

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/762

Proposta de Metodologia Para Avaliação Integrada de Riscos em Taludes Devido a Instabilidades e Deslizamentos

Jhoan Sadith Paredes Panitz

Geólogo, TEC3, Belo Horizonte, Brasil, jpanitz@tec3engenharia.com.br

Fernando Portugal Maia Saliba

Engenheiro Civil, Belo Horizonte, Brasil, fsaliba@tec3engenharia.com.br

Lia Nogueira Garpelli

Geóloga, TEC3, Belo Horizonte, Brasil, lgarpelli@tec3engenharia.com.br

RESUMO: A identificação das áreas de risco tem por objetivo auxiliar o processo de setorização de regiões mais susceptíveis à ocorrência ruptura dos taludes, permitindo apontar, medidas para garantia da segurança geotécnica dos mesmos. A metodologia fundamenta-se em um método semi-quantitativo o qual atribui pesos à descrição qualitativa da probabilidade e das consequências, visando calcular o risco. A definição da probabilidade de ocorrência de um determinado evento geotécnico é realizada mediante o cálculo do índice de frequência (IF), que permite ponderar as avaliações semi-quantitativas das características e condições geotécnicas, hidráulicas e hidrogeológicas, bem como as condições dos próprios taludes. Por meio de uma categorização, é possível determinar a probabilidade de ocorrência do evento em questão. Para auxiliar na determinação das consequências, emprega-se a metodologia de *checklist* (Hamman, 2009), na qual são utilizadas questões específicas para avaliar o impacto de uma possível ruptura dos taludes sobre as estruturas ou pessoas diretamente afetadas. Esse questionário inclui itens de avaliação que permitem ponderar o grau de vulnerabilidade do elemento avaliado e antecipar suas prováveis consequências. O risco é definido com base na multiplicação da probabilidade do evento e suas consequências, sendo classificado em uma escala que varia de risco baixo a risco extremo.

PALAVRAS-CHAVE: Probabilidade, Consequência, Risco, Taludes.

ABSTRACT: The identification of risk areas aims to assist in the process of zoning regions more susceptible to slope failure, allowing for the identification of measures to ensure their geotechnical safety. The methodology is based on a semi-quantitative method that assigns weights to the qualitative description of likelihood and consequences, aiming to calculate risk. The definition of the likelihood of occurrence of a specific geotechnical event is determined by calculating the frequency index (FI), which allows for weighting semi-quantitative assessments of geotechnical, hydraulic, and hydrogeological characteristics and conditions, as well as the conditions of the slopes themselves. Through categorization, it is possible to determine the probability of the event occurring. To assist in determining the consequences, a checklist methodology is used (Hamman, 2009), which employs specific questions to assess the impact of a possible slope failure on structures or people directly affected. This questionnaire includes evaluation items that allow for weighting the vulnerability degree of the evaluated element and anticipating its probable consequences. Risk is defined based on the multiplication of the event's probability and its consequences, being classified on a scale ranging from low risk to extreme risk.

KEYWORDS: Likelihood, Consequence, Risk, Slopes.

1 INTRODUÇÃO

A identificação das áreas de risco tem por objetivo auxiliar o processo de setorização de regiões mais susceptíveis à ruptura e deslizamentos dos taludes, permitindo apontar eventuais problemas de estabilidade. Ademais, fornece subsídios para minimizar a ocorrência de acidentes, tomando as devidas precauções naquelas áreas onde o risco mostra-se mais iminente, além de auxiliar na definição das estratégias mais adequadas para reparação dos eventuais danos e prejuízos causados às obras de engenharia.

2 METODOLOGIA

A metodologia para determinação dos graus de risco dos taludes está baseada no método semi-quantitativo que aplica pesos ou escalas à descrição qualitativa da probabilidade e consequências para cálculo do risco. A proposta aqui apresentada consiste na superposição de informações relacionadas aos fatores mais determinantes à instabilidade dos taludes para identificação das consequências (impactos) nas estruturas, quantificação da possibilidade de ocorrência, cálculo do risco e posterior setorização.

2.1 Determinação da Probabilidade de Ocorrência

A definição da probabilidade de ocorrência de determinado evento geotécnico específico é realizada através do cálculo do índice de frequência (IF) que leva em consideração avaliações semi-quantitativas (Mavrouli et al. 2019) das características e condições geotécnicas, hidráulicas e hidrogeológicas dos taludes.

O IF é definido a partir de seis indicadores ou critérios de análise que descrevem as características determinantes na possibilidade de geração de eventos geotécnicos. Os seis critérios compreendem em:

- Classificação geotécnica do maciço (I_{RMR}) – com base nos critérios de Bieniawski (2011), o maciço é classificado em termos de sua qualidade geomecânica.
- Aspectos relacionados ao sistema de drenagem superficial (I_{DREN}) - relacionado principalmente com a resistência do material do talude. A ausência, por exemplo, de um sistema para condução da água superficial, poderá comprometer a estabilidade do talude de baixa resistência e eventualmente alto grau de alteração.
- Configuração geométrica e condição geotécnica dos taludes (I_{COND}) – são identificadas as possíveis discordâncias na configuração geométrica dos taludes expostos. Além disso, mediante técnicas de análises cinemáticas, é verificada a presença de estruturas geológicas desfavoráveis às rupturas passíveis de acontecer.
- Condição de desmonte do maciço (I_{DSM}) – são verificadas as condições de fissuramento do maciço remanescente (presença de fendas abertas), existência de blocos pendurados, fogo estendendo-se além da área pré-estabelecida, etc. Neste caso, este critério somente é aplicável para maciços I a IV.
- Condições de segurança dos taludes (I_{SEG}) - são avaliadas as condições dos taludes identificando diversos problemas tais como estado das bermas (largura, ausência de limpeza, etc.), blocos pendurados, taludes negativos, presença de trincas, etc. Dados de inspeções e do monitoramento visual dos taludes podem ser utilizados como fonte de informações.
- Condições dos acessos (I_{ACS}) - são avaliadas as condições dos acessos, identificando diversos problemas tais como largura mínima, grau de curvatura, leiras de proteção, material escorregado que comprometa o trânsito de veículo e de equipamentos de manutenção e inspeção.

A classificação qualitativa da probabilidade de ocorrência é avaliada separadamente para cada ponto mapeado seguindo os critérios e pontuações apresentados na Tabelas 1 a 6.

Tabela 1. (I_{RMR}) Classificação geomecânica ($RMR_{básico}$).

Pontuação	Descrição
1	Maciço classe I-II
2	Maciço classe III
2	Maciço classe IV
4	Maciço classe V, solo e materiais friáveis

Tabela 2. (I_{DREN}) Sistema de drenagem superficial e saturação dos taludes –
 Classe V - Solo.

Pontuação	Descrição
1	Sistema de drenagem implantado em perfeitas condições de uso, talude seco.
2	Sistema de drenagem implantado, mas com pequenas falhas. Surgência de água no pé do talude.
3	Sistema de drenagem deficiente (canaleta e descidas obstruídas). Gotejamento.
4	Sem sistema de drenagem superficial ou ineficiente. Talude com fluxo contínuo de água.

Tabela 3. (I_{COND}) Configuração geométrica e condição geotécnica dos taludes

Pontuação	Descrição
I _{COND-1} Taludes em Classe de Maciço V - Solo	
1	Ângulo de face do talude $\leq 45^\circ$ e altura do talude $\geq 5\text{m}$ e $\leq 10\text{m}$. A direção do talude é desfavorável à formação de rupturas plano circulares ou talude com altura $\leq 5\text{m}$.
2	Ângulo de face do talude $\leq 45^\circ$, e altura do talude $\geq 5\text{m}$ e $\leq 10\text{m}$. A direção do talude é favorável à formação de rupturas plano circulares.
3	Ângulo de face do talude $\geq 45^\circ$ e $\leq 55^\circ$ e altura do talude $\geq 5\text{m}$ e $\leq 10\text{m}$, ou ângulo de face $\leq 45^\circ$ e altura do talude $\geq 10\text{m}$.
4	Ângulo de face do talude $\geq 55^\circ$ e altura do talude $\geq 5\text{m}$, ou ângulo de face do talude $\geq 45^\circ$ e altura do talude $\geq 10\text{m}$.
I _{COND-2} Taludes em Classe de Maciço I a IV	
1	Não existe mecanismo para formar rupturas planar, cunha e tombamento. A direção do talude é favorável à estabilidade. Para Classe IV, o ângulo de face do talude $\leq 55^\circ$. Talude com altura $\leq 5\text{m}$.
2	Existem mecanismos para a formação de pelo menos um tipo de ruptura. Para Classe IV, o ângulo do talude de bancada é $\geq 55^\circ$.
3	Existem mecanismos para a formação de pelo menos dois tipos de ruptura.
4	Várias descontinuidades desfavoráveis. Existe mecanismo para formar três ou mais tipos de ruptura, onde a direção e inclinação do talude são favoráveis à instabilidade.

Tabela 4. (I_{DSM}) Condições do desmonte do maciço - Maciço I a IV

Pontuação	Descrição
1	Desmonte não provoca danos a face e bermas do talude remanescente em área superior a 90% da extensão do talude.
2	Danos leves à face do talude e berma remanescente em área específica não superior a 20% da extensão do talude.
3	Danos de intensidade moderada à face do talude e berma remanescente ou em áreas entre 20% a 40% da extensão do talude.
4	Desmonte provoca grandes danos a face e bermas do talude remanescente - superiores a 40% da extensão do talude.

Tabela 5. (I_{SEG}) Condições de segurança dos taludes

Pontuação	Descrição
1	Taludes limpos, sem blocos soltos, taludes revegetados e sem feições erosivas.
2	Material solto no pé e na crista do talude, evidência de escorregamentos, taludes com vegetação rasteira e com feições erosivas.

Pontuação	Descrição
3	Blocos soltos na face, taludes negativos, material escorregado, com perda de bermas, com feições erosivas e com estruturas de contenção parcialmente danificadas.
4	Taludes negativos, com presença de blocos soltos, com evidências de queda de blocos de rocha dos níveis superiores e presença de trincas. Taludes com feições erosivas, sem estruturas de contenção\proteção ou estruturas de contenção\proteção danificadas.

Tabela 6. (I_{ACS}) Condições dos acessos

Pontuação	Descrição
1	Acesso com largura conforme projeto, limpos, sem presença de blocos e com leiras de proteção.
2	Acesso com largura conforme projeto, porém com alguns trechos com largura inadequada, material solto no pé e blocos rolados. Com leiras de proteção.
3	Largura do acesso inferior ao projetado, escorregamentos de caráter localizado e blocos rolados, com perda de parte do acesso, com leiras de proteção. A área afetada apresenta um sistema de sinais de alerta e isolamento.
4	Perda do acesso, sem sinalização de perigo e alerta. Com presença de blocos soltos e trincas, com evidências de queda de blocos, sem leira de proteção. Existências de escorregamento e rupturas globais, comprometendo o trânsito de veículos e equipamentos de manutenção e inspeção. Presença de irregularidade no acesso.

A partir dos critérios descritos nas Tabela 1 a 6, o IF é dividido em dois grupos. Taludes conformados por classe de maciço V- Solo com o IF definido mediante a equação 1:

$$\text{Índice de frequência}_{\text{classe V}} (IF_V) = \Sigma \frac{I_{RMR} + I_{DREN} + I_{COND.1} + I_{SEG} + I_{ACS}}{5} \quad (1)$$

Taludes conformados por classe de maciço I a IV, em que o índice de frequência (IF) é definido mediante a equação 2:

$$\text{Índice de frequência}_{\text{classe I-IV}} (IF_{I-IV}) = \Sigma \frac{I_{RMR} + I_{COND.2} + I_{DSM} + I_{SEG} + I_{ACS}}{5} \quad (2)$$

A partir dos resultados obtidos fazendo-se uso das equações supracitadas, são definidas faixas de valores e os respectivos níveis de probabilidade de ocorrência conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Probabilidade de ocorrência

Índice de Frequência (IF)	Probabilidade de ocorrência		
	Nível	Descrição	Detalhamento
$\leq 1,4$	1	Raro	Poderia ocorrer somente em circunstâncias excepcionais
1,4 – 2,0	2	Pouco provável	Poderia ocorrer algumas vezes
2,0 – 2,6	3	Possível	Deveria ocorrer algumas vezes
2,6 – 3,4	4	Provável	Provavelmente ocorrerá na maioria das circunstâncias
$\geq 3,4$	5	Quase certo	É esperado que ocorra na maioria das circunstâncias

2.2 Definição da Consequência

A determinação da consequência é realizada de forma qualitativa sendo avaliadas a presença de pessoas, estruturas civis e de mina nos taludes e na região onde uma eventual ruptura poderá impactar. Além

disso, é avaliado o possível nível de dano (vulnerabilidade) que um evento poderia ocasionar em função da sua severidade.

Para auxiliar na determinação da consequência, é utilizada a metodologia de *checklist* (Hamman, 2009) cuja aplicação é realizada em duas fases. Uma primeira fase consiste na definição de questões que permitam avaliar o impacto de um eventual evento de falha dos taludes nas estruturas diretamente afetadas ou na segurança das pessoas (vulnerabilidade do elemento em risco). Na segunda fase, pontuações individuais ou pesos são determinados para cada questão, fornecendo assim uma pontuação para avaliar o grau de vulnerabilidade/consequência do elemento, permitindo estimar o grau de dano causado pelo evento gerador do risco.

O questionário apresenta itens de avaliação que permite ponderar o grau de vulnerabilidade do elemento avaliado e questionar suas prováveis consequências. Os itens são baseados na análise de árvore de eventos proposta por Tapia (2007). As pontuações foram definidas em função do grau de importância do item analisado e estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Questões avaliadas para a avaliação do impacto do evento nos elementos em risco.

Nº	Metodologia Checklist - Questões Avaliadas	Pontuação		Pontuação Máxima
		Sim	Não	
1	O sistema de instrumentação está operacional? As estruturas\equipamentos são temporários?	0	5	5
2	São realizadas inspeções periódicas?	0	10	10
3	As inspeções visuais detectaram alguma movimentação?	10	0	10
4	Há indícios suficientes de anomalias que possam levar à ruptura (inspeção visual)?	10	0	10
5	Existe procedimento de evacuação?	0	10	10
6	O sistema de monitoramento identificou anomalias que possam levar à ruptura ou o sistema de monitoramento é inexistente?	15	0	15
7	As pessoas, equipamentos ou estruturas estão expostas?	20	0	20
8	Existe histórico de perdas de equipamentos, estruturas e danos a pessoas?	40	0	40
9	Há pelo menos uma fatalidade? Existe histórico de equipamentos destruídos?	50	0	50
Pontuação Máxima (Total)				170

O impacto é calculado como uma porcentagem a partir da pontuação total obtida na avaliação e a máxima pontuação possível conforme apresentado na equação 3

$$Pontuação\ final_{Impacto} = \frac{Pontuação\ obtida}{Pontuação\ máxima} (\%) \quad (3)$$

A partir do resultado obtidos puderam ser definidos níveis de impacto conforme apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Definição do nível de consequência a partir do grau do impacto estimado.

Nível	Descrição	Grau do Impacto (%)	
1	Insignificante	0	15
2	Baixa	16	34
3	Moderada	35	50
4	Alta	51	75
5	Catastrófica	76	100

A definição qualitativa das consequências e sua possibilidade de ocorrência foi dividida em consequências humanas (pessoais) e de infraestruturas e equipamentos da mina, conforme indicado na Tabela 10.

Tabela 10. Definição qualitativa das consequências

Nível	Descrição	Consequência	
		Pessoais	Infraestruturas e Equipamentos
1	Insignificante	Sem ferimentos	Sem danos, sem horas de paralização nem reparos
2	Baixa	Primeiros socorros e tratamento ambulatorio	Danos leves a parte da estrutura, com paralização das atividades, necessário manutenção e reparos, obstrução dos acessos, sendo necessário a remoção de material.
3	Moderada	Tratamento médico temporário sem afastamento	Afastamento temporário do equipamento para reparo, reconstrução parcial da infraestrutura, deslizamentos nos taludes ocasionando a paralização para limpeza e reconformação.
4	Alta	Lesões permanentes com afastamento	Perda total do equipamento, paralização temporária das atividades na mina, reconstrução total da estrutura, deslizamentos globais sendo necessário o retaludamento e reconformação das regiões afetadas ocasionando o fechamento das atividades em regiões pontuais da mina.
5	Catastrófica	Morte	Paralisação total das atividades.

2.3 Definição do Risco

O risco é definido em função da combinação da probabilidade do evento x consequência e classificado em quatro níveis:

- Risco Baixo (RA) - conduzido por procedimentos de rotina - risco aceitável;
- Risco moderado (RM) - requer atenção especial - risco aceitável com medidas de controle;
- Risco Alto (RA) - plano de ação requerido com acompanhamento permanente e;
- Risco Extremo (RE) - ação imediata, risco inaceitável.

Na Tabela 11 é apresentada uma matriz de risco qualitativa que avalia as implicações pessoais e materiais do elemento de risco avaliado.

Tabela 11. Matriz de avaliação de risco.

Probabilidade		Consequência				
		Insignificante	Baixa	Moderada	Alta	Catastrófica
		1	2	3	4	5
Raro	1	1 (RB)	2 (RB)	3 (RM)	4 (RM)	5 (RM)
Improvável	2	2 (RB)	4 (RM)	6 (RM)	8 (RA)	10 (RA)
Possível	3	3 (RM)	6 (RM)	9 (RA)	12 (RE)	15 (RE)
Provável	4	4 (RM)	8 (RA)	12 (RE)	16 (RE)	20 (RE)
Quase certo	5	5 (RM)	10 (RA)	15 (RE)	20 (RE)	25 (RE)

3 ESTUDO DE CASO

A metodologia proposta foi aplicada nos taludes dos acessos de uma mina localizada no estado de Minas Gerais. Inicialmente foi realizada uma consolidação dos dados existentes, verificação da topografia e de imagens satélite da área de estudo. O trabalho de campo consistiu no levantamento sistemático de dados geomecânicos e geológico estruturais além das condições geotécnicas dos taludes, dos acessos, das estruturas hidráulicas e de contenção. Da mesma forma, também foram levantadas informações das condições dos sistemas de drenagem superficiais, dos acessos e foi realizado o cadastro das estruturas da mina diretamente afetadas ante uma eventual falha ou deslizamentos dos taludes presentes nos acessos.

Na determinação da probabilidade de ocorrência foram utilizados os resultados da classificação geomecânica do maciço rochoso pelo sistema RMR para definição do critério I_{RMR} , incluindo o sistema de classificação *Weak Rock* (Stacey, 2018). Os aspectos relacionados ao sistema de drenagem superficial (I_{DREN})

foram avaliados e pontuados a partir do levantamento cadastral das condições do sistema de drenagem implantado e estruturas hidráulicas em geral. Além disso, foram utilizados os dados relacionados às condições de saturação do maciço. No caso do índice I_{COND} , a avaliação foi realizada a partir dos resultados da avaliação cinemática. Para os maciços classe I a IV foi verificada a possibilidade de formação de rupturas de tipo planar, cunha e tombamento a partir dos dados estruturais levantados em campo. Nos maciços Classe V, a avaliação cinemática permitiu verificar a possibilidade de ruptura circular ou plano-circular. A geometria dos taludes foi determinada a partir das informações topográficas. O índice I_{DSM} foi aplicado somente para taludes conformados por maciços I a IV. Os parâmetros I_{SEG} e I_{ACS} foram avaliados a partir da verificação das condições geotécnicas dos taludes e dos acessos realizada durante o levantamento de campo.

As pontuações obtidas foram inseridas nas formulações das equações 1, 2 e 3, chegando-se aos resultados o índice de frequência (IF) e posteriormente aos níveis da probabilidade de ocorrência (Figura 1).

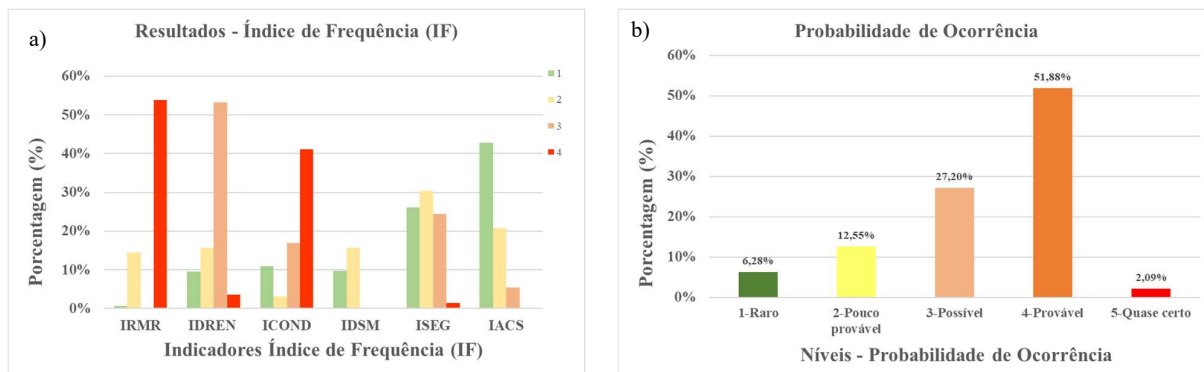


Figura 1. a) Resultados das pontuações do IF para cada indicador avaliado. b) Níveis de probabilidade de ocorrência obtidos a partir do IF.

A definição das consequências foi realizada por meio de avaliações qualitativas a partir das descrições da Tabela 10 e com o auxílio do questionário de avaliação do impacto apresentado na Tabela 8 e da equação 3. Para tanto, foram avaliadas, para cada ponto de mapeamento, as estruturas presentes no entorno que poderiam sofrer impacto caso os taludes dos acessos passem por eventos de instabilidade bem como o impacto a vida humana (danos pessoais/perda de vidas). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.

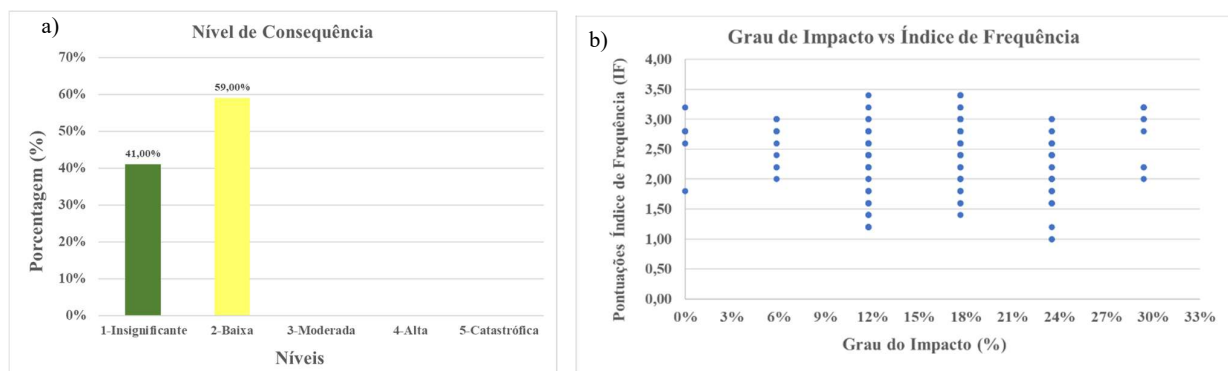


Figura 2. a) Níveis de consequência obtidos para o evento avaliado a partir da determinação do impacto. b) Grau impacto vs Índice de Frequência (IF).

A definição do risco final foi obtida com a aplicação da combinação da probabilidade do evento x consequência. Os níveis de risco foram determinados mediante a matriz de risco apresentada na Tabela 11. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.

Probabilidade		Consequência				
		Insignificante	Baixa	Moderada	Alta	Catastrófica
		1	2	3	4	5
Raro	1	1 (RB)	2 (RB)	3 (RM)	4 (RM)	5 (RM)
Improvável	2	2 (RB)	4 (RM)	6 (RM)	8 (RA)	10 (RA)
Possível	3	3 (RM)	6 (RM)	9 (RA)	12 (RE)	15 (RE)
Provável	4	4 (RM)	8 (RA)	12 (RE)	16 (RE)	20 (RE)
Quase certo	5	5 (RM)	10 (RA)	15 (RE)	20 (RE)	25 (RE)

Figura 3. Matriz com os resultados de níveis de risco obtidos nos taludes avaliados.

Os pontos classificados como de (RA), estão associados a problemas de deslizamento dos taludes, erosões e alturas de taludes superiores a 20m. Áreas de risco moderado (RM) ocorrem onde os taludes estão conformados por materiais de baixa resistência. Também são áreas em que não existem estruturas importantes da mina e a probabilidade de ocorrência de algum evento é relativamente baixa. Já o risco baixo (RB) geralmente ocorre em taludes que apresentam geometria adequada, drenagem eficiente e boas condições geotécnicas.

4 CONCLUSÕES

A metodologia proposta permite quantificar qualitativamente o nível de risco a probabilidade de ocorrência de falha de um talude mediante a análise das suas características e condições geotécnicas, identificando o grau de susceptibilidade e potencialidade de desencadear o evento avaliado. O impacto é definido a partir de um questionário que pontua o grau de impacto do evento em função da avaliação das condições das estruturas do entorno, histórico de eventos e da identificação de feições que indiquem indícios de instabilidades. O risco é obtido mediante a aplicação da formulação clássica proposta na literatura técnica.

A metodologia proposta foi aplicada na avaliação de risco dos taludes dos acessos de uma mina. Os resultados obtidos foram coerentes com as condições dos taludes observados em campo. Avaliações mais criteriosas considerando o grau de exposição e categoria de importância estratégica do elemento em risco podem ser aplicadas visando facilitar a tomada de decisão e estabelecer a estratégia mais adequada para priorizar setores que requerem ações imediatas de forma a evitar a paralisação das vias de acessos envolvidas ocasionando impactos econômicos ao empreendimento.

AGRADECIMENTOS

A empresa TEC3 por permitir a publicação da metodologia proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski, Z.T. (2011) *Errores en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y su corrección. Jornada sobre la Caracterización Geotécnica del Terreno*. Adif. Madrid.
- Hamman, ECF. (2009) ‘Qualitative geotechnical hazard and risk assessment’. *Proceedings of the 2009 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit and Civil Engineering*, University de los Andes, Santiago.
- Martin, D. Stacey, P. (2018) *Cemented Sediments. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks*. D. Martin and P. Stacey (eds.), CSIRO Publishing, Melbourne, Australia, p.127-167.
- Mavrouli, O.; Corominas, J.; Ibarbia, I.; Alonso, N.; Jugo, I.; Ruiz, J.; Luzuriaga, S.; Navarro, J.A. (2019) *Integrated Risk Assessment Due to Slope Instabilities in the Roadway Network of Gipuzkoa, Basque Country*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2019, 19, 399–419.
- Tapia, A., Contreras I., Jefferies M., Steffen O. (2007). *Risk Evaluation of Slope Failure at the Chuquicamata Mine. Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Perth, Australia, 12-14 September 2007. Potvin, Y. (ed.). Australian Centre for Geomechanics.