados os levantamentos para a caracterização geológica-geotécnica. A primeira observação feita foi em relação à homogeneidade do maciço, podendo ser considerado como uma rocha pouco alterada, com a resistência da rocha original parcialmente afetada pela alteração. Além disso, para analisar a resistência da rocha intacta, utilizou-se tanto o teste do martelo do geólogo quanto o Esclerômetro de Schmidt.

Para um bom resultado utilizando o Esclerômetro de Schmidt é necessário localizar um afloramento de rocha intacta e lixá-la para que a superfície fique lisa. O esclerômetro deve ser aplicado perpendicularmente à superfície (SANTOS, 2015).

5.3 Análise de perigo de queda de blocos

5.3.1 RHRS

O método RHRS utiliza os parâmetros altura do talude, efetividade da área de captação, risco médio ao veículo, distância de visibilidade, largura do pavimento, características geológico-estruturais do maciço rochoso, dimensão dos blocos, clima e histórico de queda para hierarquizar os taludes de acordo com a necessidade de intervenção, pontuando os parâmetros de 3 a 81 e distinguindo os taludes mais problemáticos ou perigosos.

Os nove parâmetros foram avaliados no talude e o somatório dos mesmos resultam no fator de queda de bloco (FQB), que representa a necessidade de intervenção quanto à queda de blocos em cada seção estudada. A Equação (10) demonstra o cálculo do FQB.

$$FQB = F_{AT} + F_{AC} + F_{RMV} + F_{DV} + F_{LP} + F_{CG} + F_{DM} + F_{CC} \quad (10)$$

O primeiro parâmetro avaliado foi altura do talude, que devido às dificuldades técnicas para o levantamento, utilizou-se dados já existentes na literatura. Dessa forma, a altura média considerada para o talude foi 22,7m (SILVA, 2016). Além disso, como o talude se apresenta bem homogêneo em relação aos parâmetros geomecânicos não houve a necessidade da setorização do mesmo.

Para estimar a efetividade da área de captação os fatores considerados foram: altura, largura, profundidade e forma da valeta; estimativa do tamanho do bloco e quantidade de queda (GOMES, 2009).

O risco médio ao veículo foi obtido por meio da Equação 2. Para encontrar o volume médio diário (VMD), utilizou-se informações contidas no relatório de Volume Médio Diário Anual de Tráfego do Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER-MG (2008), associada a uma Projeção Geométrica, que admite que o volume de tráfego cresce segundo uma progressão geométrica (GOMES, 2009). Dessa forma, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006), o tráfego pode ser estimado de acordo com a Equação (11) mostrada a seguir.

$$V_n = V_0 \times (1 + r)^n \quad (11)$$

Onde V_n é o volume de tráfego no ano “n”; V_0 o volume de tráfego do ano base; r a razão da progressão geométrica (fator de crescimento anual) e n o número de anos decorridos após o ano base.

Na falta de informações de variáveis socioeconômicas, utiliza-se uma taxa de crescimento anual de 3%, próxima da taxa de crescimento econômico do país como um todo, o que resulta em uma função exponencial (GOMES, 2009).

A distância de visibilidade pode mudar consideravelmente ao longo de uma seção de queda de blocos. Para encontrar essa distância é dada a Equação 3, onde a utilizou-se a literatura para a distância de visibilidade real, devido às dificuldades técnicas encontradas durante o levantamento e para a distância de projeto, utiliza-se a Tabela 14 abaixo, que associa a distância de visibilidade ao limite de velocidade da via.

Tabela 14 - Distância de visibilidade requerida de acordo com os limites de velocidade da via (Pierson e Van Vickle, 1993)

Limite de velocidade (km/h)	Distância requerida (m)
40	114
48	137
56	160
64	183
72	206
80	229
89	267
97	305
105	1.320

A largura da pista, que é a extensão da faixa pavimentada desde o acostamento até a linha central da rodovia, teve sua determinação realizada por trena. Para a aplicabilidade do método à Rodovia 356, houve a necessidade de relacionar o fator F_{LP} e a largura da pista, com valores de referência dados pelo DNIT.

Como já colocado, o sistema RHRS divide as características geológicas em duas categorias: a classe 1 para taludes onde juntas, planos de acamamento ou outras discontinuidades são as características estruturais dominantes e a classe 2 para taludes onde a erosão é a condição dominante. No caso do talude em estudo, a pontuação é dada

em relação à classe 1, já que se trata de um maciço onde as descontinuidades são as características estruturais dominantes.

Para o tamanho do bloco é importante o cálculo de seu volume. No caso do talude em estudo, foi possível realizar medições de volume diretamente nos blocos formados, mas é importante lembrar que existem casos que esse volume deve ser mensurado utilizando o espaçamento e o comprimento das descontinuidades que formam o bloco.

Por fim, as condições climáticas foram analisadas de acordo com a precipitação e a presença de água no talude, uma vez que neve não é uma condição do local em estudo. Para isso, foram adotados parâmetros de precipitação anual média para retirar a subjetividade do fator.

5.3.2 CRHRS

A análise a partir do CRHRS foi realizada por meio dos parâmetros de talude, clima, características geológicas e tráfego. Assim como no método do RHRS original, para a altura do talude utilizou-se os dados encontrados na literatura.

A frequência de quedas é dada pelo histórico do local em estudo, entretanto, como não há registros em relação a esse evento, o parâmetro não pode ser pontuado. O ângulo médio da face do talude foi considerado a partir da bússola Brunton, e é considerado um talude é muito verticalizado. Dessa forma, é possível relacionar o ângulo médio da inclinação com o alcance dos blocos.

Já as feições de lançamento foram pontuadas de acordo com as observações de campo. Por fim, a área de captação já havia sido calculada para o método RHRS original.

Em relação ao clima, os parâmetros utilizados para caracterizar o talude foram a precipitação anual e a presença de água. No caso dessa metodologia, preferiu-se eliminar informações sobre ciclos de gelo-degelo e sobre o aspecto do talude. No caso dos ciclos de gelo-degelo, na região em estudo não ocorre tal fenômeno e para o aspecto do talude, é difícil afirmar que o talude é influenciado pelas variações de temperatura, uma vez que a região não sofre com grandes mudanças climáticas, logo não há uma variação térmica significativa para ser representativa à metodologia.

De acordo com Júnior (2009), a cidade de Itabirito, pertencente à Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, possui o clima classificado como Cwb – clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado. Além disso, Silva (2016) coloca que Itabirito, apresenta precipitação média anual de 1420 mm.

A presença de água no talude é um aspecto visual, que pode ser observado em campo. Já o parâmetro “aspecto do talude” foi considerado por levantar informações sobre a mudança de temperatura que o talude sofre ao longo de 24 horas e mensurado por meio de bússola.

Já para as características geológicas, utilizou-se apenas as informações sobre rochas cristalinas e descontinuidades. Isso se deve ao fato de que o talude investigado se trata de uma rocha ígnea, mais especificamente uma rocha granítica, composta essencialmente por quartzo e feldspato. Dessa forma, os parâmetros atribuídos foram as características da rocha, o grau de descalçamento e o grau de alteração. Já em relação à descontinuidade, pontou-se o tamanho do bloco, o número de famílias, a persistência/orientação das descontinuidades, a abertura e o grau de alteração, além do atrito.

Por fim, para classificar as informações de tráfego, foram utilizadas as mesmas informações obtidas para o método RHRS original, não considerando a pontuação dada ao número de acidentes no local. Isso se deve ao fato de não ser possível encontrar o histórico de acidentes com queda de blocos na rodovia, o que torna o parâmetro incerto.

5.3.3 GOMES (2009)

Assim como o método do RHRS, Gomes (2009) propõe uma tabela mais enxuta para avaliar o perigo de quedas de blocos. Utiliza-se oito parâmetros que permitem calcular o Índice de Queda de Blocos, que retrata a susceptibilidade do trecho quanto ao problema de quedas. O índice é dado pela Equação (5).

A pontuação dada ao parâmetro de altura de talude (H) teve seus valores modificados para se adequar aos taludes das rodovias capixabas. Portanto, no método proposto, o talude que antes era considerado até 30m agora recebe a pontuação máxima quando atinge 24,0m.

A efetividade da área de captura segue o mesmo conceito dos métodos anteriores, sendo acrescentado apenas os aspectos geométricos de Ritchie (1963), que são obtidos através do ábaco proposto pelo autor (Figura 7).

Tanto o risco ao veículo quanto a distância de visibilidade foram pontuados e levantados de acordo com o método original, sem necessidade de alteração. O índice de largura de pavimento, apesar das alterações feitas para se adequar aos valores de referências determinados a partir das normas e diretrizes adotadas pelo DNIT e DER-ES, obteve a mesma pontuação dada no método RHRS original.

O tamanho dos blocos também apresenta a mesma pontuação quando comparado ao método original, porém há uma maneira diferente no modo como são calculados. Enquanto no RHRS o tamanho é dado pelo bloco in situ, Gomes (2009) utiliza as equações propostas por Palmström (1995) para estimar o tamanho dos blocos.

A condição climática, assim como para as outras metodologias, baseia-se na precipitação anual acumulada média. Por fim, as características geológicas, que nesse caso recebem peso 2, são pontuadas de acordo com o índice Slope Mass Rating (SMR), proposto por Romana (1985).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Características geológico-geotécnicas do talude

Dado o Complexo Bação, os minerais predominantes nas rochas que o compõe são o quartzo e os plagioclásios, que se alternam em faixas de enriquecimento, ora maior em quartzo, ora maior em plagioclásio (FIGUEIREDO *et al.*, 2004). Essas características são possíveis de serem observadas na Figura 13, que é uma amostra de mão coletada durante o campo. Dessa forma, pode-se considerar que o talude é composto por granitoide.



Figura 13 - Amostra de mão do granitoide em estudo.

6.1.1 Estimação da resistência da rocha intacta

Para estimar a resistência da rocha intacta foram realizados o teste do martelo do geólogo e o ensaio por meio do Esclerômetro de Schmidt. O teste do martelo possui maior facilidade de execução por depender apenas do martelo e de observações visuais, mas em contrapartida, pode haver mais erros devido à sua subjetividade. O ensaio realizou-se com o auxílio da Tabela 1, e o resultado obtido é apresentado na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 - Resistência à compressão uniaxial estimada a partir do teste do martelo de geólogo

Teste do martelo do geólogo	
Grau	R4
Descrição	Rochas resistente
Característica	Espécimes de mão requerem alguns golpes do martelo para serem quebrados; bordas dos fragmentos dificilmente quebradas pelas mãos; superfície dificilmente riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo
Resistência à compressão uniaxial	50 a 100 MPa

Já para estimar a resistência à compressão uniaxial por meio do Esclerômetro de Schmidt, utilizou-se as técnicas descritas previamente. Houveram locais em que o acesso estava difícil, não sendo possível se posicionar da maneira adequada e, portanto, foram pontos em que o número de rebotes obtido foi desprezado. Para cada ponto de amostragem foram realizados testes e a dureza de Schmidt (R_N), foi dado pela média final dos pontos amostrados. Dessa forma, a média da dureza de Schmidt (R_N) obtida foi 57.

Nesse caso, é necessário correlacionar a dureza de Schmidt R_N , obtidos por meio do equipamento tipo N, com o dureza de Schmidt R_L (obtidos por meio do equipamento tipo L), que são utilizados nas equações que resultam na resistência à compressão, por meio da Equação (11), dada por Aydin & Basu (2005). Segundo Santos (2015), esses tipos de equação são muito utilizados uma vez que esclerômetros do tipo L não são mais fabricados.

$$R_N = 1,064 R_L + 3,3673 \quad (11)$$

Ainda segundo Aydin & Basu (2005), para rochas graníticas, a resistência à compressão da rocha (σ_c) em relação ao número de rebotes de Schmidt é dada pela Equação (12).

$$\sigma_c = 1,45 \times e^{0,07R_L} \quad (12)$$

Logo, os resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial dada pelo ensaio realizado são dados pela Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial pelo ensaio do Esclerômetro de Schmidt

Teste do Esclerômetro de Schmidt	
R_L	50
Resistência à compressão uniaxial	48 MPa

6.1.2 Definição das famílias de descontinuidades

Através do *software Dips v.5* da *Rocscience Inc.* e dos pontos coletados nos levantamentos de campo, foi possível concluir que o talude possui quatro famílias de descontinuidades, conforme Figura 14. A Tabela 17 mostra a orientação média das famílias de descontinuidades, apresentada por mergulho/direção de mergulho (dip/dip direction), também obtidas no *Dips*.

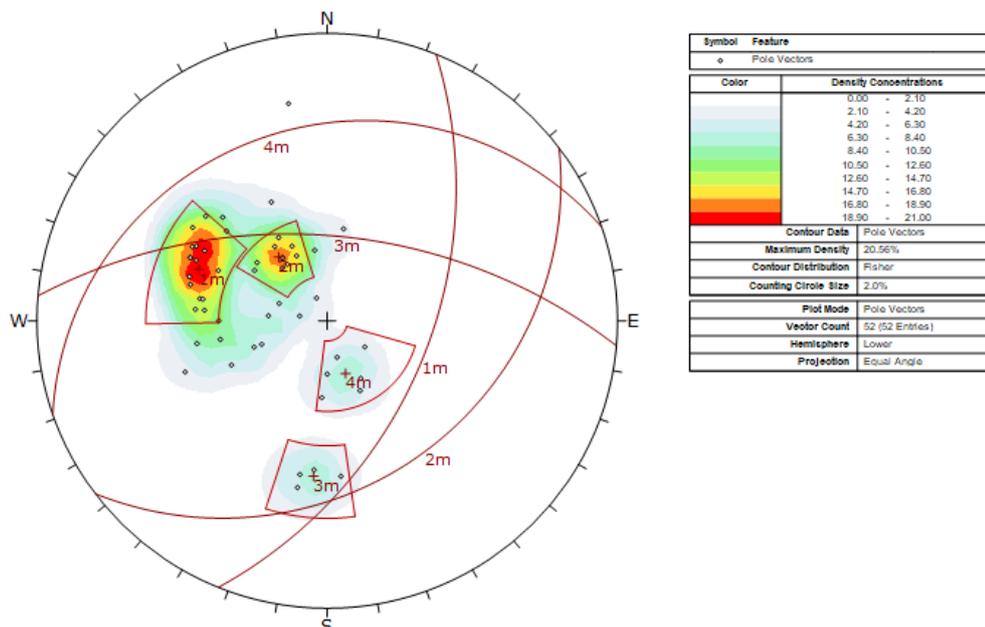


Figura 14 - Famílias de descontinuidades do talude dadas pelo *Dips*.

Tabela 17 - Orientação média das famílias de descontinuidades.

Família de descontinuidade	Orientação média
Família 1	51/111
Família 2	31/143
Família 3	57/5
Família 4	21/335

Das quatro famílias encontradas, uma delas é bem marcada e pode ser visualizada apenas com observação a olho nu, conforme Figura 15. A figura em questão representa um ponto do talude onde houve facilidade de coletar os dados necessários para caracterização do mesmo, apesar da vegetação estar presente em abundância.



Figura 15 - Descontinuidades em evidência no talude em estudo.

A Figura 16 abaixo mostra outra evidência das famílias de descontinuidades. Na imagem é possível observar que nesse ponto já existem blocos formados, com potenciais riscos de queda. Além disso, o grau de descalçamento da rocha e a presença de vegetação também ficam em evidência.



Figura 16 - Famílias de descontinuidades do talude rochoso.

Outras características referentes às famílias de descontinuidades são encontradas na Tabela 18 abaixo.

Tabela 18 - Condição das descontinuidades no talude.

	Família 1	Família 2	Família 3	Família 4
Abertura	2mm	< 1mm	< 1mm	<1mm
Rugosidade	Rugoso JRC = 4 - 6	Rugoso JRC = 6 - 8	Rugoso JRC = 8 - 10	Rugoso JRC = 12 - 14
Preenchimento	Sem preenchimento	Sem preenchimento	Sem preenchimento	Sem preenchimento
Alteração	Pouco alterada	Pouco alterada	Pouco alterada	Pouco alterada

6.2 Análise de perigo de queda de blocos

Para pontuar os parâmetros de maneira assertiva, deve-se primeiro padronizar alguns índices que servirão de base para o cálculo.

Foram encontrados para a face do talude global os ângulos de 83/205 e definiu-se que a altura média a ser considerada do talude é 22,7 m, de acordo com a Silva (2016). A área de captação, por não ser homogênea na extensão do talude, não possuir nenhum bloqueio de segurança e pelo talude estar localizado próximo à uma curva, foi considerada como limitada e será obtida por meio do ábaco de Ritchie (1963).

O risco médio ao veículo é dado pela Equação (2) e (11) e dessa forma, tem-se:

$$V_{2022} = 6.459 \times (1 + 0,42)^{14} \therefore V_{2022} = 875.391$$

$$\text{Tráfego médio diário} = \frac{875.391}{24} \therefore \text{Tráfego} = 36.474,6 \text{ (carros/hora)}$$

$$RMV = \frac{36.474,6 \text{ (carros/hora)} \times 0,1 \text{ (km)}}{60 \text{ (km/h)}} \times 100 \therefore RMV = 6.079,0\%$$

Já a distância de visibilidade foi calculada de acordo com a Equação (3), ponderando a distância de projeto, por meio da Tabela 14, para 60 km/h. Assim:

$$DV = \frac{44,09}{171,5} \times 100 \therefore DV = 25,7\%$$

A largura de pavimento/pista, que é a extensão da faixa pavimentada desde o acostamento até a linha central da rodovia, tem sua medida alterada, pois como trata-se de uma curva, o acostamento tende a se afunilar. Dessa forma, foi utilizada a largura de pavimento média, sendo LP = 9,91m.

Outro fator a ser considerado nas análises das metodologias é referente à chuva/presença de água no talude. Para esses casos, adotou-se a precipitação anual média encontrada para a cidade de Itabirito, que é de 1.420mm.

As outras características serão analisadas de acordo com a metodologia e os parâmetros utilizados, sendo apresentados os resultados no final de cada tópico.

6.3.1 RHRS

O método original RHRS é de fácil aplicabilidade mas muito subjetivo. Grande parte dos parâmetros pontuados são referentes as observações realizadas no campo e podem variar muito de acordo com o geotécnico que executa os levantamentos.

Para o desenvolvimento desse trabalho, foram necessárias adaptações para a aplicabilidade da metodologia uma vez que existem dados que não possuem controle ativo, principalmente os históricos de queda de blocos. Dessa forma, a tabela original deu espaço para a Tabela 19, reduzida aos parâmetros que foram possíveis coletar.

Tabela 19 – Parâmetros utilizados para pontuação utilizando o RHRS original.

Categoria		Critérios e pontuação				
		3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos	
Altura do talude		7,5m	15,0m	22,5m	30m	
Efetividade da área de captação		Boa captura	Captura moderada	Captura limitada	Sem captura	
Risco médio ao veículo		25% do tempo	50% do tempo	75% do tempo	100% do tempo	
Porcentagem da distância de visibilidade		100% Distância de visibilidade adequada	80% Distância de visibilidade moderada	60% Distância de visibilidade limitada	40% Distância de visibilidade muito limitada	
Largura da rodovia		13,2 m	10,8 m	8,4 m	6,0 m	
Característica geológica	Classe I	Condição estrutural	Fraturas descontínuas, com orientação favorável	Fraturas descontínuas, com orientação aleatória	Fraturas descontínuas, com orientação adversa	Fraturas contínuas, com orientação adversa
		Atrito nas descontinuidades	Rugoso, irregular	Ondulado	Planar	Preenchimento argiloso ou polido
Tamanho do bloco Volume de queda		0,30m 2,3m³	0,60m 4,6m³	0,90m 6,9m³	1,20m 9,2m³	
Clima e presença de água no talude		Baixa a moderada precipitação, sem a presença de neve, sem água no talude	Moderada precipitação ou curto período de neve ou baixa presença de água no talude	Alta precipitação ou longo período de neve ou água no talude contínua	Alta precipitação e longo período de neve ou água no talude contínua e longo período de neve	

Trata-se de um talude extenso, que se encontra em uma curva e há diferença na largura do pavimento quando analisada toda sua extensão, o que justifica o uso da largura média do pavimento. Além disso, é considerado um talude alto, com problemas em relação à efetividade da área de captação.

Para alguns parâmetros, foi necessário a ponderação da pontuação para que o valor final obtido seja mais representativo. Assim, a pontuação final obtida para o talude é mostrada na Tabela 20.

Tabela 20 - Pontuação final para o talude de acordo com o RHRS original.

Categoria	Valor obtido	Pontuação
Altura do talude	22,7m	$F_{AT} = 28,4$
Efetividade da área de captação	Captura limitada	$F_{AC} = 27,0$
Risco médio ao veículo	6.079,0%	$F_{RMV} = 81,0$
Porcentagem da distância de visibilidade	25,7%	$F_{DV} = 81,0$
Largura da rodovia	9,91m	$F_{LP} = 15,7$
Condição estrutural	Fraturas descontínuas, com orientação aleatória	$F_{CG} = 12,0$
Atrito nas discontinuidades	Rugoso, irregular	
Tamanho do bloco Volume de queda	1m 0,765 m ³	$F_{DM} = 21,0$
Clima e presença de água no talude	Baixa a moderada precipitação, sem a presença de neve, sem água no talude	$F_{CC} = 3,0$
Total		$F_{QB} = 269,1$

6.3.2 CRHRS

O CRHRS é o método mais minucioso dentre as metodologias escolhidas para análise de aplicabilidade. Além disso, algumas variáveis são características do Colorado – Estados Unidos e assim como no RHRS, possui variáveis que dependem de monitoramento constante, como a variável que se relaciona a ocorrências e acidentes causados por quedas de blocos, sendo que em muitos locais, incluindo o Brasil, esse monitoramento nem sempre ocorre e caso ocorra, não há plena divulgação dos dados.

Devido à característica da rocha (rocha cristalina) e também à falta de alguns elementos para pontuação, a tabela original foi reduzida à Tabela 21. Dessa forma, apenas os parâmetros de interesse foram selecionados, a fim de tornar a metodologia mais precisa.

Tabela 21 - Parâmetros utilizados para pontuação utilizando o CRHRS.

Categoria		Critério e pontuação				
		3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos	
Talude	Altura do talude	7,5 a 15m	15 a 23m	23 a 30m	>30m	
	Escore da inclinação do talude	0 a 2	2 a 4	4 a 8	>8	
	Feições de lançamento	Nenhuma (inclinação suave)	Pequena (<0,6m de variação da superfície)	Alta (variação de superfície de 0,6 a 1,8m)	Extrema (> 1,8m de variação da superfície)	
	Área de captação	95% a 100% / classe 1	65% a 94% / classe 2	30% a 64% / classe 3	< 30% / classe 4	
Clima	Precipitação anual	< 250mm	250 a 500mm	500 a 900mm	>900mm	
	Presença de água	Seco	Úmido/molhado	Gotejamento	Fluxo de água	
	Aspecto do talude	N	E, W, NE e NW	SE e SW	S	
Características geológicas	Rocha cristalina	Característica da rocha	Homogêneo/maciço	Pequenas falhas/veios fortes	Zonas de cisalhamento de xisto <15cm	Pegmatito fraco/micas/zonas de cisalhamento >15cm
		Grau de descalçamento	0 a 0,3m	0,3 a 0,6m	0,6 a 1,2m	>1,2m
		Grau de alteração	Fresca	Coloração de superfície	Ligeiramente alterado/suavizado	Alterações internas (core stones)
	Descontinuidade	Tamanho/volume do bloco	< 0,3m / <0,75m ³	0,3 a 0,6m / 0,75 a 2,3 m ³	0,6 a 1,5m / 2,3 a 7,6m ³	> 1,5m / > 7,6m ³
		Número de famílias	1	1 principal + aleatórias	2	> 2
		Persistência, orientação	< 3m mergulhando para dentro do talude	> 3m cortando o talude	< 3m mergulhando para fora do talude	> 3m mergulhando para fora do talude
		Abertura	Fechada	0,1 a 1mm	1 a 5mm	> 5mm
		Grau de alteração	Rocha sã	Descoloração na superfície da rocha	Preenchimento granular	Preenchimento argiloso
		Atrito	Rugoso	Ondulado	Planar	Polida
		Tráfego	Distância de visibilidade	> 80%	60% a 80%	40% a 60%
Risco médio ao veículo	0 a 24%		25 a 49%	50 a 74%	75% ou mais	

No CRHRS, o escore da inclinação do talude é dado através do Ábaco de Maerz *et. al* (2005) e a efetividade da área de captação é dada através da comparação das dimensões reais e as dimensões sugeridas por meio do ábaco de Ritchie (1963). Para encontrar o escore da inclinação utilizou-se o ábaco mostrado na Figura 17 e para as dimensões recomendadas por Ritchie utilizou-se o ábaco mostrado na Figura 18.

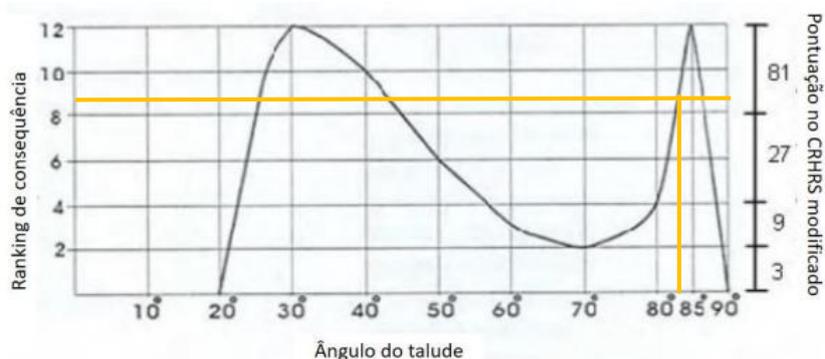


Figura 17 - Ábaco de Maerz et al. (2005) para dados do talude.

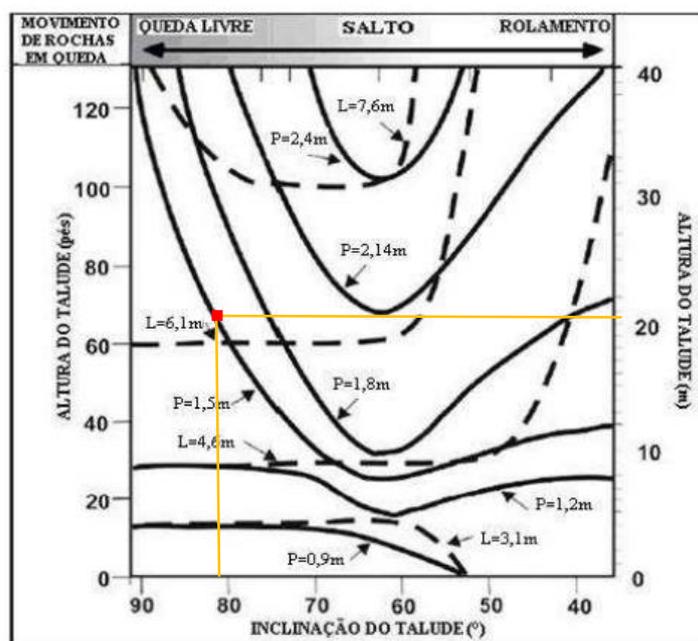


Figura 18 - Ábaco de Ritchie para dados do talude.

A Tabela 22 mostra os resultados obtidos através do ábaco e as medidas reais coletadas em campo.

Tabela 22 - Resultados obtidos para área de captação.

	Largura de acordo com o Ábaco de Ritchie - W_r	Profundidade de acordo com o Ábaco de Ritchie - D_r	Largura real medida - W_m	Profundidade real medida - D_m
Talude	6,1 m	1,5 m	3,20 m	0,30 m

Com o resultado em mãos, utiliza-se a Equação (4). Dessa forma:

$$Eficácia da área de captação = \frac{(0,30 + 3,20)}{(1,5 + 6,1)} \times 100 \quad \therefore \quad AC = 46,0\%$$

Por fim, com os dados calculados e as observações obtidas em campo, o talude foi pontuado de acordo com suas características. Os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Pontuação final para o talude de acordo com o CRHRS.

	Categoria	Valor obtido	Pontuação
Talude	Altura do talude	22,7m	AT = 9,0
	Escore da inclinação do talude	83° = >8	IT = 81,0
	Feições de lançamento	Pequena (pequenas variações topográficas no perfil do talude)	FL = 9,0
	Área de captação	46,0%	AC = 27,0
Clima	Precipitação anual	Precipitação média anual moderada - 1.420mm	Precip. = 81,0
	Presença de água	Seco	Água = 3,0
Rocha cristalina	Característica da rocha	Homogêneo/maciço	CR = 3,0
	Grau de descalçamento	0,3 a 0,6m	Descalç. = 3,0
	Grau de alteração	Fresca	Alt. = 3,0
Descontinuidade	Tamanho/volume do bloco	1m	Tamanho = 27,0
	Número de famílias	> 2	Famílias = 81,0
	Persistência, orientação	< 3m mergulhando para fora do talude	Persist. = 27,0
	Abertura (média)	3 mm	Abert. = 27,0
	Grau de alteração	Rocha sã	Alt. Descont. = 3,0
	Atrito	Rugoso	Atrito = 3,0
Tráfego	Distância de visibilidade	25,7%	DV = 81,0
	Risco médio ao veículo	100% do tempo ou mais	RMV = 81,0
Total			549,0

6.3.3 GOMES (2009)

Assim como as outras metodologias abordadas, Gomes (2009) traz essa adaptação para que se torne uma ferramenta de gestão rodoviária. Para isso, ele adaptou o RHRS original de acordo com as características dos locais estudados e, portanto, nenhuma alteração foi feita na Tabela 10.

Ainda segundo o Gomes (2009), as quedas de blocos em taludes de cortes rochosos nas rodovias capixabas são condicionadas pelo padrão e orientação das descontinuidades, deflagrados principalmente por eventos pluviométricos.

A fim de utilizar o método proposto, é necessário aplicar o Slope Mass Rating, proposto por Romana (1985), da rocha analisada. Dessa forma, deve-se utilizar primeiramente a Tabela 12 para determinar o RMR e posteriormente, a Tabela 11 para determinar os fatores F1 a F4 e por fim, a Equação (8) para obter o SMR.

Os valores dos fatores foram atribuídos em relação à tombamento (tipo de ruptura) e à família crítica (orientação média das famílias 1 e 2). Dessa forma, foram considerados $\alpha_j = 41$, $\alpha_s = 83$, $\beta_j = 127$ e $\beta_s = 205$.

Os resultados encontrados encontram-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados RMR e SMR.

	RMR	F1	F2	F3	F4	SMR
Talude	69	0,15	1	-25	-8	57

Para o tamanho dos blocos, não foi possível aplicar a Equação (6) proposta por Palmström (1995), pois na metodologia adotada por Gomes (2009) foram encontradas menos de 3 famílias de descontinuidades, o que não é o caso desse trabalho. Dessa forma, o tamanho dos blocos adotado foi o mesmo que das outras metodologias, ou seja, utilizando blocos na superfície.

A pontuação final encontrada por meio da metodologia proposta por Gomes (2009) encontra-se na Tabela 25.

Tabela 25 - Pontuação final para o talude de acordo com o Gomes (2009).

Categoria	Valor obtido	Pontuação
Altura do talude	22,7m	$I_{AT} = 69,3$
Efetividade da área de captação	Captura limitada + não-conformidade com o ábaco de Ritchie	$I_{AC} = 27,0$
Risco médio ao veículo	100% do tempo	$I_{RV} = 81,0$
Porcentagem da distância de visibilidade	25,7%	$I_{DV} = 81,0$
Largura do pavimento	9,91 m	$I_{LP} = 15,7$
Dimensão do bloco	1m	$I_{DB} = 45,0$
Condição climática	Precipitação média anual moderada - 1.420mm	$I_{CC} = 27,0$
Característica geológica (SMR)	51,0	$I_{CG} = 2 * 75,6$
	Total	$I_{QB} = 497,2$

6.3 Comparativo da aplicabilidade das metodologias utilizadas

Os métodos apresentados são ferramentas de avaliação do perigo de queda de blocos, que são aplicados de maneira qualitativa, a fim de hierarquizar taludes quanto à necessidade de intervenção e/ou manutenção. Dessa forma, é importante salientar que nenhum dos métodos classifica os taludes quanto à probabilidade de risco do evento de quedas de blocos acontecer.

Ao comparar o RHRS, CRHRS e a adaptação feita por Gomes (2009), pode-se perceber resultados diferentes para cada metodologia, sendo atribuídas as notas 269,1, 549,0 e 497,2, respectivamente. Para analisar a diferença entre esses resultados, é preciso entender que cada método é proveniente de uma região diferente, ou seja, ele busca se adaptar às condições de um determinado ambiente. Dessa forma já se pode julgar que os métodos, na sua forma original, não são 100% compatíveis com o local de estudo do atual trabalho.

Os métodos RHRS e de Gomes (2009) são semelhantes, se considerada a quantidade de parâmetros a serem pontuados (no caso, 8). Entretanto, se diferem principalmente quando comparadas a efetividade da área de captação, que utiliza o ábaco de Ritchie, as condições climáticas, que considera a precipitação média anual e principalmente, as características geológicas, que recebem peso 2 por ter maior influência nos processos de instabilidade quanto às quedas de blocos e são melhores definidas quando utilizado o SMR para sua pontuação. Essas alterações retiram a subjetividade do RHRS dos índices e os tornam os parâmetros de Gomes (2009) mais assertivos.

O CRHRS também foi modificado para remover a subjetividade dos parâmetros, e a grande diferença do resultado obtido se deve ao incremento dos parâmetros pontuados, que no caso desse trabalho, foram 18 (10 a mais do que nas outras metodologias). Dessa forma, é possível considerar que o CRHRS e a proposta de Gomes (2009) são as metodologias mais completas em razão dos parâmetros geológicos, que são analisados separadamente. Esse fato gera uma pontuação maior, e, nesse caso, mais assertiva.

Um fato que foi possível constatar em todas as metodologias é que o principal agente responsável pela subjetividade da aplicação são os geotécnicos que realizam o levantamento e análise dos dados. Um exemplo é que Silva (2016) também analisou o talude escolhido para o desenvolvimento desse trabalho, utilizando a metodologia de RHRS, e encontrou como resultado 281,4. Além da diferença do observador, ele buscou adaptar o método à Rodovia 356, assim como Gomes (2009) propôs para as rodovias capixabas.

É preciso salientar que apesar de serem métodos pensados para facilitar e prover uma análise mais rápida à condição do talude, existem algumas dificuldades que devem ser consideradas para aplicabilidade dos mesmos. Primeiramente, é preciso entender bem o conceito dos parâmetros e ter os equipamentos corretos e necessários para os levantamentos de campo. Taludes altos podem se tornar um obstáculo para a coleta de dados; a distância de visibilidade pode expor o geotécnico aos perigos da rodovia e por fim, o histórico e a frequência de quedas de blocos nas rodovias não possuem bancos de dados, ou seja, não são registrados e armazenados, o que afeta consideravelmente as metodologias.

Considerando os resultados encontrados, as dificuldades do levantamento de campo e a percepção da autora, o método proposto por Gomes (2009) foi o que obteve

maior destaque quanto à sua aplicabilidade ao talude estudado. É um método que está relacionado às características do Brasil, e apresenta uma grande vantagem que é o uso do SMR para as características geológicas. O CRHRS, por sua vez, quando adaptado às condições da região em estudo, também é vantajoso por pontuar separadamente as condições gerais do talude, as descontinuidades e a rocha intacta. Em contrapartida, se considerado a metodologia na íntegra, ela não se eficaz pois considera as características do Colorado.

Por fim, o RHRS apesar de ser um método mais enxuto, deixa a desejar quanto à classificação geológica do talude, e por isso, é considerado o método menos assertiva dentro das metodologias estudadas.

7 CONCLUSÃO

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram realizadas basicamente três etapas: a escolha das metodologias através da literatura, os levantamentos de campo e a etapa de escritório. Essa última etapa teve o objetivo de pontuar os parâmetros de acordo com os dados coletados por meio da análise individual de cada parâmetro, a fim de evitar erros que a análise direta no campo poderia causar. É necessário inferir os dados e checar se estão de acordo com a realidade encontrada na região.

Houveram dificuldades na obtenção de alguns dados, como a altura do talude e a variabilidade dos parâmetros da rodovia devido à extensão do talude. Outro fator importante é que assim como para Silva (2016), também houveram dificuldade para expressar a qualidade de um maciço através de um único índice, como previsto nas metodologias utilizadas, devido às diferentes estruturas encontradas, materiais, condições adversas, etc., o que pode comprometer a precisão dos resultados.

Os maiores problemas encontrados no talude estão relacionados ao risco médio ao veículo (RMV) e à distância de visibilidade (DV) do usuário da via, que receberam pontuação máxima nas três metodologias utilizadas para análise. É preciso lembrar que a Rodovia dos Inconfidentes – BR356 é uma importante rodovia federal com tráfego intenso, então é admissível indicar que em caso de evento de queda de blocos, haverá mais de um veículo na extensão considerada do talude em um determinado momento. Além disso, a geometria do talude também justifica os riscos, pois ele está inserido no

início de uma curva com faixa bem estreita de acostamento, o que compromete a segurança do usuário da via e de um veículo que precise utilizar o acostamento neste local.

Como sugestão de melhorias para o trecho analisado propõe-se a alteração da geometria da via, a remoção de blocos que estão na iminência de queda e análise sistemática das condições de estabilidade do maciço. Em relação a geometria, medidas devem ser levantadas durante a análise de projetos de conservação, recuperação e manutenção de rodovias a fim de viabilizar adequar as áreas de captação de blocos, alargando o acostamento. Já a análise sistemática visa indicar a probabilidade de ruptura do talude e associado ao diagnóstico geomecânico do talude, pode evitar transtornos futuros.

Quanto as metodologias utilizadas, é fundamental lembrar que quanto mais baixa a pontuação menor a chance de ruptura. No caso do RHRS e proposta de Gomes (2009), é feita uma análise através da pontuação atribuída ao talude: caso esta seja inferior a 300, considera-se a chance baixa e com isso, também a prioridade de atuação. No caso de ser superior a 500 o perigo de queda é elevado e devem ser tomadas medidas de caráter urgente (Pierson & Van Vickle, 1993; Hoek, 2007). Já no caso do CRHRS, a versão classifica os taludes de forma completamente diferente das pontuações originais, sendo a principal diferença causada pela ênfase nos parâmetros climáticos e geológicos no novo sistema.

A aplicabilidade de metodologias para analisar o perigo de queda de blocos em taludes se mostrou efetiva para identificar os taludes com necessidade de intervenção e também, é eficaz quando se trata da hierarquização dos mesmos. De maneira geral, essas metodologias demonstram facilidade em sua aplicação mas para que seja de fato efetiva, é preciso adequar os parâmetros observados à realidade das rodovias mineiras.

Além de adequar os parâmetros para as rodovias mineiras é preciso criar um banco de dados que conste o histórico de queda de blocos. O banco de dados permite que o geotécnico ou investigador tenha informações cruciais para a análise de um talude. Gomes (2009) propõe que dentre essas informações poderiam estar presentes a estimativa do volume do bloco após a queda, a distância percorrida pelo bloco, a presença de feições de lançamento no talude, o período da queda, a coincidência com eventos pluviométricos,

etc. Esses são dados que embasariam melhor a ferramenta de avaliação de perigo, e que não foram abordados nesse trabalho devido à ausência de registros.

Sabendo da efetividade das metodologias, cabe aos órgãos responsáveis investimentos a fim de consolidar uma análise exclusiva e efetiva às rodovias mineiras. Dessa forma, será possível ampliar os estudos com o propósito de hierarquizar os taludes rodoviários e gerenciar informações e recursos que visem a manutenção e melhorias das vias de tráfego.

REFERÊNCIAS

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro. Anais, 1992. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PCRJ. V.2. p. 691-704.

AYDIN, A.; BASU, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*. V. 81 p.1 –14.

BALTAZAR, O.F. ZUCCHETTI, M.; 2005. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 62 p.

BARTON, N. CHOUBEY, V. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*, 1977, 10, 1-65.

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

BONUCCELLI, T. Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos da área urbana de Ouro Preto - MG. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Área de Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

BOZZOLO, D., PAMINI, R., 1986. Simulation of rockfalls down a valley side. *Acta Mechanica*, v. 63 p.13-130.

BUDETTA, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazard and Earth System Sciences* 4: 71-81.

CARVALHO, P. A. S. Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. 1991. São Paulo. IPT. 410 p.

CREA – PR. Comportamento geotécnico de encostas. 2017. Disponível em: <<https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/comportamento-geotecnico-das-encostas.pdf>>.

DER-MG - Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (2008). Relatório de Volume Médio Diário Anual de Tráfego – VMDAT. Disponível em: <<http://www.der.mg.gov.br/saiba-sobre/rodovias/699-volume-medio-diario-anual-de-trafego>>.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). Manual de estudos de tráfego. - Rio de Janeiro, 384 p. (IPR. Publ., 723).

ESTEVES, L. L. S. Simulação do processo de queda de blocos em taludes da serra do Itacolomi. 2018. 110 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

FELL, R; COROMINAS, J; BONNARD, C; CASCINI, L; LEROI, E; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* v.102, 2008, p.85–98.

- FIGUEIREDO, M. A. et al. Alteração superficial e pedogeomorfologia no sul do Complexo Bação - Quadrilátero Ferrífero (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 713-729, 2004.
- FIORI, A. P. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Oficina de Textos, 2016.
- FIORI, A. P. & CARMIGNANI, L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 2ª edição, Editora de UFPR, 2009.
- FU, H., CHEN H., FU, J. *Rock Mechanics and Engineering: Prediction and Control of Landslides and Geological Disasters*. 1ª edição, Elsevier, 2020.
- GEOLOGICAL SOCIETY. 1977. The description of rock masses for engineering purposes. Engineering group working party.
- GIANI, G. P. *Rock slope stability analysis*. CRC Press, 1992.
- GOMES, J. C. Avaliação do perigo relacionado à queda de blocos em rodovias. 2009. 138 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- HOEK, E. *Practical Rock Engineering*. Edition by Dr. E. Hoek, 2000, 328p.
- HUDSON, J.A.; HARRISON J.P. (1997). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. ELSEVIER SCIENCE Ltd Oxford,UK.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS - ISRM (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring*. E.T.Brown, 211 p.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS - ISRM. Métodos para Descrição Quantitativa de Descontinuidades em Maciços Rochosos. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Comitê Brasileiro de Mecânica de Rochas, Tradução 12, 1983. 132 pp
- MAERZ, N.H.; Youssef A., Fennessey, T.W. 2005. New Risk-Consequence Rockfall Hazard Rating System For Missouri Highways Using Digital Image Analysis. *Environmental And Engineering Geoscience* 11, 229–249 2005.
- MOHAMAD, E. T., SAAD, R., & ABAD, S. V. A. N. K. (2011). Durability assessment of weak rock by using jar slaking test. *Electron J Geotech Eng*, 16, 1319-1335.
- PALMSTRÖM, A. (1995). Rmi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes. PhD thesis, Oslo University, Norway, 400p.
- PIERSON, L. A., GULLIXON, G. F., CHASSIE, R. G. (2001). *Rockfall Catchment Area Design Guide Final Report*. SPR-3 (032). Technical Report Form DOT F 1700.7. Oregon, U. S.
- PIERSON, L. A.; VAN VICKLE, R. (1993). *Rockfall Hazard Rating System*, Transportation Research Record N° 1343, National Research Board, Washington, D.C., pp 6-19.
- RITCHIE, A. M. (1963). *Evaluation of rockfall and its control*. U. S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, and the Washington State Highway Commission.

ROMANA, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. International Symposium on the Role of Rock Mechanics, Zacatecas, pp. 49-53.

RUSSEL, C. P.; SANTI, P; HIGGINS, J. D. 2008. Modification and Statistical Analysis of The Colorado Rockfall Hazard Rating System. Colorado School of Mines. Golden – Colorado. 137p

SÁ JÚNIOR, A. (2009). Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais. 101 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

STANDARDS AUSTRALIA. Risk management. AS/NZS 4360-2004. 2004.

SANTI, P. M. et al. Modification and statistical analysis of the Colorado rockfall hazard rating system. Engineering Geology, v. 104, n. 1-2, p. 55-65, 2009.

SANTOS, T. B. Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação de propriedades dos maciços rochosos. 2015. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SANTOS, T. B. Análise de risco geotécnico em taludes rochosos de mina com uso de técnicas estatísticas multivariadas e de aprendizado de máquina. 2019. 106 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

SILVA, L. C. Aplicação do sistema de avaliação de perigo “Rockfall Hazard Rating System” (RHRS) aos taludes da BR-356/rodovia dos Inconfidentes, MG. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SILVEIRA, L. R. C. Avaliação do perigo de queda de blocos em taludes urbanos e ferroviários e simulação de sua trajetória. 2017. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SILVEIRA, L. R. C. Proposta de sistema de análise de risco para queda de blocos em taludes rodoviários. 2022. 152 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. Special report, v. 176, p. 11-33, 1978.

VITALI, O. P. M., CELESTINO, T. B., BORTOLUCCI, A. A. Avaliação dos efeitos de borda em ensaios de compressão uniaxial a partir de resultados experimentais e simulações numéricas. Anais, 2012.