

ANÁLISE DE RISCO APLICADA À EXECUÇÃO DE UM TÚNEL RODOVIÁRIO EM CONDIÇÕES CRÍTICAS

RISK ANALYSIS APPLIED AT A ROAD TUNNEL CONSTRUCTION IN CRITICAL CONDITIONS

Longo, Simone, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, simone.longo@ist.utl.pt*
Oreste, Pierpaolo, *DITAG Politecnico di Torino, Torino, Itália, pierpaolo.oreste@polito.it*
Dinis da Gama, Carlos, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, dgama@ist.utl.pt*
Pellizza, Sebastiano, *DITAG Politecnico di Torino, Torino, Itália, pierpaolo.oreste@polito.it*

RESUMO

Neste artigo efectua-se a análise de alguns dos aspectos principais relacionados com a construção do futuro túnel de *by-pass* em Ceppo Morelli, Piemonte, Itália. Trata-se duma região montanhosa afectada por numerosos deslizamentos de talude e quedas de blocos rochosos que atingiram uma estrada e duas povoações próximas. Com um enquadramento na óptica da análise de risco desenvolveram-se investigações das condições do maciço, e foi adoptada uma metodologia de escavação propositadamente escolhida para reduzir o risco de reactivação da instabilização. É exposto também o cálculo das probabilidades de queda dos blocos ao longo da encosta e a estimativa das suas trajectórias. Os resultados obtidos comprovam a necessidade de abrir o túnel, sendo que a estrada provisória actualmente em uso não está completamente isenta de riscos.

ABSTRACT

In this article, analysis of several main aspects of the Ceppo Morelli (Piemonte, Italy) future by-pass tunnel construction is achieved. It concerns a mountainous region which in the past was affected by slope slidings and block falls that reached a downhill roadway and two nearby villages. Using risk analysis methodology, investigations on the rock mass conditions and available excavation techniques were developed to reduce chances of reactivating instabilizations and to improve foreseen mitigation actions. The probability calculation of block falls down the mountain slopes is also accomplished, with estimation of their trajectories. Obtained results prove the need to open the tunnel and the present roadway is not even considered risk free.

1. INTRODUÇÃO

Ceppo Morelli é uma pequena cidade do norte da Itália situada ao pé da encosta sul do Monte Rosa, Vale de Anzasca, (Figura 1). É servida por uma única estrada nacional, N 549, que a liga às cidades próximas. Algumas povoações desenvolveram-se nas proximidades de Ceppo Morelli, ao longo da referida estrada. Duas dessas povoações, e o troço de estrada entre elas, são repetidamente atingidas por fenómenos de queda de blocos da encosta do Monte Rosa e são expostas também ao risco de serem afectadas, de forma mais intensa, por um deslizamento de grandes dimensões. Esta última hipótese tornou-se mais concreta em Outubro do ano 2000, quando as intensas chuvas [2] que atingiram essa zona, reactivaram um antigo e extenso deslizamento sito na parte médio baixa da encosta Sul do Monte Rosa, entre as cotas 1850m e 1200m s.n.m. A superfície total desse deslizamento é de 160.000 m², e o volume total estimado varia entre 4 e 6×10⁶ m³ [1]. A instabilidade é delimitada, nos seus volumes mais em cota, por

fendas de tracção. Em consequência das chuvas anteriormente indicadas houve deslocamentos das margens das fendas de tracção que atingiram valores de 4-5m; esses deslocamentos induziram uma reacção dos volumes rochosos parte médio-baixa da encosta, e provocaram, especialmente nas cotas próximas dos 1200m, destaque e queda de blocos de grandes dimensões (até 300m³) [1]. Alguns blocos chegaram até vale, atingindo a referida estrada N549 e as duas aldeias anteriormente indicadas.

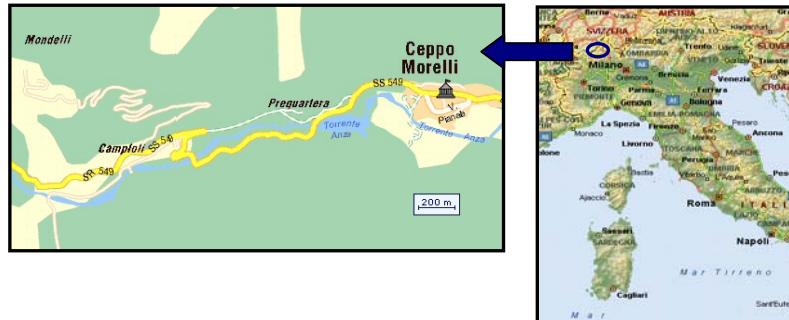


Figura 1 – Localização da área de estudo.

As hipóteses mais pessimistas referem-se a ao fenómeno de reactivação do antigo deslizamento como capaz de cobrir quase por inteiro as duas aldeias com espessas camadas de detritos, rochas e lama. Trata-se de uma hipótese remota, mas sustentada por considerações morfológicas e geoestruturais [1]: grandes volumes rochosos foram movimentados no ano 2000, mas não houve um fenómeno de deslocamento de terrenos de dimensão tão elevada de recobrir as aldeias indicadas. A Administração regional da Região Piemonte (*ARPA-Piemonte*), em conjunto com o *Politecnico di Torino*, estão actualmente a avaliar a hipótese de proteger as duas aldeias realizando aterros artificiais; Foi tomada em consideração também a hipótese das aldeias serem evacuadas e reconstruídas em outra parte [1].

Uma solução eficaz consiste em realizar um túnel que, passando a devida distância da provável superfície de escorregamento, ligaria as duas povoações. O túnel seria então um *by-pass* que transferiria em subterrâneo o trânsito veicular precisamente no troço em risco. Um túnel sob a encosta em análise deve ser aberto com cuidados especiais, existindo a possibilidade de reactivar o antigo deslizamento e de provocar o destaque de blocos que já se encontrem em condições de estabilidade precária. A configuração curva do traçado do túnel, foi especificamente pensada para afastá-lo da provável superfície de escorregamento da encosta (Figura 3). Também o método construtivo do túnel foi de propósito escolhido para minimizar os riscos: a realização de uma galeria piloto permitiria otimizar o uso de explosivo para o seguinte alargamento enquanto é necessário obter valores de vibrações suficientemente baixos para não interferir com a estabilidade da encosta. A galeria piloto serviria também para fazer um reconhecimento de detalhe do maciço rochoso e reduzir consequentemente a incerteza ligada a falta de conhecimento.

Na fase de projecto do túnel a análise de risco foi fundamental: mediante o cálculo do risco nas condições actuais verificou-se que a mais apropriada alternativa é a de um túnel; novamente utilizando esquemas lógicos e diagramas típicos da análise de risco foi possível projectar o túnel, a sua geometria, o método de escavação, a monitorização e as medidas de minimização necessárias.

Ficou demonstrado, no estudo resumido neste trabalho, que o desvio construído no ano 2000 para manter a circulação depois de se ter fechado ao trânsito o troço da N549, entre Prequartera e Campioli não é completamente isenta do risco de ser atingida por blocos. Foi calculado um valor da probabilidade para que a estrada nova seja atingida ou ultrapassada por um bloco de grandes dimensões.

2. ENQUADRAMENTO DO PROJECTO

2.1 Localização da área em análise

Ceppo Morelli é situada no Vale de Anzasca a poucos quilómetros de distância da fronteira com a Suíça e é atravessada pela Estrada Nacional N549, que liga Macugnaga com Piedemulera. A Estrada Nacional foi construída na base do vale, junto ao Rio Anza, (Figura 1). As aldeias chamadas Prequartera e Campioli, são as duas únicas povoações que se encontram nas proximidades do traçado do futuro túnel.

2.2 Geologia e geomorfologia da área

As áreas em estudo situam-se na parte do Vale Anzasca entre Prequartera e Ceppo Morelli, sendo constituídas principalmente por xistos, dominantes no fundo do vale e por gnaisses, prevalentes nas partes altas das encostas. Esta unidade tectónica é deformada e retroflexa pela grande dobra antiformal de Vanzone.

A morfologia deste troço de vale foi modelada por uma intensa actividade glacial que agiu sobre um substrato rochoso bastante compacto. A encosta considerada (na parte entre Campioli e Prequartera) apresenta numerosas superfícies verticais e subverticais; a base da vertente orográfica a Oeste é constituída por amplas e profundas formações detríticas resultantes de repetidos desmoronamentos das paredes, o que indica uma marcada actividade de instabilização. Os depósitos superficiais da encosta podem ser caracterizados como segue:

- Depósitos glaciares e depósitos morénicos muito heterogéneos em granulometria (varia entre areia fina e limos até grandes blocos, de natureza petrográfica vária);
- Detritos do desabamento e depósitos grosseiros incoerentes, praticamente sem fracção fina;
- Cobertura detrítico morénica e depósitos distribuídos na base das paredes rochosas, quer no fundo do vale, quer nas cotas mais elevadas.

Do ponto de vista geomorfológico, estão presentes os seguintes elementos:

- Falhas, com distribuição difusa na zona objecto de estudo, com orientação predominante NW-SE e NE- SW;
- Zonas de destaque de grandes desabamentos. Na área nota-se a presença de duas superfícies de grandes dimensões, com rocha completamente exposta;
- Zonas de erosão concentrada, áreas sujeitas a uma permanente acção erosiva, por efeito das águas meteóricas;
- Aluimentos de terra e detritos, na sequência de chuvas muito intensas.

3. O PROJECTO DO TÚNEL

O túnel rodoviário em questão, foi projectado tendo em consideração vários factores, entre os quais se destacam:

3.1 A velocidade de projecto

A circulação em toda a Estrada N549 não é de alta velocidade: as condições morfológicas da área impõem curvas fechadas e desniveis de cotas que reduzem a visibilidade. Por estas razões, e também para não obter custos de construção da obra inutilmente elevados, foi prevista uma velocidade dos veículos no túnel até 60 km/h. O valor da velocidade indicado permite a realização de um traçado do túnel bastante flexível.

3.2 Melhoria do trânsito e das condições de segurança

Com base na velocidade de projecto escolhida, a norma actualmente utilizada em Itália [3],[4] permitirá realizar uma plataforma com largura de 10,50m.

A secção rodoviária terá as características indicadas na Tabela 1 e esquematizadas na Figura 2.

Tabela 1 – Dimensões dos elementos da plataforma da secção rodoviária do túnel

Elemento	Valor
2 faixas (uma por sentido)	7.50m (3.75mx2)
2 Bermas pedonais	3.00m (1.50mx2)
Largura total pavimentada	10.50m
2 protecções redirectivas	2.20m (1.10mx2)
Largura total	12.70m

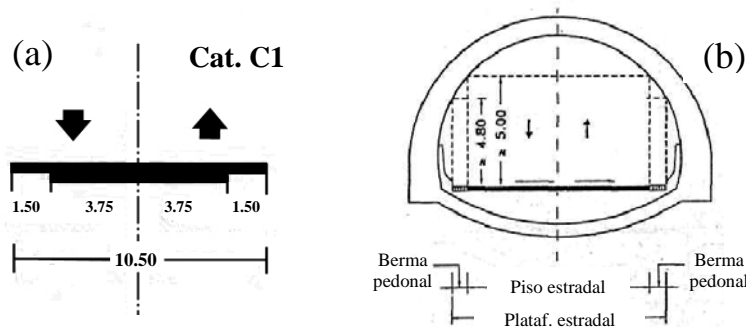


Figura 2 – a) Secção Categoria C1; (b) Secção Categoria C1 em Túnel (DM 5/11/2001)

3.3 O traçado do túnel

O traçado do túnel é substancialmente constituído por uma ampla curva, como mostra a Figura 3a. A Figura 3b mostra um corte no qual é visível a potencial superfície de escorregamento e a posição do túnel.

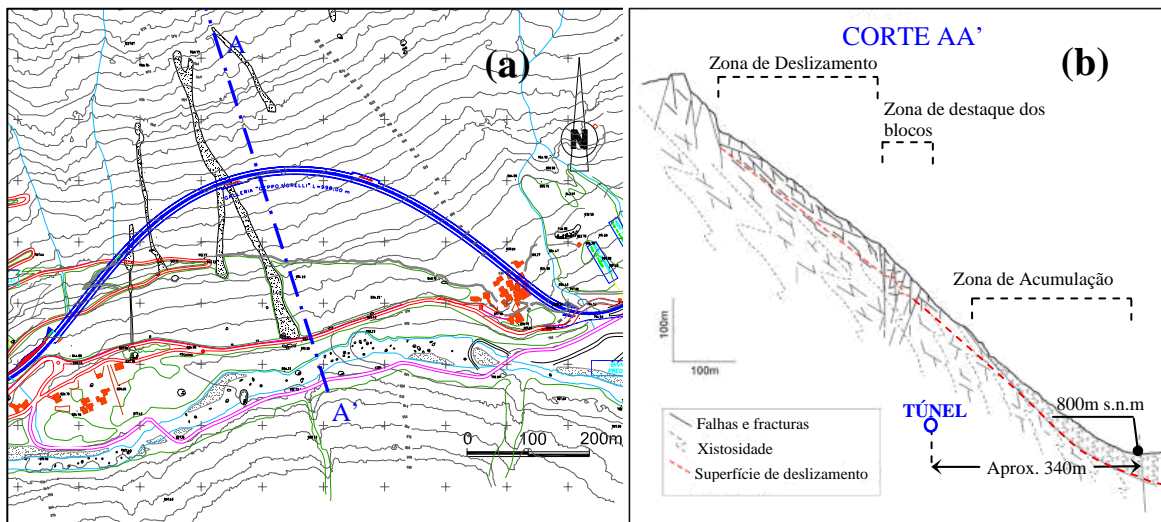


Figura 3 – (a) Traçado do Túnel;(b) Corte vertical (adaptado de Scavia [1])

O emboquilhamento de vale (à cota 800m s.n.m.) será localizado a Leste da povoação de Prequartera. O túnel irá passar por baixo dessa povoação a uma profundidade de cerca de 8m da superfície topográfica. O emboquilhamento Oeste, mais elevado (860 m s.n.m.), situa-se nas

proximidades da povoação Campioli, perto da intercepção para Mondelli. O raio de curvatura principal do túnel é 350 metros, existindo nas proximidades das saídas variações de curvaturas para interligar o túnel com a estrada existente. Essa geometria curvilínea foi realizada de propósito para afastar o túnel dos volumes rochosos sujeitos a desabamentos e para entrar mais rapidamente no maciço rochoso de base (Figura 3b). O comprimento do túnel é de 1016 metros, com uma inclinação média de 5.5%.

4. ENSAIOS REALIZADOS

Foram realizados diferentes ensaios "in situ" e de laboratório (Tabela 2), com o objectivo de obter informações suficientes sobre a morfologia e as condições do substrato rochoso e das terras de cobertura para o projecto do túnel. Efectuaram-se ensaios numa primeira fase no ano 2001, integrados sucessivamente com mais ensaios no ano de 2004.

Tabela 2 – Ensaios recentes realizados para proceder com o projecto do túnel.

Ensaio	Quantidade	Características Principais	Ano
Sondagem não destrutiva	4	Realizadas em proximidade dos emboquilhamentos do futuro túnel	2001
SPT	40	Realizadas nos furos das sondagens não destrutivas anteriores	2001
Sísmico por Refracção	30	Geofones intervalados cada 5 metros, por um total de 60 metros cada ensaio	2001
Eléctrico tipo Wenner	2	Comprimento de 275 metros.	2001
Eléctrico tipo Schlumberger	2	Comprimento de 275 metros	2001
Carga Pontual	40	Materiais graúdos e compactos	2000-2001
Sondagem não destrutiva	5	Realizados em proximidade dos emboquilhamentos, com profundidade maior do que as sondagens realizadas em 2001	2004
Geoelectrónicos	5	Com comprimento variável desde 500m até 800m	2004

Na Tabela 3 encontram-se resumidas as características do maciço rochoso nos troços que serão atravessados pelo túnel e a correspondente classificação geomecânica de Bieniawski (RMR-Rock Mass Rating). A classificação foi obtida com base nas investigações realizadas, através dos referidos ensaios. Um factor que limitou a possibilidade de análise e conhecimento do maciço foi a impossibilidade de realizar sondagens sobre os volumes de material desabado, tendo sido proibido, por razões de segurança, pelas autoridades competentes.

Tabela 3 – Características do maciço rochoso ao longo do traçado do túnel (a partir do emboquilhamento de vale)

Índices e parâmetros geomecânicos	Segmento do túnel				
	0-160m (I)	160-300m (II)	300-800m (III)	800-920m (IV)	920-1050m (detrito-V)
RMR (1989)	53	65	63	61	-
GSI	48	60	58	56	-
Q	2.44	17.04	19.88	23.33	-
c (MPa)	0.85	1.8	1.6	1.45	0.01
ϕ (°)	50	48	45	47	37
σ_t (MPa)	0.3	0.75	0.6	0.55	0.007
E (MPa)	8250	17000	15000	13000	150

* Os troços estão representados em planta na Figura 4.

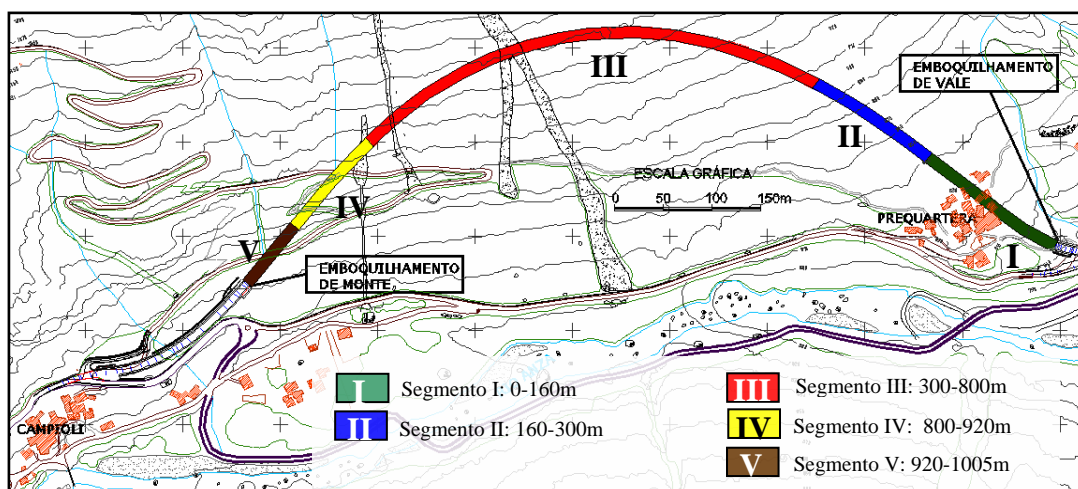


Figura 4 – Zonamento geomecânico do traçado do túnel: representação em planta dos 5 troços

5. CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO ROCHOSO

Com base nos valores do RQD (Rock Quality Designation) obtidos nas sondagens mais recentes e utilizando os dados obtidos nos ensaios indicados na Tabela 2, foi possível classificar o maciço rochoso, ao longo do traçado do túnel. Para tal, foram usados os seguintes índices:

- RMR;
- GSI (Geological Strength Index, classificação de Hoek e Brown);
- Q (classificação de Barton).

5.1 Classificação de Bieniawski (Índice RMR)

A classificação do RMR [5] toma em consideração 5 diferentes parâmetros: Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta C_0 ; RQD; Espaçamento entre as descontinuidades; Condições das descontinuidades; Condições da água nas fracturas.

A cada um destes parâmetros é atribuído um valor numérico; Para obter o índice da classificação RMR, somam-se os valores numéricos obtidos nos 5 parâmetros.

5.2 Classificação de Hoek e Brown (Índice GSI)

O índice GSI foi utilizado para avaliar os parâmetros geomecânicos do maciço rochoso; foi obtido a partir do RMR com base na seguinte equação [6]:

$$GSI = RMR - 5. \quad (I)$$

5.3 Classificação de Barton (Índice Q)

O índice de qualidade do maciço rochoso Q é função de seis parâmetros, cada um dos quais pode ser estimado por meio da análise da superfície do maciço rochoso e pode ser actualizado nas escavações seguintes.

A equação que define o Q é a seguinte [7]:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right), \quad (II)$$

O Índice de Barton pode ser utilizado para obter indicações sobre a tipologia e a quantidade de suportes necessários para segurar a estabilidade da escavação. Para isso, utiliza-se um gráfico como o da Figura 5, que contém 38 classes diferentes de suportes. Conhecendo o valor de Q obtido por cada trecho do zonamento do túnel juntamente com a dimensão equivalente é possível encontrar no gráfico as classes dos suportes aconselhados.

Para o túnel em Ceppo Morelli, estando prevista a realização de uma galeria piloto antes da escavação propriamente dita do túnel, e sendo

Diâmetro da galeria piloto $\phi = 4\text{m}$ Largura do túnel $\phi = 12\text{m}$
 ESR = 1.6 para a galeria piloto ESR = 1.3 para o túnel definitivo

(ESR foi calculado com base nas indicações em Barton, 2002)

obtem-se, por cada trecho da galeria piloto e do túnel (Figura 4) as classes indicadas com os símbolos na Figura 5.

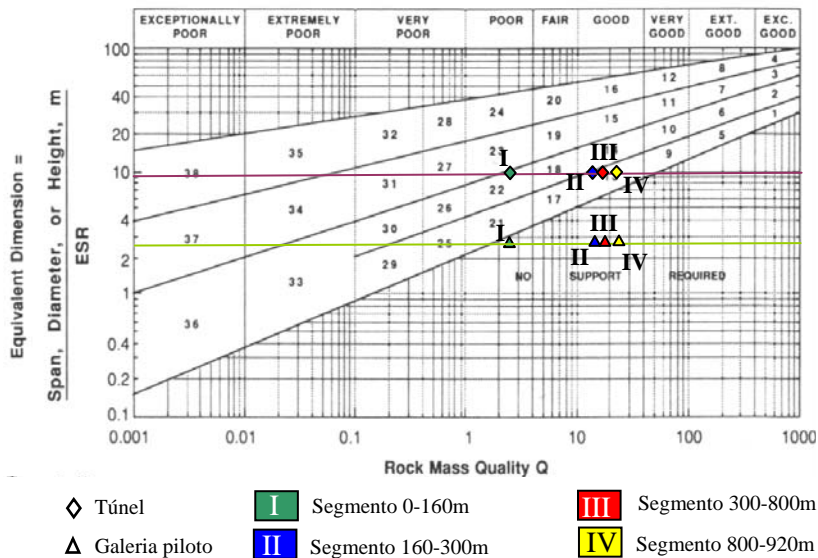


Figura 5 – Gráfico para o cálculo da classe de suporte segundo Barton. São evidenciados também os pontos representativos dos diferentes trechos da galeria piloto e do túnel, com segmentos a partir do emboquilhamento de vale.

Com base nos dados à disposição foi então possível realizar o zonamento geomecânico do maciço rochoso, atribuindo a cada trecho do túnel valores representativos dos índices GSI e Q, e dos parâmetros geomecânicos c (coesão), ϕ (ângulo de atrito), E (Módulo de Young), resumidos na Tabela 2.

6. ANÁLISE DE RISCO

6.1 Risco préexistente à construção da obra

O risco préexistente à construção do túnel tem como origem a instabilidade da encosta, com as suas duas formas de se manifestar (queda de blocos e deslizamento dos volumes detriticos).

Durante a construção do túnel verifica-se a sobreposição do citado risco de instabilidade da encosta com o de construção, que incidem sobre a mesma área, propriedades e pessoas. Depois de construído, quando for possível substituir a circulação na estrada actualmente em uso com a circulação pelo túnel, haverá um risco residual final, que deverá estar dentro dos limites do risco aceitável.

Para efectuar a estimativa do risco, foi realizada a análise de frequência utilizando-se o programa ROTOMAP para o fenómeno de queda de blocos e o programa FLAC, para o fenómeno de desabamento dos volumes detríticos, calculando-se o factor de segurança para várias situações e diferentes hipóteses de deslizamento.

Os resultados obtidos com o programa ROTOMAP mostram que das 640 simulações optimizadas de queda de blocos, 77 apresentam trajectórias que interceptam o desvio efectuado, quase todas em fase de saltamento e não de rolamento (Figura 6a). Para além disso, através dos resultados obtidos, obtiveram-se os valores de energia cinética dos blocos para a encosta em questão, através das linhas de isovalores apresentadas na Figura 6b.

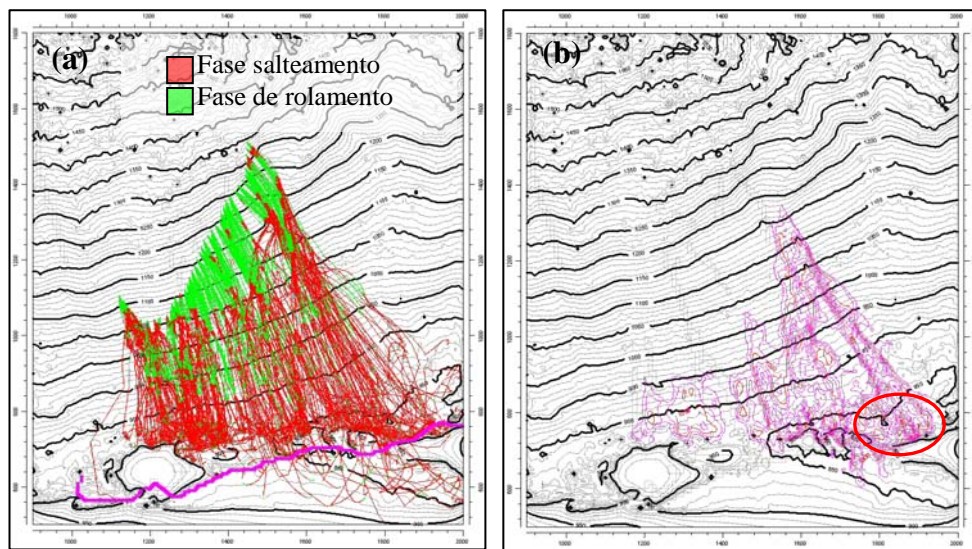


Figura 6 – Resultados obtidos com ROTOMAP. (a) Trajectórias dos blocos; (b) Distribuição da energia cinética na encosta;

Considerando então a média histórica de queda dos blocos por ano é de $F_{qb} = 1.23$ (valor obtido em [1]), pode-se calcular a frequência de blocos que podem atingir a estrada, a qual é dada por:

$$F_{be} = F_{qb} \times (\text{n. de blocos que atingem a estrada}) / (\text{n. total de blocos da simulação})$$

$$F_{be} = 1.23 \times 77 / 640 = 0.147 \text{ (eventos/ano).}$$

Assim, o valor da frequência dos blocos que podem atingir a estrada é de um bloco em cada 6 anos e nove meses. O valor de energia cinética atinge os 1800J/kg de bloco, segundo a estimativa fornecida pelo já citado programa.

No que respeita aos fenómenos de desabamento dos volumes detríticos, foram calculados os factores de segurança para os seguintes casos, obtendo-se os valores:

- Instabilização de toda a camada detrítica de cobertura: $F_S = 1.22$;
- Instabilização da parte superior da encosta: $F_S = 1.20$.

6.2 Cálculo do risco

O risco quantitativo é obtido aplicando a cada elemento sob risco, por cada hipótese de desenvolvimento da instabilidade, a equação seguinte:

$$R = P \times D \quad (I)$$

Onde

R = Risco;

P = Probabilidade de acontecimento de um evento;

D = Danos que o evento pode originar se acontecer;

Foram consideradas várias categorias de danos [1]: danos físicos, económicos ambientais e sociais. Por cada categoria de dano, foi calculado o risco qualitativo e foram geradas mapas de risco (Um é representado na Figura 7) que representam separadamente o risco físico, económico, ambiental e social.

Quando diferentes eventos podem actuar sobre o mesmo território, originando danos da mesma categoria, (como neste caso de estudo, onde foram delineadas três diferentes hipóteses) distingue-se o risco parcial do risco total. O risco total calcula-se pela soma dos riscos parciais da mesma categoria. Para Ceppo Morelli foi calculado o risco económico total como a soma dos riscos das três hipóteses (Figura 7).

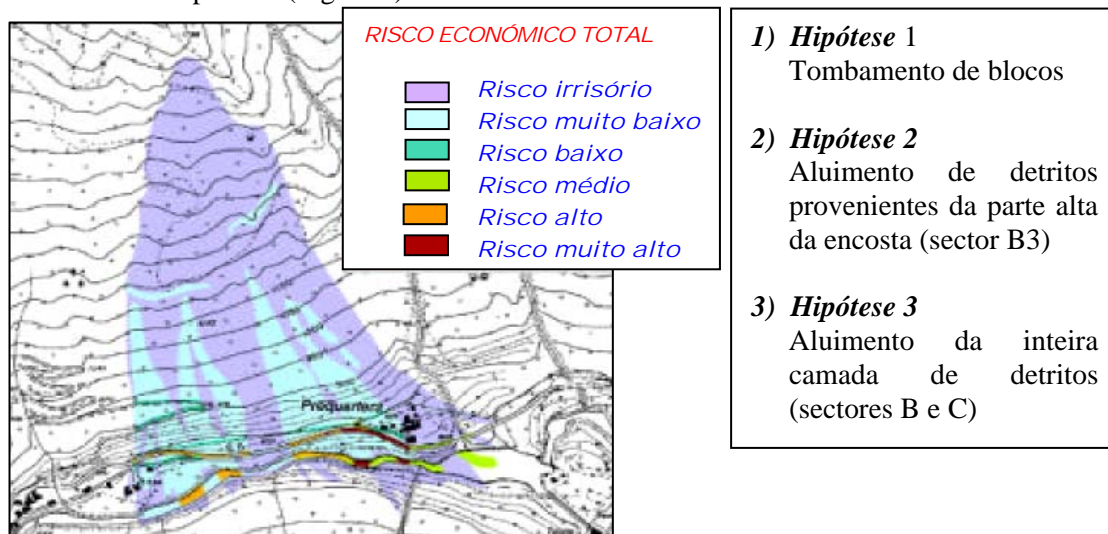


Figura 7 – Mapa do risco económico total da área em estudo (soma do risco económico das hipóteses 1, 2 e 3. Adaptado de Scavia [1]).

As medidas tomadas para minimizar o risco nesta fase podem ser divididas em dois grupos:

- 1) Medidas imediatas, de emergência, tomadas no ano 2000 depois da reactivação do desabamento. As mais importantes entre elas são:
 - A implementação de um sistema de monitorização;
 - A construção da estrada alternativa.
- 2) Medidas de longo prazo, que requerem mais tempo e recursos para serem aplicadas, mas que reduzem ainda mais o risco, de forma a entrar nos limites do risco aceitável. Entre outras, salientam-se:

- A realização de mais investigações ao longo do tempo;
- O projecto do túnel (no qual a análise de risco é parte integrante) e a sua execução futura;
- O sistema de monitorização permanente que irá ficar depois da construção do túnel.

7. CONCLUSÕES

Por meio da análise probabilística da queda dos blocos na encosta entre Prequarera e Campioli foi possível verificar que não só a estrada N549 de interligação entre as duas povoações está sob risco de ser atingida por blocos, mas que também o novo desvio construído no ano 2000 não é isento desse tipo de risco. Com base nos cálculos efectuados, a frequência de queda de blocos com a qual esse novo desvio pode ser atingido é de 0.147 eventos/ano, que corresponde a 1 bloco cada 6 anos e 9 meses.

Um outro problema existente nessa área é a presença de uma antiga superfície de deslizamento que pode ser reactivada por causa das interferências humanas durante a escavação do túnel, provocando a movimentação de elevados volumes de terra e detritos. Para limitar este perigo, foi prevista uma geometria curvilínea de forma a afastar o túnel dos volumes rochosos sujeitos a desabamentos e para penetrar mais rapidamente no maciço rochoso de base. Também o método de escavação foi previsto considerando esta hipótese: a abertura inicial com TBM-topo permite obter um melhor conhecimento das condições do maciço rochoso e o alargamento consequente com explosivo produz vibrações de intensidades muito limitadas (em relação á uma escavação de secção plena com explosivo) por causa da grande superfície livre gerada pela galeria piloto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) e do CEGEO (Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico) e a colaboração do Eng.º Gustavo Paneiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Scavia, C. et al. (2005), “The Ceppo Morelli Rockslide”, Identification and Mitigation of Large Landslide Risks in Europe - Advances in Risk Assessment. Editors: Ch. Bonnard, F. Forlati, C. Scavia. Published by Balkema.
- [2] Biancotti, A. & Bovo, S. (1998), “Distribuzione Regionale di Piogge e Temperature. Studi climatologici in Piemonte”, vol. 1, Regione Piemonte, Università degli Studi di Torino.
- [3] Decreto Ministerial 5/11/2001 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione di strade”, Itália.
- [4] Decreto Ministerial 2/5/2004 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade - Modifiche al decreto del 2001”, Itália.
- [5] Bieniawski, Z.T. (1993), “Classification of Rock Masses for Engineering: the RMR System and Future Trends”, Comprehensive Rock Engineering, Vol. 3, 553-573, Hudson J.A., Pergamon Press.
- [6] Hoek, E. and Brown, E.T. (1998), “Practical Estimates of Rock Mass Strength”, International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences, Vol. 34 n.º 8 pp 1165-1186, Elsevier Science Ltd.
- [7] Barton, N., Lien, R. e Lunde, J. (1974), “Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. Rock Mechanics”, Vl.6/4, pag. 189-236, Springer Verlag, 1974.