

# **MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO RISCO ASSOCIADO A DESPRENDIMENTOS EM TALUDES EM ROCHA (COMO PARTE DO PROJECTO DE INVESTIGAÇÃO COTA)**

## **EVALUATION METHOD OF RISK ASSOCIATED WITH ROCK FALL IN ROCK SLOPES (AS A PART OF THE RESEARCH PROJECT COTA)**

Cardoso, Daniela, *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, danielasocardoso@gmail.com*

Romana, Manuel, *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, mromanag@gmail.com*

Sánchez, Mila, *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, msanchez7477@gmail.com*

### **RESUMO**

O presente documento apresenta o estudo levado a cabo pelo projecto de investigação COTA com vista ao desenvolvimento de um método de avaliação do risco associado a desprendimentos de material em taludes em rocha. Este método de avaliação pode no futuro, integrar um sistema de controlo e alerta remoto que dentro de um programa generalizado de gestão e monitorização de taludes permita dar um aviso com antecedência suficiente, para prevenir acidentes que possam advir do desprendimentos de rochas especialmente em vias de comunicação. O trabalho desenvolvido relaciona-se principalmente com a determinação do volume do bloco de material que se pode desprender, o bloco que efectivamente alcança a obra civil e o desenvolvimento de uma metodologia para determinar o risco de desprendimento.

### **ABSTRACT**

This document presents a study carried out by the research project COTA, with the objective of developing a method to evaluate the risk associated with rock falls in rock slopes. This method of evaluation could in the future be a part of a remote control and alert system that, within a program of management and control of slopes permits to warn and this way prevent accidents that may occur due to rock falls, especially in roads and railways. The work developed relates mainly with the determination of the volume of the block that could be loose, the volume of the block that in fact affects the road or railway and the development of a method to evaluate the risk of rock fall.

## **1. INTRODUÇÃO**

O desprendimento de material de taludes em rocha, é uma ameaça real tanto para veículos e utilizadores das vias de comunicação como para centros populacionais.

Existem hoje em dia alguns métodos que permitem avaliar de forma expedita, qual o risco associado ao desprendimento de material em taludes de rocha. Estes métodos baseiam-se nas características dos materiais afectados, clima da zona, características da via em questão, utilização e ocupação da via, etc.

O projecto COTA (COMportamiento de TALudes en roca como amenaza para la seguridad en infraestructuras del transporte), desenvolvido pela Fundación Agustín de Betancourt da

Universidade Politécnica de Madrid em associação com as empresas GEOCISA e TUBOSIDER, visa estabelecer um sistema de controlo e alerta remoto de desprendimentos de rocha provocados por desastres naturais e causas acidentais, que integrado num programa de gestão e monitorização de taludes permita aumentar a segurança nas infra-estruturas de transporte.

Para tal analisaram-se vários taludes em rocha localizados em diferentes zonas de Espanha, sendo as características dos materiais afectados usadas na determinação de indicadores que futuramente integrarão o sistema de alerta por controlo remoto.

Durante as primeiras fases de investigação foi possível desenvolver um método que permite avaliar os seguintes aspectos: modo de ruptura; tamanho do bloco de material que se desprende; tamanho do fragmento a parar antes que alcance a infra-estrutura (pode não ser igual ao bloco que se desprende); o risco para a infra-estrutura associado com o modo de ruptura, frequência com que ocorre, uso da mesma (via ferroviária ou viária) e sistemas de suporte e reforço existentes.

Com este trabalho pretende-se apresentar o método de estudo, uma relação para a determinação do volume de bloco que se desprende e propôr um sistema de avaliação do risco associado a desprendimentos, que permitam no futuro elaborar mapas de risco e planificar de forma mais precisa áreas prioritárias e soluções de actuação.

## **2. METODOLOGIA**

Tal como referido estudaram-se vários taludes localizados em distintas zonas.

Os dados reunidos referem-se à localização do talude, geometria (altura, longitude, inclinação), fracturação do material afectado (RQD,  $J_v$ ), presença de água, instabilidades observadas e técnicas de reforços existentes.

A partir desta informação é possível determinar qual o volume do bloco de material em risco de desprendimento e seguindo o procedimento descrito na figura 1, tratou-se de estabelecer indicadores para identificar os taludes em que efectivamente é necessário intervir.

## **3. FENÓMENO A CONSIDERAR**

### **3.1. Tipos de ruptura**

No caso em estudo considera-se que o desprendimento de material não significa a rotura geral do talude.

Tendo em consideração os tipos de rotura em taludes rochosos (escorregamento planar, deslizamento em cunha, basculamento e deslizamento tipo solo), definem-se para este estudo dois tipos de desprendimentos.

1) desprendimento súbito de um bloco de material de forma prismática (que depois se pode fragmentar). Caracterizado por pelo menos um plano de descontinuidade, com dimensões decimétricas a métricas, correspondendo a um volume total inferior a 2-5 m<sup>3</sup> e considerando que a cunha não penetra mais de 2 m no talude. A velocidade de rotura potencial deve ser superior a 0,05 m/s, velocidade entre muito rápida e extremadamente rápida segundo Cruden e Varnes (1996).

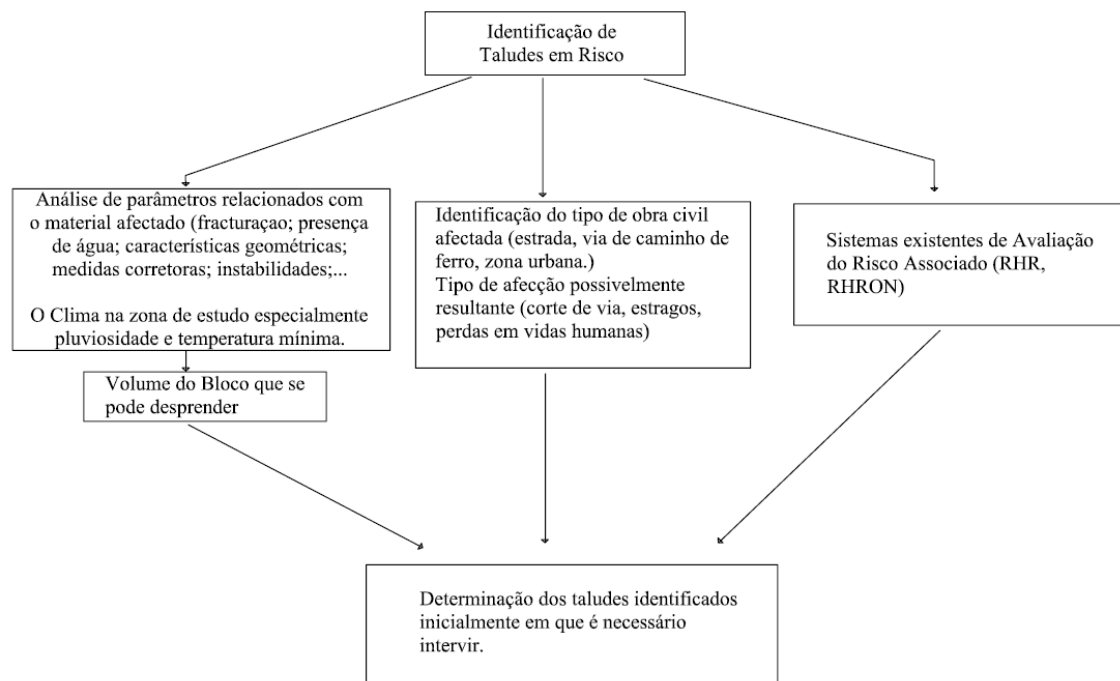


Figura 1. Procedimento de estudo.

2) desprendimento súbito ou rápido de uma massa composta por fragmentos centimétricos a decimétricos com forma sensivelmente prismática, que podem não estar separados por planos de descontinuidade, com um volume total inferior a 2-5 m<sup>3</sup>, considerando que a cunha não penetra mais de 2m no talude. A velocidade de rotura potencial deve ser superior a 0,05 m/s, velocidade entre muito rápida e extremadamente rápida segundo Cruden e Varnes (1996).

### 3.2. Escala de Danos para diferentes obras civis

O risco associado ao desprendimento de material de uma ladeira rochosa é valorado por dois índices, a susceptibilidade de ocorrência do fenómeno e a vulnerabilidade associada ao tipo de obra civil potencialmente afectada.

No caso em estudo definiram-se distintas escalas de danos dependendo do tipo de obra civil, no quadro 1 apresentam-se as escalas consideradas.

Quadro 1- Escalas de danos

Tipo Obra Civil	Escala de danos	Notas
Estradas	SC0 a SC6	Escala crescente de danos. O nível 0 (zero) corresponde a ocorrências de baixa gravidade e o 6 ao maior nível de estragos com a perda de 5 a 50 vidas humanas (no caso específico de que seja atingido um autocarro)
Caminhos de ferro	SF0 a SF7	Escala crescente de danos. O nível 0 (zero) corresponde a ocorrências de baixa gravidade e o 7 ao maior nível de estragos com a perda de mais de 50 vidas humanas.
Zonas urbanas	SU0 a SU7	Escala crescente de danos. Até ao nível 3 as ocorrências correspondem apenas a danos materiais aumentando o valor de perda económica até um valor superior a 100.000€ O nível 4 corresponde a feridos leves e graves e o nível 7 correspondente à perda de mais de 50 vidas humanas.

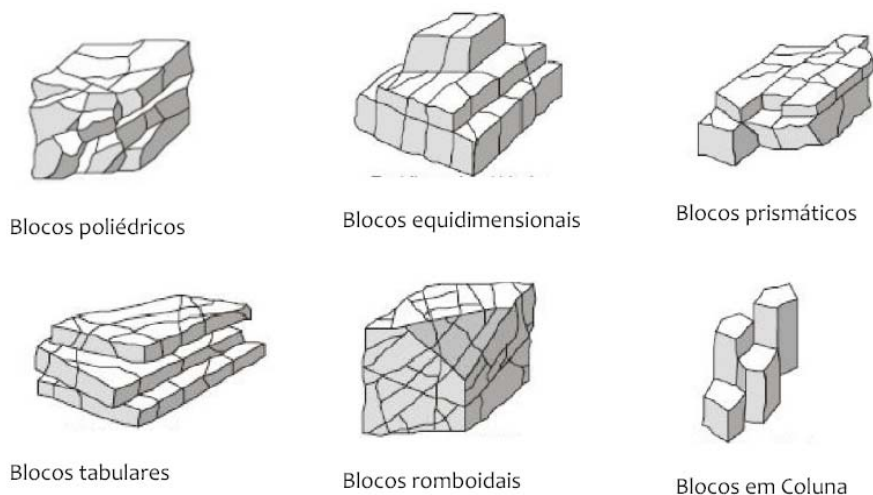


Figura 2. Formas dos blocos.(Palmstrom, 2005)

#### 4. VOLUME DO BLOCO (Vb)

Um dos passos determinantes para avaliar o risco associado à caída de material de um talude é estimar a quantidade de material que se pode desprender. O tamanho e também a forma do bloco que se desprende de um talude, dependem da fracturação que apresenta o material rochoso afectado, como é possível verificar a partir da figura 2.

O número de fraturas presentes, o espaçamento entre elas, a sua rugosidade, a presença de água e a persistência, são características das quais depende não só o tamanho do bloco que se desprende, mas também a resistência do maciço rochoso, a sua permeabilidade, a forma de ruptura, etc.

É difícil determinar directamente o tamanho do bloco, sendo este estimado de forma explicita ou implícita a partir outros parâmetros característicos do material. Os métodos mais comuns para determinar o volume do bloco (Vb) relacionam este parâmetro com o Rock Quality Designation (RQD) ou Volumetric Joint Count (Jv).

Por outro lado existe uma obvia diferença entre um bloco que tem o tamanho de uma amêndoa, a um que tenha o tamanho de uma bola de futebol. Palmstrom (1995) propôs uma classificação logarítmica para o tamanho do bloco. Considerando o caso em estudo tornou-se necessário subdividir a escala proposta por Palmstrom (1995). Ambas classificações apresentam-se no quadro 2.

Quadro 2. Classificação do Tamanho de Bloco segundo Palmstrom (1995) e de elaboração própria.

Palmstrom		Caso em estudo	
Intervalo dimensões	Classificação	Intervalo dimensões	Classificação
10 cm <sup>3</sup> a 200 cm <sup>3</sup>	Muito pequeno (MP)	10 cm <sup>3</sup> a 200 cm <sup>3</sup>	Muito pequeno (MP)
0,2 dm <sup>3</sup> a 10 dm <sup>3</sup>	Pequeno (P)	0,2 dm <sup>3</sup> a 10 dm <sup>3</sup>	Pequeno (P)
10 dm <sup>3</sup> a 200 dm <sup>3</sup>	Medio (M)	10 dm <sup>3</sup> a 200 dm <sup>3</sup>	Medio (M)
		0,2m <sup>3</sup> a 0,6 m <sup>3</sup>	G1
		0,6 m <sup>3</sup> a 2 m <sup>3</sup>	G2
		2m <sup>3</sup> a 4m <sup>3</sup>	G3
		4 m <sup>3</sup> a 6 m <sup>3</sup>	G4
		6 m <sup>3</sup> a 10 m <sup>3</sup>	G5
> 10m <sup>3</sup>	Muito Grande (MG)	> 10m <sup>3</sup>	Muito Grande (MG)

### 4.3. Relação entre $J_v$ e $V_b$ .

Definido por Palmstrom em 1974,  $J_v$  é o número de fracturas que intersectam um bloco de  $1\text{m}^3$ . No quadro 3 é apresentada a relação entre o valor de  $J_v$  e o grau de fracturação do material.

Quadro 3. Grau de Fracturação (Palmstrom, 2005)

Classificação do material rochoso	São	Ligeiramente fracturado	Moderadamente fracturado	Muito fracturado	Completamente fracturado	Solo residual
$J_v$	<1	1-3	3-10	10-30	30-60	>60

É importante ter em consideração que quando as fracturas estão bem definidas é fácil determinar o parâmetro  $J_v$ . Por outra parte a determinação deste parâmetro esta relacionada obviamente com a porção de material rochoso que é possível observar, que pode não corresponder com a secção mais fracturada.

Pode-se determinar o volume do bloco ( $V_b$ ) a partir do valor de  $J_v$  usando a equação [1] (Palmstrom, 1995). O volume de bloco é determinado considerando para além do valor de  $J_v$ , um factor  $\beta$  que depende da forma do possível bloco de acordo com a equação [2]. No quadro 4 apresentam-se os intervalos de  $\beta$  considerando as possíveis formas dos blocos.

$$V_b = \beta \times J_v^{-3} \quad [1]$$

$$\beta = 20 + 7 \left( \frac{a_3}{a_1} \right) \quad [2]$$

onde  $a_3$  é a face de maior dimensão e  $a_1$  a face de menor dimensão . Quando não se conhece a forma do bloco é recomendado o valor de 36.

Quadro 4. Valor de  $\beta$  (Palmstrom, 1995)

Forma do Bloco	Valor de $\beta$
Cúbica (dimensões das faces aproximadamente iguais)	27
Prismática (ligeiramente alongada) ou tabular ( ligeiramente planos)	28-32
Moderadamente prismáticos ou moderadamente planos	33-59
Alongado ou plano	60-200
Bastante alongados ou bastante planos	>200

### 4.4. Relação entre RQD e $V_b$ .

O valor de Rock Quality Designation (RQD) obtido a partir das amostras recolhidas de sondagens, permite estimar de forma aproximada a qualidade do maciço rochoso e corresponde à percentagem de fragmentos do tarolo recolhido com mais de 10cm de comprimento.

É possível correlacionar o valor de RQD com o volume do bloco ( $V_b$ ) a partir da equação [3]

$$V_b = \frac{RQD}{J_n} \quad [3]$$

sendo  $J_n$  (Joint Set Number) parâmetro relacionado com o número de diaclases da rocha.

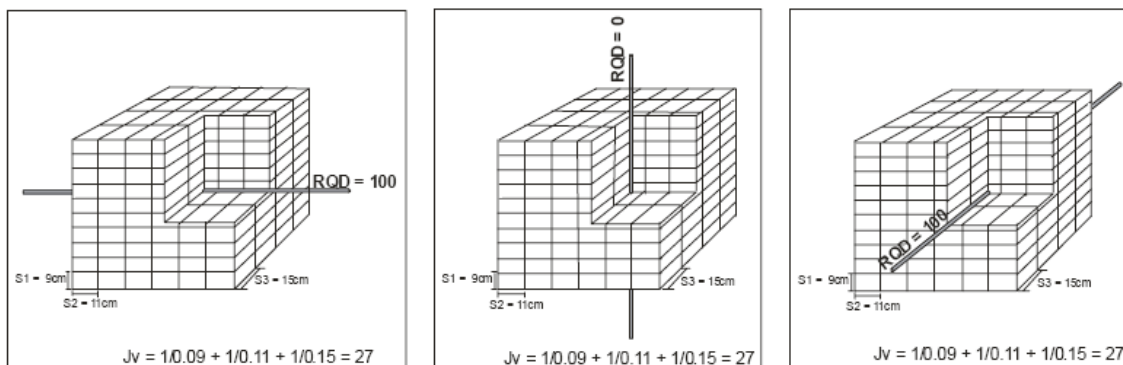


Figura 3. Dependendo da direcção de perfuração o mesmo material pode apresentar RQD de 0 ou 100.(Palmstrom, 2005)

São varios os autores que criticam a validade do RQD devido à sensibilidade que este parâmetro apresenta, por exemplo, com a direcção da perfuração, figura 3, ou com a perfuração em si que pode fragmentar o material e falsear o resultado.

#### 4.5. Relação entre RQD e $J_v$ .

A primeira relação entre RQD y  $J_v$  foi estabelecida por Palmstrom (1974) representada na equação [4]. Hudson y Priest (1979) relacionaram RQD com a frequência de fractura a partir do parâmetro  $\lambda$  que representa o número de fracturas por metro, equação [5].

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad [4]$$

$$RQD = 100 e^{-0.1\lambda} (1 + 0.1\lambda) \quad [5]$$

Sen e Eissa (1991) estudaram blocos de aresta máxima proporcional a 1 e aresta mínima proporcional a 0,1 e estabeleceram relações gráficas entre RQD,  $J_v$  e a forma do bloco. A partir destes gráficos Palmstrom (2005) estabelece uma relação entre RQD e  $J_v$ , apresentando uma nova equação [6].

$$RQD = 110 - 2.5J_v \quad [6]$$

Na figura 4 estão representados os resultados segundo Palmstrom (1974) e (2005), Sen e Eissa (1991) e um limite superior considerado pelos autores deste trabalho já que se considera que valores de  $J_v$  superiores a 80 são raros excepto nos casos em que se afectam a xistos ou argilitas.

#### 4.6. Diferença entre bloco que se desprende e bloco que chega à via de comunicação.

Existe uma clara diferença entre o volume do bloco que falha e aquele que alcança o pé do talude.

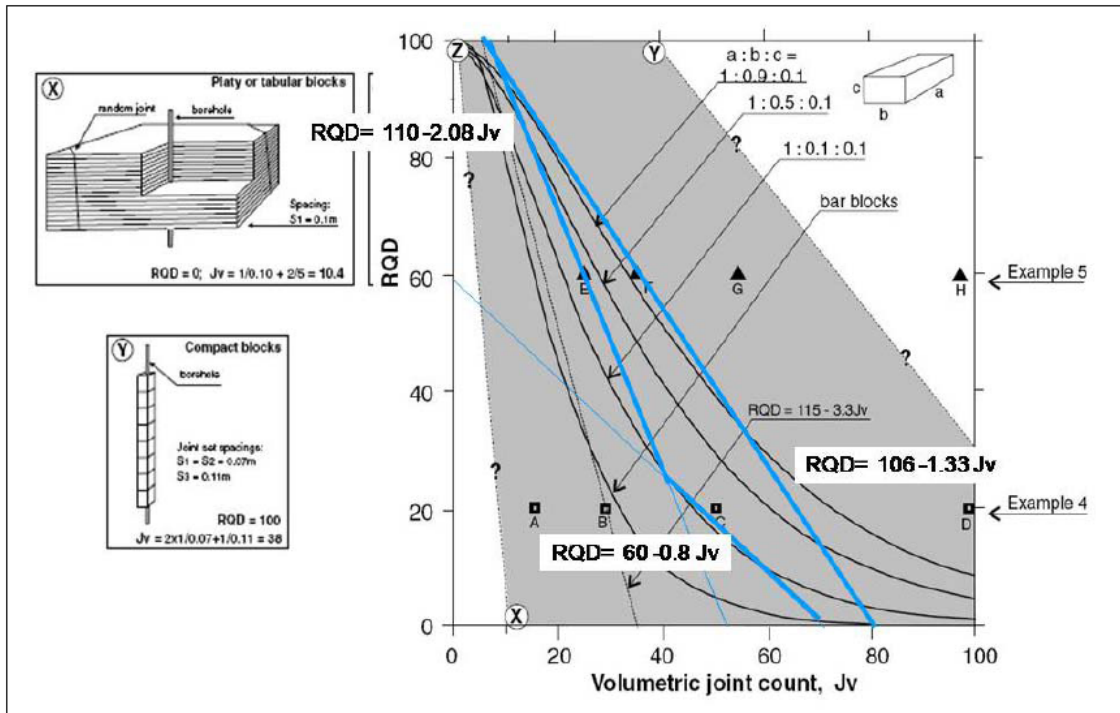


Figura 4. Relação gráfica entre RQD,  $J_v$  e a forma do bloco, adaptado de Palmstrom (2005).

O bloco que falha resulta das fracturas que apresentam uma resistência inferior à média e sempre com um mecanismo que seja cinematicamente possível. Quando o bloco que falha apresenta também ele fracturas, é frequente que devido a impactos se desagregue em blocos mais pequenos, figura 5. Este facto é importante quando se consideram possíveis medidas de contenção, uma vez que um bloco intacto apresenta mais energia cinética e um centro de gravidade mais alto.

Torna-se então necessário estudar as fracturas e determinar as suas características médias e as características mais desfavoráveis.



Figura 5. Diferença entre volume do bloco que se desprende e volume do bloco que chega ao pé do talude.

Ao analisar um talude em rocha nota-se que se desprendem blocos pequenos de material, no entanto o mais frequente é que se desprenda um bloco maior que por sua vez se fragmenta em blocos do mesmo tamanho do mais pequeno que falha.

A relação entre um e outro é estabelecida a partir do número de blocos de material que se desprendem solidariamente. E está relacionada com as tensões ao nível do fundo do desmonte a partir da equação [7], onde  $c_j$  é a coesão da junta,  $\gamma$  peso específico do material rocha e  $H$  a altura do desmonte.

$$\frac{c_j}{\gamma H} \quad [7]$$

A partir da equação [1], definida por Palmstrom (1995) é possível determinar o volume do bloco unitário ( $V_b$ ) e a partir desse bloco mais pequeno é possível definir o volume do bloco original que se desprende ( $V_f$ ) pela equação [8].

$$V_f = A \times V_b \quad [8]$$

Sendo  $A$  uma constante que depende da altura do desmonte e do espaçamento entre fracturas. Para taludes de desmonte com altura máxima de 10m e espaçamentos entre fracturas de 1m toma o valor de 1, até o valor de 5 para espaçamentos entre fracturas inferiores a 5cm.

Para blocos grandes, como os que resultam por exemplo de maciços graníticos, esta relação tende a ser 1, já que o volume do bloco que se desprende é mais ou menos aquele que chega ao pé do talude. Já no caso de xistos o volume do bloco de material que se desprende é usualmente superior ao volume do bloco unitário que chega ao pé do talude. Figura 5.

## **5. SISTEMAS DE AVALIAÇÃO DO RISCO ASSOCIADO A DESPRENDIMENTOS DE ROCHA (RHRON-ROCKFALL HAZARD RATING ONTARIO)**

Os sistemas de avaliação do risco de desprendimentos de rocha, como o RHRON baseiam-se no sistema RHR (Rockfall Hazard Rating) desenvolvido pelo Oregon State Highway Division (Pierson et al. 1990).

O sistema RHRON (Franklin e Senior, 1987) resultou da necessidade de melhorar a sensibilidade do sistema original, RHR, para o caso de taludes de menor altura e inclinações mais suaves. Este sistema efectua uma primeira avaliação (Basic), calculando o risco a partir da equação [9].

$$RHRON (\%) = (F1 + F2 + F3 + F4) \times \frac{100}{36} \quad [9]$$

Onde  $F1$  (magnitude) corresponde à quantidade de material em risco de desprendimento,  $F2$  (instabilidade) se relaciona com a probabilidade e frequência de ocorrência dos desprendimentos,  $F3$  (alcance) relacionado com o alcance do material desprendido e  $F4$  (consequência) quais as possíveis consequências associados ao desprendimento.

Os parâmetros  $F1$ ,  $F2$ ,  $F3$  e  $F4$  calculam-se a partir da media de sub-parâmetros ( $R1$  a  $R19$ ) que tomam valores entre 0 e 9, em que zero corresponde a um talude em bom estado sem risco e o valor de nove a um talude em risco eminente de desprendimento.



Estes sub-parâmetros avaliam diferentes aspectos como:

- características do material afectado como historial de desprendimentos, resistência do material rocha, índice de fracturação, etc.
- características geométricas do talude, altura do talude, inclinação, etc.
- ocupação e geometria da via, ou seja a probabilidade que a via esteja ocupada por um veículo aquando do desprendimento, distância de visibilidade disponível na zona onde se localiza o talude, etc.

Uma vez identificados os taludes instáveis, correspondentes com os valores mais elevados da avaliação básica RHRON, completa-se com uma segunda avaliação (Detailed), onde se incluem os parâmetros de avaliação F5, F6 e F7 relacionados, respectivamente, com possíveis tratamentos, custo associado ao tratamento e sua eficácia.

O sistema RHRON é bastante completo e relaciona aspectos importantes do desprendimento de material em taludes. No entanto, apresenta algumas limitações e deve ser ajustado para os fenómenos e tamanho de bloco considerados nos pontos anteriores.

## 6. CONCLUSÕES

Considerando as informações reunidas para este estudo e os métodos de avaliação do risco de desprendimentos usados em outros países, propõe-se uma metodologia alternativa, baseada no sistema RHRON, com o objectivo identificar de forma rápida os taludes em risco e quais as técnicas de reforços mais adequadas.

Sugerem-se por isso as seguintes alterações.

- 1) Para evitar confusões com o índice RHRON original, propõe-se um novo nome RHRON-traf.
- 2) Definição do valor de RHRON-traf por unidade de longitude de talude, já que afectando o mesmo material e com as mesmas características, um talude de maior desenvolvimento implica maior risco para os veículos. E também porque as possíveis medidas de tratamento são estabelecidas por unidade de longitud. Neste caso propõem-se uma unidade de longitude de 20m.
- 3) Considerar no cálculo o parâmetro  $Q_b$  relacionado com o volume do bloco unitário ( $V_b$ ) definido anteriormente, em vez do parâmetro  $Q_{tot}$  usado na metodologia original.  $Q_{tot}$  define o volume total que potencialmente pode fallar não sendo uma consideração realista do problema, visto que é difícil que o material em risco de desprendimento se colapse ao mesmo tempo.
- 4) O risco deve ser estabelecido de acordo com a escala de danos apresentada no quadro 1.
- 5) O intervalo de tempo a considerar deve ser adequado para considerar a vida útil das medidas e métodos de tratamento usados. Considera-se ajustado um intervalo de tempo entre 5 a 10 anos.
- 6) Usar a intensidade de tráfego (veiculos/hora) e a velocidade espacial  $v_s$  (10% mais baixa que a velocidade média dos veiculos) para determinar a probabilidade de ocupação do tramo da via em risco quando ocorre um desprendimento.

## REFERÊNCIAS

- Cruden, D.M. e Varnes, D.J. (1996). *Landslide types and processes. Landslide Investigation and mitigation*. Turner, A.K, y Shuster, R.L (Eds.). Transportation Research Board, Washington, D.C., Special Report 247, pp. 36 a 65.
- Cascini, L., Bonnard, C., Corominas, J., Jibson, R., Montero-Olarte, J. (2005). *Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development*, In: International Conference on Landslide Risk Management, Balkema, pp. 199-235.
- Deere, D. U. e Deere, D.W. (1988). *The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. ASTM STP 984, Louis Kirkaldie (Eds.). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 91-101.
- Franklin, J.A. e Senior, S.A. (1987). *Outline of RHRON, the Ontario rockfall hazard rating system. Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Atenas, Grecia, pp. 657-663.
- Senior, S.A. (2003). *Ontario Rockfall Hazard Rating System. Field Procedures Manual*. Materials Engineering & Research Office. Ontario, Canada, pp. 36.
- Hudson, J.A. e Priest, S.D. (1979). *Discontinuities and rock Mass Geometry*. *Int. Journal of Rock Mechanics, Mining science and Geomechanics*, Abstr. 16, pp. 339 a 362.
- Ineter, Cosude (2005). *Inestabilidad de laderas. Mapas de amenazas y recomendaciones técnicas para su elaboración*, MET-ALARN: Metodologías para el análisis y manejo de los riesgos naturales.
- Maerz, N. H., Germain, P., (1996). *Block size determination around underground openings using simulations*. Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada, pp. 215-223
- Palmstrom, A. (2001). *Measurement and Characterization of Rock Mass Jointing. In-situ Characterization of Rocks*. Sharma V.M. and Saxena K.R. eds.,A.A. Balkema publishers, Oslo, Norway, pp. 49-97.
- Palmstrom, A. (2005). *Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 20, Issue 4, pp. 362-377
- Pierson, L.A., Davis, S.A. e Van Vickle, R. (1990). *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual*.
- Romana, M, Serón, J.B. e Montalar, E. (2003). *SMR geomechanics classification (for slopes): Application, experience and validation*. International Congress on Rock Mechanics.
- Sen, Z. e Eissa, E.A. (1991). *Volumetric Rock Quality Designation*. *Journal of Geotechnical Engineering*, no. 117, Vol. 9, pp. 1331 a 1346.