POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Identificazione del rischio per fenomeni di caduta massi

Original
Identificazione del rischio per fenomeni di caduta massi / Oggeri, C., Tosco, P.. - In: GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA. - ISSN 1121-9041. - 1:(2005), pp. 23-32.

Availability:
This version is available at: 11583/1400589 since:

Publisher:
GEAM Torino

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

28 November 2026

Identificazione del rischio per eventi di caduta massi

C. Oggeri, P. Tosco

DITAG, Politecnico di Torino

La nota riferisce sulle modalità descrittive e di quantificazione del rischio in relazione ad eventi franosi localizzati, quali i fenomeni di caduta massi. Ponendo come base il riconoscimento delle condizioni geostrutturali e morfologiche del versante, sono inquadrate le procedure per valutare il passaggio dalle condizioni di ricorrenza dei fenomeni al danno potenziale. Il rimando ad un esempio applicativo denota quali siano i margini di incertezza connessi allo studio di fenomeni per loro natura puntuali e discontinui.

Risk evaluation for rockfall events

The note refers about the description and evaluation of localised sliding events, such as rockfalls. The procedure for the evaluation of the links between the condition for rockfall generation and the impact with potential damages are listed, on the basis of the careful description of the geostructural and morphological characteristics. The use of an example shows which are the typical uncertainties due to the phenomena characterized by a local and discontinuous behaviour.

La reconnaissance des risques de chute de pierres

L'article expose les moyens pour décrire et pour évaluer les risques provoqués par les chutes des pierres. En prenant comme base la reconaissance des conditions géostructurelles et morphologiques des parois rocheuses, les méthodes pour d'évaluation des corrélations parmi la génération des événements et les dégâts en pouissance sont énumerées. Un exemple d'application met en évidence les incertitudes dûes a l'étude des phénomènes qui sont caractérisés par des manifestations locales et discontinues.

1. Definizioni

Tra i fenomeni di dissesto lungo versanti rocciosi la caduta massi riveste un interesse particolare in quanto si pone con caratteristiche estremamente variabili in termini di ricorrenza ed intensità; pur essendo generalmente manifestazioni limitate, pongono severi problemi di gestione della sicurezza, sia nel transito lungo strade o linee ferroviarie sia nell'esercizio di strutture lineari (elettrodotti, funicolari, canali etc.).

Lo studio di tali eventi limita il campo di interesse a cinematismi che coinvolgono volumetrie dell'ordine di pochi metri cubi, in genere in massi isolati; elementi rocciosi di dimensioni maggiori o molto più diffusi impongono un approccio ad una scala di osservazione diversa, secondo modalità già note nello studio dei versanti in frana (Barbero, 1998). Nel nostro caso, invece, lo studio è opportuno sia commisurato alla possibilità di interventi specifici e mirati (ubicazione degli stessi e loro funzionalità) e al tipo di infrastruttura da proteggere.

La terminologia abitualmente utilizzata nelle analisi di rischio e nei regolamenti urbanistici e territoriali viene riportata su diversi testi e documenti normativi (ad esempio Circ. PGR Piemonte n.7 LAP, 1999; IDNDR, 1992; Canuti e Casagli,1994; Cruden e Varnes, 1996; Einstein, 1997; Kovari, 2002)

A titolo generale possono valere le seguenti definizioni:

- Intensità *D*: severità geometrica e meccanica del fenomeno potenzialmente distruttivo. Può essere espressa in una scala relativa oppure in termini di una o più grandezze caratteristiche del fenomeno (velocità, volume, energia).
- Probabilità di innesco o rottura *Pr*: probabilità che si inneschi il fenomeno franoso nel tempo.
- Probabilità di propagazione *Pp*: probabilità che la frana raggiunga una determinata sezione.
- Pericolosità (o probabilità di occorrenza): probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità, si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area. E' espressa in termini di probabilità annuale (o di tempo di ritorno). Matematicamente si può esprimere con $H(D)= Pr*Pp$.
- Elementi a rischio *E*: popolazione, proprietà, attività economiche, servizi pubblici e beni ambientali in una data area esposta a rischio.
- Valore degli elementi a rischio *W(E)*: valore economico o numero di unità relative ad ognuno degli elementi a rischio in una data area.
- Vulnerabilità *V(D;E)*: grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti al rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità. E' espressa in una scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) ed è funzione dell'intensità del fenomeno e della tipologia di elemento a rischio.
- Danno potenziale *Wl*: entità potenziale delle perdite nel caso di un evento con intensità fissata. Può essere espresso in termini di numero o quantità di unità esposte oppure in termini monetari. Si esprime con $Wl(D;E) =W(E)*V(D;E)$.
- Rischio: caratterizza le conseguenze del fenomeno potenzialmente dannoso.
- Rischio specifico *Rs:* grado di perdita atteso quale conseguenza, su una determinata tipologia di elemento a rischio, di un particolare fenomeno naturale di data intensità. E' espresso in termini di probabilità annua. Vale $Rs(D;E)=H(D)*V(D;E)$.
- Rischio totale *Rt*: atteso valore delle perdite umane, dei feriti, dei danni alla proprietà e delle perturbazioni alle attività economiche dovuti ad un particolare fenomeno naturale. E' espresso in termini di costo annuo oppure di numero o quantità di unità perse per un anno. Vale $Rt(D;E)= H(D)*V(D;E)*W(E)=Rs(D;E)*W(E)$.

➢ Rischio accettabile: è il numero degli eventi dannosi che si possono verificare ed accettare in una comunità per una determinata tipologia di rischio.

I termini prima elencati sono strettamente interconnessi tra loro, come mostrato nella Fig. 1.

2. Procedure da bibliografia tecnica

Le analisi (Fig. 2, Tab. 1) sulla pericolosità (cioè sull'innesco e sulla ricorrenza delle frane) e sul rischio (cioè sui danni materiali in conseguenza della vulnerabilità delle strutture) sono oggetto da diversi anni di svariati approcci da parte di numerosi autori (Tosco, 2004). Gli elementi guida dei metodi di valutazione quantitativa della pericolosità e del rischio sono comunque abbastanza ricorrenti: le condizioni geomorfologiche del sito (geologia, fenomeni erosivi o pregressi, acclività dei versanti, possibilità di inserimento di difese), le caratteristiche meteo-pluviometriche dell'area, il regime idrogeologico dell'area (ruscellamento superficiale, strutture impermeabili, acquiferi), la tipologia delle strutture bersaglio della frana (da cui derivano vulnerabilità e danni).

Per ciascuna di queste classi gli autori elaborano un'ulteriore suddivisione, attribuendo solitamente stime o punteggi, o con un criterio algebrico, o con un criterio matriciale, per tener in conto la mutua interferenza dei singoli fattori.

Il risultato atteso è solitamente una mappatura, ovvero una classificazione temporale e geografica delle aree in base al fenomeno previsto, alla sua intensità e ricorrenza (con e senza interventi) e quindi al livello di rischio (con e senza interventi). In altri casi si attribuiscono punteggi percentuali, associando l'evento negativo al numero delle occasioni potenziali (i transiti lungo una strada montana in cui normalmente si dislocano localmente blocchi, oppure gli eventi meteorici che, su un'intera area, innescano colate al di sopra di una certa soglia, etc).

Tra i metodi che portano alla individuazione e alla successiva mappatura dei settori instabili in una data area citiamo il metodo LHZ proposto da Ambalagan nel 1995, che attribuisce, mediante opportune tabelle, punteggi ai parametri litologia, struttura, geometria del pendio, altezza relativa, uso del suolo e condizioni idriche superficiali per ottenere un risultato complessivo di pericolosità sti-

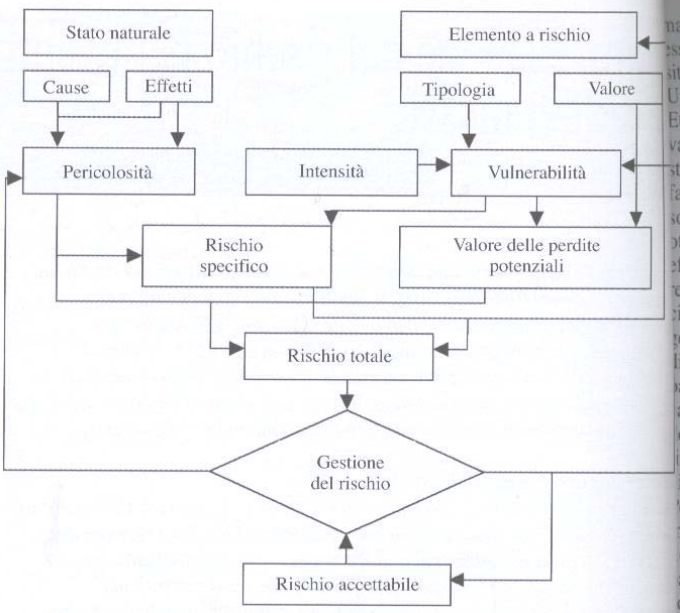


Fig. 1 - *Schema formale per la gestione del rischio da frane (da Canuti e Casagli, 1996).*
Layout for the risk assessment and management for landslide phenomena.

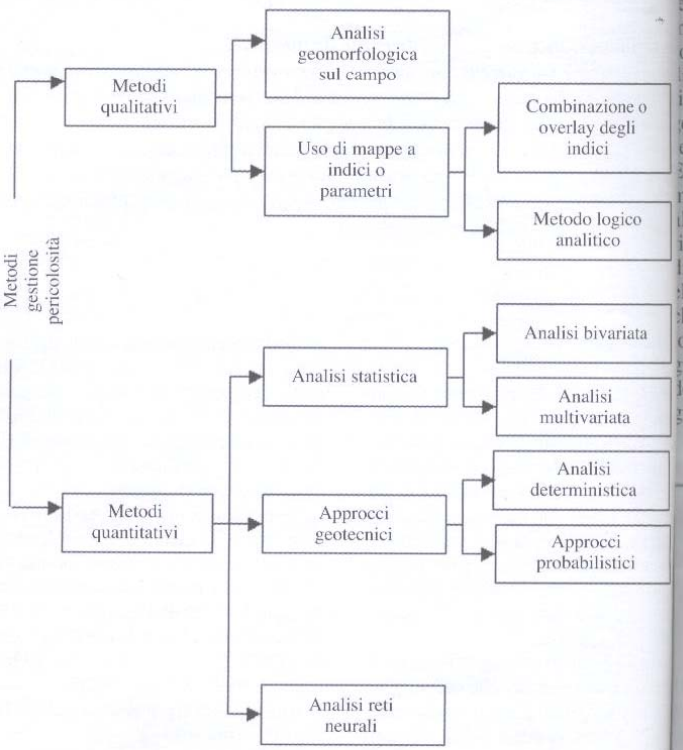


Fig. 2 - *Classificazione dei metodi per la valutazione della pericolosità dovuta a frane proposta da Aleotti, Chowdury (1999).*
Classification of the methods for the occurrence of sliding events.

mata. Il corrispondente punteggio può essere ascritto ad un livello di pericolosità a sua volta cartografabile.
Un altro metodo è proposto da A. EUSEBIO ed E. RABBI (1998) e permette la valutazione del rischio geologico. In questo caso similmente a prima si valuta un fattore di instabilità *Fi* che deriva dalla somma dei punteggi per vari parametri, ottenibili su base osservazionale di casi effettivi. Tali parametri sono il tipo di terreno, la potenza delle formazioni superficiali, i caratteri geomorfologici ed idrogeologici, l'acclività del versante, il tipo di vegetazione e l'utilizzo del suolo. Sulla base dei dati ricavati si può redigere una carta delle instabilità, nella quale si evidenziano aree a diverso grado di instabilità, in settori a diversa propensione al dissesto (HUNTZ, 2003).
Per avere un aiuto in termini decisionali è molto utile il ricorso ai cosiddetti alberi decisionali: si tratta di percorsi che partendo dallo stato di fatto e dal livello di conoscenze dei fenomeni combinano l'insieme dei rapporti costi/benefici sia in termini di aumento della conoscenza dei fenomeni stessi sia in termini di approntamento di interventi. Ogni ramo del percorso comporta quindi costi iniziali o finali diversi ma porta anche ad un livello di rischio diverso, connesso anche a modalità gestionali diverse e a responsabilità diverse (WU et al. in KEITH TURNER, 1996).
E' importante considerare che solo alcuni metodi possono però essere indirizzati alla valutazione della pericolosità e del rischio da caduta massi per infrastrutture di trasporto o lineari. Qui di seguito si elencano i metodi più utilizzati: da quelli che consentono la valutazione di pericolosità e rischio sulla base di aspetti geologico-strutturali a quelli basati sulla teoria della probabilità o su simulazioni traiettografiche.

HGP

Il metodo "Historique, Geomecanique et Probabiliste" (HGP), messo a punto dal LIRIGM di Grenoble prova ad associare due approcci tramite:
- l'analisi statistica delle frane storicamente conosciute in una regione consente di stimare la possibilità che una frana di una categoria di volume dato si produca in una zona per la quale esiste un inventario di frane in roccia;
- la tipicità geomeccanica delle instabilità riconosciute si fa grazie ad una scheda di valutazione della probabilità di rottura dell'instabilità rocciosa, sviluppata al LIRIGM, con lo scopo di poter ordinare gerarchicamente, in maniera oggettiva, le diverse instabilità tra di loro.

Associando la stima della frequenza dell'attività di frana sulla zona oggetto di studio alla gerarchizzazione delle masse rocciose potenzialmente instabili, ci si avvicina alla stima della probabilità di crollo delle instabilità individuate in funzione del tempo.

Integral risk management: E. PRINA, C. BONNARD & L. VULLIET (EPFL, Lausanne)

Un recente ed interessante esempio di applicazione delle metodologie di valutazione della vulnerabilità e del rischio per una strada di montagna soggetta a frane ci viene da E. PRINA, C. BONNARD e L. VULLIET (2004) per quanto concerne la strada per il paese di L'Etivaz, nel Canton Vaud in Svizzera. La strada è soggetta a diverse fenomenologie contestuali: caduta di massi, colate di fango, valanghe e fenomeni franosi complessi.
In tale contesto è stata quindi applicata una metodologia progressiva di (Fig. 3):
1) inventario delle situazioni di dissesto, anche su base storica, e reperimento dei dati geologici, geomorfologici ed idrogeologici base;
2) redazione della carta di pericolosità;
3) studio della vulnerabilità, in base alle infrastrutture e alle opere di protezione presenti;
4) definizione del rischio per tratti di strada, dalla combinazione di pericolosità e tipologia di evento, con redazione di una cartografia a campiture (es. a diversa colorazione). La rappresentazione cartografica è il supporto base per caricare e restituire le informazioni; a ciò deve accompagnarsi un repertorio di procedure basate sulla gestione dell'apertura della strada, sulla raccolta dei dati meteo, su eventuali monitoraggi etc.

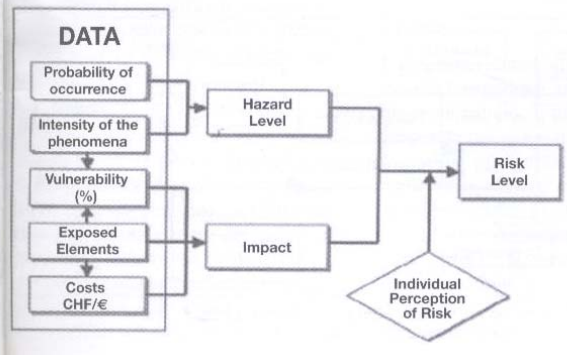


FIG. 3 - *Schema generale applicato alla valutazione del rischio (PRINA, BONNARD, VULLIET, 2004).*
Flow chart for risk management.

LCP

Il metodo "Laboratoire des Ponts et Chausses" permette la realizzazione di studi completi di valutazione dei pericoli rocciosi locali: la localizzazione e la caratterizzazione delle instabilità, il calcolo delle aree di invasione ed infine la definizione dei lavori da mettere in opera per la prevenzione/protezione. La nozione di probabilità di rottura è espressa dalla coppia probabilità/termine di rottura, definita in modo empirico a partire da criteri. La probabilità di propagazione è oggetto di studi traiettografici per i quali è stato messo a punto uno strumento specifico.

MATTEROCK

Il metodo MATTEROCK (ROUILLER et al., 1998) considera che le frane di crollo e le cadute di blocchi siano provocate dalla presenza di discontinuità nei massicci rocciosi. il territorio viene dunque suddiviso in aree strutturali ad assetto strutturale omogeneo. Il confronto tra l'assetto strutturale e la topografia, informatizzata sulla base di un DTM, permette di identificare le zone potenzialmente instabili. Il sopralluogo dei dati sensibili consente di definire delle instabilità e di attribuire loro un indice di pericolosità che è una stima della probabilità di rottura. L'analisi delle traiettorie permette di stabilire dei perimetri di pericolo in funzione della pericolosità e delle energie dei blocchi. Sul piano della zonizzazione il metodo applica le disposizioni federali elvetiche: così le carte di pericolo MATTEROCK sono carte di perimetro di accadimento di energia di cadute blocchi

per unità di tempo. in conclusione, Matterock costituisce parametri in modo operativo ed è adatto per una gamma maggiore di volumi di frana. Grazie all'utilizzo di un modello digitale del terreno permette identificazioni rapide delle instabilità.

M.C.F. (magnitude-cumulative frequency) (HUNGR, EVANS, HAZZARD, 1999)

La relazione M.C.F. è molto utilizzata per lo studio dei rischi provocati da fenomeni naturali, ad esempio terremoti. Il primo passo da effettuare per l'applicazione di tale metodo, consiste nel censire, anno per anno, i crolli che hanno interessato la sede stradale, specificando, ove possibile, anche la loro volumetria. Combinando la frequenza annuale di crollo in un dato tratto di strada per ogni categoria di volume con altri dati dipendenti dalle caratteristiche stradali e del traffico, si possono quindi calcolare ora le P(A), cioè la probabilità annuale che un incidente provochi la morte di almeno uno degli occupanti veicolo, per le varie volumetrie possibili, ipotizzando una data intensità di traffico.

QRA di Oboni (2003)

Il risk assessment quantitativo (QRA) qui citato è stato studiato per essere applicato a strutture lineari (strade, ferrovie, pipelines).
Il metodo, nelle successive varianti, tiene in considerazione il sistema vulnerabile (ad esempio la strada), identifica i pericoli (possibilità di rottura del pendio e di altri elementi), individua le possibilità di rotture isolate, compone tali rotture in eventi complessi, valuta la probabilità di questi ultimi eventi sulla scorta di dati storici ed esperienze locali, stima le conseguenze degli eventi e, infine, restituisce i risultati sotto forma di diagrammi grafici, in cui si riportano ad esempio le probabilità degli eventi e i danni correlati.

RES

L'approccio "Rock Engineering System" (HUDSON,1992) permette di variare il numero ed il tipo di parametri utilizzati in funzione degli obbiettivi che lo studio si prefigge. I principi di base consistono in:
- identificare i parametri che governano la caduta massi
- quantificare l'influenza reciproca e l'importanza relativa di ciascuno di questi parametri
- ottenere un indice di pericolosità, il "Rockfall Instability Index" (RII), dato dalla somma dei valori dei parametri ponderata in funzione dell'importanza relativa degli stessi.

Questo metodo può applicarsi alla quantificazione della stabilità dei versanti (MAZZACCOLA e HUDSON, 1996) oppure alla stima della pericolosità fino all'analisi di rischio (CANCELLI e CROSTA, 1993a/b, 1999).

Analisi del rischio da frana da crollo di CANCELLI e CROSTA (1999)

La proposta metodologica per la valutazione del rischio da crollo è basata sull'approccio del Rock Engineering System (HUDSON, 1992). I passi alla base di questa metodologia sono indipendenti dal tipo di problema e consistono nella scelta dei parametri rilevanti per il problema in esame, nell'analisi delle interazioni binarie tra i parametri, nella valutazione dell'importanza relativa tra le interazioni, nell'assegnazione di indici a differenti classi di valore dei parametri, nel calcolo finale di un indice di intensità di crollo R.I.I..
CANCELLI e CROSTA indicano 15 parametri qualitativi e quantitativi, che controllano la severità meccanica e geometrica, mentre nel 1999 tale approccio è stato semplificato dagli stessi autori riducendo il numero dei parametri a 9 (Dimensione e forma dei blocchi, Topografia e geometria del versante, Moto dei blocchi, Traiettorie del crollo, Massima distanza raggiunta, Velocità, Materiale lungo il versante, Resistenza ammasso roccioso, Rugosità superficie di impatto)
I parametri selezionati in un sistema sono importanti sia singolarmente sia perché interagiscono reciprocamente, poiché la variazione di uno dei fattori può causare variazioni negli altri. Le interazioni reciproche tra i parametri possono essere valutate agevolmente utilizzando una disposizione matriciale con i parametri disposti lungo la diagonale di una matrice delle interazioni, mentre le caselle laterali rappresentano le 210 interazioni reciproche tra coppie di parametri.
CROSTA e LOCATELLI (1999) presentano invece una matrice semplificata che include solo sette parametri (dimensione blocco, traiettoria, rapporto distanza d'arresto e massimo avanzamento potenziale, velocità, tipo di materiale, spaziatura discontinuità, rugosità superficiale pendio) e 42 interazioni. Ciascuna riga passante attraverso un parametro posto lungo la diagonale principale descrive l'influenza del parametro sul sistema ("causa"), mentre ciascuna colonna descrive l'influenza del sistema sul parametro ("effetto"). Tra questi parametri alcuni svolgono un maggiore controllo sul sistema rispetto ad altri e viceversa. La quantificazione di tali influenze è ottenuta, come in CANCELLI e CROSTA (1993), tramite un metodo di codifica semiquantitativa in cui l'importanza di un'interazione è espressa con un codice (0: inesistente od ininfluente, 4: interazione critica).
L'indice intensità di crollo R.I.I., risultato dell'analisi, fornisce un'indicazione sul livello di intensità del fenomeno, basato su criteri geometrici e meccanici senza riferimento alla valutazione della pericolosità e del rischio.
Una volta valutato l'indice RII, i passi da effettuare per l'applicazione di tale metodo sono schematizzati nella Figura 4.

RHAP

Il metodo "Rockfall Hazard Assessment Procedure" (RHAP) (Regione Lombardia, 2000) è stato concepito per premettere di valutare e perimetrare in modo speditivo e con costi limitati la pericolosità

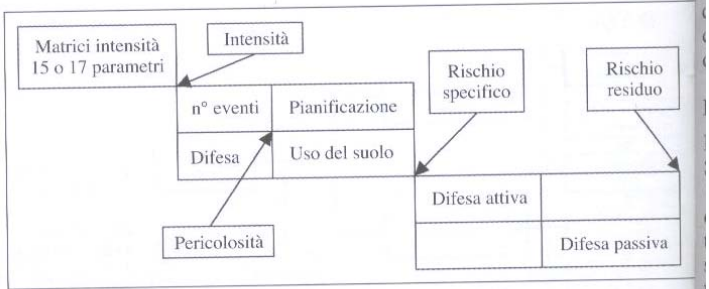


FIG. 4 - *Schema operativo del metodo di CANCELLI e CROSTA, 1999.*
Operative layout from Cancelli and Crosta.

ed il rischio da crollo. Il metodo è applicabile a crolli di modesta dimensione (<1000 m³) su aree non molto vaste.
L'applicazione del metodo viene effettuata attraverso i passaggi di seguito illustrati:

- definizione dei siti instabili;
- studio geomeccanico delle pareti instabili;
- delimitazione delle aree omogenee;
- delimitazione delle aree che possono essere raggiunte dal crollo (tramite programmi di simulazione di caduta massi);
- zonazione del pendio in tre zone, rispettivamente con arresto del 70%, del 95% e del 100% e attribuzione di una pericolosità preliminare a ciascuna di esse;
- valutazione delle probabilità di distacco per ciascuna delle aree omogenee in parete;
- rivalutazione della pericolosità preliminare in funzione della probabilità di distacco per ottenere la pericolosità finale;
- valutazione del rischio in funzione delle categorie di elementi a rischio interessate dal crollo.

Il metodo RHAP è un metodo operativo, rapido e ben codificato. Basato essenzialmente sull'osservazione dell'attività della zona omogenea studiata, è adatto alle frane di volume ridotto.

RHRON

Il metodo RHRON (Franklin e Senior, 1997), è stato studiato appositamente per le morfologie tipiche della regione dell'Ontario. Tuttavia viene citato in quanto si tratta di una versione modificata del RHRS. Questo perché il RHRS, valido per molti casi, non si adatta bene a situazioni come quelle dell'Oregon, nelle quali prevalgono movimenti a velocità minore. Per calcolare il valore di tale indice si valutano parametri quali la magnitudo, la frequenza e le conseguenze del fenomeno, sulla base di dati geomeccanici, storici e delle caratteristiche stradali.

RHRS

Il metodo RHRS (Rock Hazard Rating System, Pierson et al, 1990; Hoek, 1999) consente, attraverso un rilievo speditivo ed un'elaborazione dei dati altrettanto semplice che non richiede l'uso di software specifico, di effettuare un confronto tra i punteggi totali relativi ai vari tratti stradali sottostanti le pareti rocciose e quindi di definire una scala di pericolosità nella quale a punteggio maggiore corrisponde la priorità maggiore in termini di interventi. Il metodo RHRS è stato ideato per un sistema stradale a scorrimento veloce di dimensioni notevolmente superiori rispetto a quelle del sistema viario alpino. Ciò comporta almeno due tipologie di differenze: il primo, di tipo "stradale", influisce sui valori critici da assegnare a parametri come la larghezza della carreggiata, visuale, ecc. Il secondo, di tipo "geologico", deriva dal fatto che un'autostrada ha uno sviluppo chilometrico notevole e può attraversare contesti lito-strutturali disomogenei, differenziabili tra loro sulla base di pochi elementi.
Per una migliore caratterizzazione geologica dei siti è stato proposto (L. Scesi, S. Seno) un metodo meno qualitativo per condurre l'analisi preliminare; per quanto riguarda invece l'analisi di dettaglio, sono stati studiati due tipologie diverse di approcci, uno geometrico-geomeccanico (A. Mazzucchelli, S. Seno), l'altro basato su un'applicazione del Rock Engineering System (Mazzoccolla e Hudson, 1996).
Per l'analisi del rischio, una volta individuati i tratti a maggiore criticità, si fa spesso ricorso all'utilizzo di un albero degli eventi applicato (cfr. caso dell'Argillite Cut, Bunce, 1994; Hoek 2000).

SMR

Il SMR (Slope Mass Rating, Romana 1993) è un metodo che, analizzati l'orientazione della discontinuità e il metodo di scavo, porta a determinare, partendo dal RMR di Bieniawski, un indice a valore numerico. Romana individua cinque diverse classi sulla base dell'indice SMR, per ognuna delle quali fornisce indicazioni sul grado di stabilità del pendio, sui possibili cinematismi di rottura, sulla necessità di opere di sostegno.

STONE

Il programma Stone simula in tre dimensioni la traiettoria di caduta di un masso lungo un pendio. Il programma è stato progettato per utilizzare dati di ingresso ricavati da informazioni tematiche disponibili o che possono essere acquisiti da carte geologiche, geomorfologiche e di uso del suolo o attraverso analisi geologico-morfologiche speditive. L'obbiettivo del programma è quello di produrre informazioni sostanzialmente distribuite utili per la definizione delle condizioni di pericolosità di caduta massi a scale regionale e locale.

Studio meccanico probabilistico della stabilità dei pendii in roccia

Il metodo permette di valutare la probabilità di rottura di un pendio in roccia abbinando un modello meccanico all'equilibrio limite alla tecnica statistica di Monte Carlo. L'analisi viene effettuata in condizioni bidimensionali e si articola in due punti:

- generazione casuale di superfici di possibile scivolamento a gradini sulla base delle distribuzioni statistiche di giacitura, persistenza, ecc.
- calcolo delle probabilità di rottura come rapporto tra l numero di fattori di sicurezza minori di uno ed il numero totale di fattori di sicurezza calcolati.

Teorema del binomio (Bunce, Cruden, Morgenstern, 1997)

Il metodo del teorema del binomio è stato utilizzato per la valutazione del rischio di un tratto dell'Highway 99, lungo l'Argillite Cut, in British Columbia, in seguito ad un incidente che ha causato la morte di un passeggero e l'invalidità del guidatore. Questa metodologia prevede dapprima la suddivisione del tratto di strada in questione in zone a punteggio RHRS simile. Segue quindi l'analisi temporale degli eventi di crollo: i dati necessari si ottengono ad esempio dai rapporti degli addetti alla manutenzione della strada o dai segni lasciati sull'asfalto dai blocchi crollati. Per la valutazione del rischio si devono però fare delle semplificazioni: traffico uniformemente distribuito nello spazio e nel tempo e veicoli di pari lunghezza. Queste semplificazioni sono necessarie se si vuole utilizzare il teorema del binomio, che porta alla fine a calcolare la probabilità annuale che uno o più veicoli siano coinvolti in un incidente a causa di crolli P(A) e la probabilità annuale di incidente per ogni veicolo PAV; si considerano solitamente i tre tipi di impatto: impatto di blocco su veicolo fermo, impatto di blocco su veicolo in movimento, impatto di veicolo in movimento con blocco caduto in precedenza.
Viene qui di seguito riportata una tabella che riassume gli obiettivi di ciascuno dei metodi prima elencati. Ogni metodo, al suo interno, adotta poi procedure statistiche più o meno elaborate, in funzione della disponibilità di dati e della semplicità di approccio ingegneristico.

3. Procedura modificata per la quantificazione del rischio

Per analisi di rischio si intende una procedura sistematica atta alla caratterizzazione di un evento indesiderato riguardante la probabilità dell'evento stesso e l'entità del danno che ne conseguirebbe. Nei casi in cui non sia possibile far riferimento ad un'analisi storica che permetta di risalire ad una distribuzione di frequenza delle volumetrie del materiale roccioso caduto, è opportuno utilizzare un procedimento ad "event tree", sul modello di quello proposto da Bunce (1994) nella versione modificata da Hoek (2000) e ancora elaborato sulla base dei dati a disposizione e degli interventi pianificati.

L'utilizzo di un "event tree" permette di analizzare tutte le possibili conseguenze di una caduta massi, a seconda del periodo dell'anno considerato, della presenza o meno di opere di protezione attive o passive, utilizzando una rappresentazione logica di una successione di eventi che possono condurre ad uno specifico risultato.

È utile ricordare che, considerati due eventi tra loro indipendenti (ad esempio un fenomeno franoso ed il contemporaneo passaggio di un veicolo sulla stessa verticale) la probabilità che se ne verifichi almeno uno è data dalla somma delle probabilità dei singoli eventi, mentre la probabilità che essi si verifichino contemporaneamente è data dal prodotto delle singole probabilità. Si possono così comporre i vari fattori concorrenti, ottenendo le probabilità di avere uno o più eventi fatali in relazione al periodo di osservazione. Il calcolo può essere effettuato per i diversi mesi dell'anno, in funzione dei dati correlati alla situazione climatica. Per maggior chiarezza, la visualizzazione dei risultati può risultare in termini di numero di transiti mensili entro cui si possono avere rispettivamente uno, due, tre eventi fatali (coincidenti con il numero di decessi se per ogni evento si registra un solo passeggero per veicolo). Per ottenere tale dato si ipotizza pari ad 1 la probabilità di evento fatale e si valuta quindi per via reciproca il numero di transiti necessari a raggiungere tale valore unitario.

Questo procedimento può essere utilizzato anche per la valutazione del numero di transiti entro cui si può avere un incidente dalle conseguenze non fatali; inoltre può essere utile per quantificare il miglioramento dovuto alla messa in opera di opere di protezione (Tab.2).

Tab. 1 - *Elenco dei metodi principali.*
List of main methods in use.

Metodo	Pericolosità	Rischio	Obiettivi
HGP	X		Valutazione della probabilità di crollo delle instabilità a partire dalla serie storica e da dati geomeccanici
Integral risk management (EPFL, 2004)	X	X	Procedura di risk management su base storica, geologica e geomorfologica
LCP	X		Valutazione dei pericoli rocciosi basata su studi traiettografici
MATTEROCK	X		Quantificazione della probabilità di rottura da dati topografici (con DTM), geeomeccanici e traiettografici
MCF	X		Calcolo della probabilità annuale di incidente mortale a partire da serie storica
QRA (Oboni, 2003)	X	X	Procedura di risk assessment: valuta le probabilità di evento e stima le conseguenze sul sistema
RES (vers. Cancelli e Crosta, 1993a/b, 1999)	X	X	Valutazione di un indice di rischio residuo da dati geomeccanici, morfologici e di simulazione
RHAP	X	X	Valutazione di pericolosità e rischio da dati geomeccanici e di simulazione
RHRON	X		Valutazione di un indice di pericolosità da parametri geomeccanici e stradali
RHRS	X		Valutazione di un indice di pericolosità da parametri geomeccanici e stradali
RHRS (vers. Scesi, Mazzucchelli, Seno)	X		Valutazione di un indice di pericolosità geostrutturali, geomeccanici e stradali
SMR	X		Classificazione basata su RMR e su parametri geometrici
Studio meccanico probabilistico	X		Valutazione della probabilità di rottura di un pendio da studio che abbina Equilibrio Limite a Monte Carlo
STONE	X		Valutazione delle aree di propagazione da analisi traiettografica in 3D
Teorema binomio	X		Calcolo della probabilità annuale di incidente mortale basata su serie storica

I dati che concorrono al calcolo del numero di transiti necessari per l'accadimento di un evento fatale sono:

1. evento scatenante
2. caduta blocchi
3. blocchi fermati
4. veicolo sotto pericolo
5. impatto significativo
6. effetti indiretti.

Di seguito si riporta un'analisi più dettagliata dei parametri in questione.

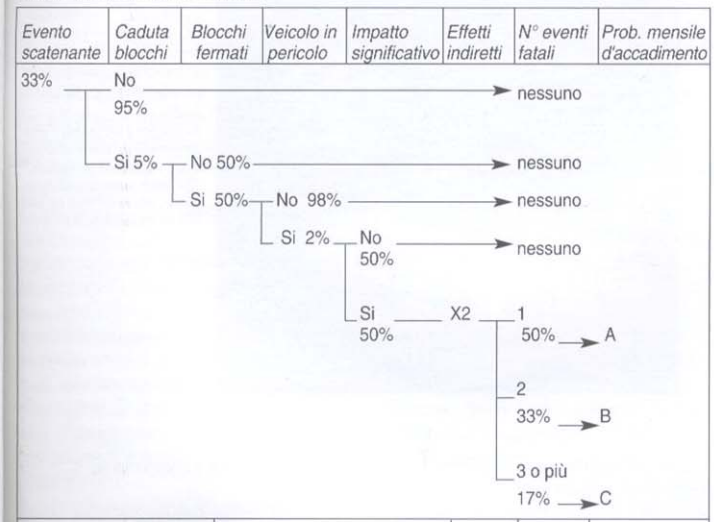
Evento scatenante (%)

Rappresenta il numero di giorni in cui si possono avere condizioni favorevoli al distacco di materiale roccioso.

Come eventi scatenanti si considerano:

- clima: include precipitazioni (natura, andamento annuale, intensità e durata degli eventi maggiori) e temperatura (massima/minima/media, andamento annuale, cicli di gelo/disgelo);
- sollecitazioni sismiche;
- passaggio di fauna selvatica o escursionisti;
- incendi; cicli gelo/disgelo; inoltre un incendio comporta la distruzione della vegetazione presente: quest'ultima può stabilizzare e contenere il materiale roccioso instabile, e può intervenire attivamente durante la caduta dello stesso.
- sollecitazioni cicliche ad alta frequenza (esplosioni, traffico stradale, macchine vibranti).

TAB. 2 - *Schema ad albero degli eventi utilizzato (valori a titolo di esempio).*
Example of a scheme for an event tree.



Probabilità mensile di 1 evento fatale	A+B+C	=D	Transiti	1/D
Probabilità mensile di 2 eventi fatali	B+C	=E	Transiti	1/E
Probabilità mensile di 3 o più eventi fatali	C		Transiti	1/C

TAB 3 - *Distribuzione di eventi scatenanti per ogni mese dell'anno.*
Distribution of critical events on monthly basis

	Precipitazioni	Gelo/ disgelo	Sismi	Incendi	Altri eventi	Giorni /mese	%mese
Gennaio	5,00	15,00	0,08	0,11	0,83	21,02	70,08
Febbraio	5,00	15,00	0,08	0,11	0,83	21,02	70,08
Marzo	10,00	10,00	0,08	0,11	0,83	21,02	70,08
Aprile	9,00	5,00	0,08	0,11	0,83	15,02	50,08
Maggio	16,00	0,00	0,08	0,11	0,83	17,02	56,75
Giugno	9,00	0,00	0,08	0,33	0,83	10,25	34,15
Luglio	9,00	0,00	0,08	0,33	0,83	10,25	34,15
Agosto	6,00	0,00	0,08	0,33	0,83	7,25	24,15
Settembre	7,00	0,00	0,08	0,11	0,83	8,02	26,75
Ottobre	11,00	0,00	0,08	0,11	0,83	12,02	40,08
Novembre	13,00	10,00	0,08	0,11	0,83	24,02	80,08
Dicembre	9,00	15,00	0,08	0,11	0,83	25,02	83,41

Caduta blocchi (%)

Indica la probabilità che in uno dei giorni etichettati come "evento scatenante" si abbia effettivamente caduta di materiale. Per la valutazione di questo dato, è opportuno suddividere il versante in settori a caratteristiche omogenee; quindi si effettua per ogni settore il rapporto percentuale tra l'area instabile e l'area del settore stesso.

Blocchi fermati (%)

Rappresenta la percentuale di blocchi che raggiungono la sede stradale anche dopo la messa in opera delle opere di protezione: rappresenta una stima percentuale dell'efficacia nella riduzione degli impatti e deriva dalla simulazione con appositi codici di calcolo e da prove di distacco e di lancio lungo il versante, di impareggiabile utilità pratica.

Veicolo sotto pericolo (%)

Indica la probabilità che un singolo veicolo di una data lunghezza animato da una velocità stabilita occupi il tratto di strada in esame, in percentuale nell'arco di un mese.
Per la valutazione di questo parametro sono necessari i seguenti dati:

- lunghezza tratto (km);
- lunghezza veicolo (m);
- velocità (km/h): si considera il limite di velocità imposto; tuttavia, cautelativamente, nei calcoli è bene ipotizzare una velocità minore, verosimile per il tratto considerato (aumentando quindi l'esposizione al rischio).

Impatto significativo (%)

Rappresenta la possibilità di avere un impatto critico su 100 ipotetici impatti; in accordo con quanto teorizzato da BUNCE (1994) e HOEK (2000) si ritiene opportuno, nel caso di valutazione di evento fatale, l'utilizzo del valore 50%. Il perché di questo valore risiede nel fatto che non tutto il veicolo è occupato da persone (può essere impattata cioè una parte non "sensibile" del veicolo, come il vano motore o il vano portabagagli) e nel fatto che non tutto il materiale crollato possa avere energia cinetica sufficiente a penetrare la carrozzeria. Per la valutazione invece dell'accadimento di un incidente lieve la percentuale sarà evidentemente del 100%.

Effetti indiretti

È un fattore che tiene conto, oltre degli effetti diretti dovuti all'impatto, degli effetti indiretti: il guidatore può ad esempio perdere il controllo del mezzo e quindi coinvolgere altri veicoli, finire fuori strada, etc. E' funzione delle caratteristiche del tratto di strada in questione (guardrail, larghezza carreggiata, presenza di curve o dossi, tipologia del traffico, etc.).

Esempio

Si riporta di seguito l'applicazione del metodo per valutare statisticamente la probabilità di accadimento di un incidente fatale o lieve in relazione alle cause scatenanti il fenomeno d'instabilità, all'efficacia delle opere attive e passive ed al traffico transitante, oltre a effettuare il confronto tra lo stato di fatto e la situazione a interventi in opera.
L'esempio proposto si riferisce ad un versante montano roccioso e particolarmente acclive, alla base del quale corre per 1400 m il tratto di strada a rischio (Fig.5). Il

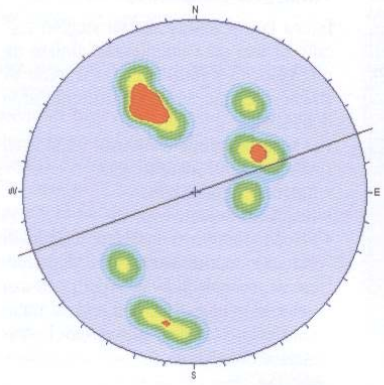




FIG. 5 - *Esempio citato: tratto di strada soggetta a dissesti e stereogramma relativo.L'ammasso roccioso è marcatamente discontinuo, con presenza sia di blocchi sia di lastre.*
Reference example: geostructural stereonet of a rock slope subjected to rock fall. The rock mass is a discontinuum, characterized by both blocky elements and slabs.

versante è stato diviso in cinque settori a caratteristiche omogenee (A, B, C, D, E). Per il settore A è stata pianificata la costruzione di una galleria paramassi aperta sul lato di valle, per la quasi tutta la sua lunghezza, mentre per gli altri settori B, C, D, E (roccia scistosa) sono state proposte soluzioni quali barriere a rete, disgaggi, demolizioni, chiodature, posa di reti in aderenza. Vista la eterogeneità degli interventi da effettuare, è stato condotto il calcolo separatamente per settore A e quindi per gli altri settori B, C, D, E.
Si riportano, nella Tabella 4 e in Figura 6, i risultati ottenuti per il mese di dicembre, il più critico dal punto di vista di dell'evento scatenante.
Le analisi effettuate hanno valore sicuramente comparativo, in quanto evidenziano, con carattere di stima, le variazioni tra situazioni in momenti diversi, diversi tra loro ad esempio in seguito all'installazione di opere di consolidamento e protezione; in termini quantitativi, dopo la realizzazione degli interventi, si evidenzia un aumento del numero di transiti necessari statisticamente per avere un evento fatale (o un incidente lieve); infatti gli interventi pianificati consentono una sensibile riduzione della pericolosità (attraverso rimozioni e/o consolidamenti di elementi instabili) e dell'intensità (attraverso la diminuzione delle volumetrie mobilizzabili simultaneamente, ad esempio con chiodature, barriere, etc.) degli eventi, poiché si interviene direttamente sulle aree instabili. Inoltre la gestione della circolazione stradale, concomitante alla realizzazione degli interventi, nelle circostanze più avverse consente il raggiungimento di livelli di rischio statisticamente accettabili, pur nella consapevolezza di una impossibilità dell'eliminazione o degli eventi o delle conseguenze, a meno di ricorrere a soluzioni alternative con tipologie completamente diverse (OGGERI, 2000).

4. APPLICABILITÀ E CONCLUSIONI

In eventi di tipo geologico e come conseguenza in molte delle opere di difesa e di consolidamento realizzate in tali contesti, non esiste la possibilità di avere sempre

TAB 4 - *Risultati dell'analisi di rischio in termini di numero di transiti(mese di dicembre)*
Results of the risk analysis in terms of number of runs for the month of December.

	Stato di fatto		Post-interventi	
Sezione	Evento fatale	Incidente lieve	Evento fatale	Incidente lieve
A	7400	2960	166507	63431
B+C+D+E	13156	4454	59202	19029

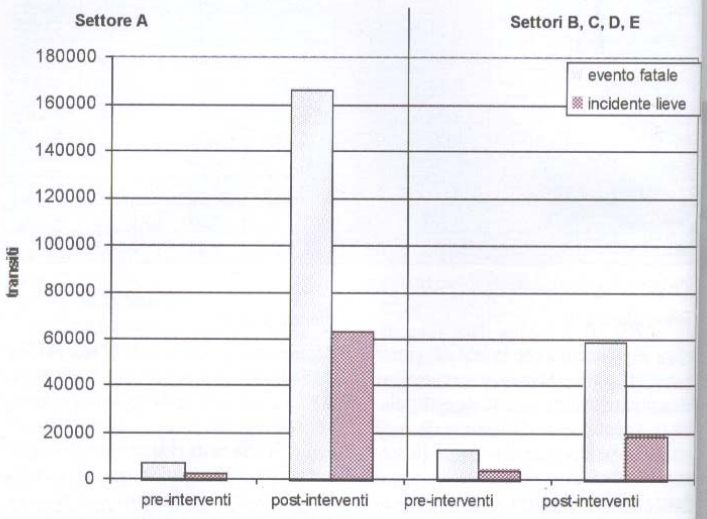


FIG. 6 - *Risultati dell'analisi di rischio (mese di dicembre) .*
Results of the risk analysis for the month of December.

una risposta deterministica sui tempi di accadimento, sull'intensità del fenomeno e sulle conseguenze di esso sulle infrastrutture, a causa nella mutevolezza dei fattori e delle condizioni coinvolte nella genesi dei fenomeni e nel loro sviluppo.
Per tali ragioni da alcuni anni si sta delineando come capitolo distinto nello studio dei fenomeni franosi l'argomento della valutazione del rischio (Risk Assessment) e della gestione del Rischio (Risk Management).
Il primo approccio definisce le sorgenti di incertezza e i campi di variabilità dei vari parametri coinvolti, auspicabilmente in termini quantitativi. Per soddisfare a tale proposito occorre definire delle procedure di valutazione che, comunque, anche sforzandosi di tenere in considerazione tutti i fattori coinvolti, risultano essere convenzionali e soggette ad un approccio probabilistico.
Il secondo approccio invece interviene per definire procedure operative una volta definiti i valori del rischio (Budetta, 2003), come entità del danno e su base temporale. Ad esempio può coinvolgere procedure di monitoraggio o di regolamentazione del traffico lungo una strada esposta.
Sulla scorta di quanto disponibile in letteratura e dell'esame diretto di casi pratici si possono evidenziare alcuni punti essenziali:
- l'analisi geostrutturale è una base fondamentale ed irrinunciabile, sulla quale si fondano le limitazioni delle incertezze legate alla dimensione dei blocchi e alle possibilità di innesco dei fenomeni ed ha diretta influenza su molti dei parametri impiegati nelle procedure menzionate;
- la disponibilità di rilievi morfologici, anche effettuati con tecniche di scansione remota oggi di crescente diffusione ed affidabilità, consente di discriminare la geometria del problema nei casi bidimensionali o tridimensionali;
- la scelta di un metodo di quantificazione della pericolosità porta generalmente a minori incertezze, mentre la determinazione del rischio è pesantemente influenzata da fattori aleatori e talora di difficile controllo (vulnerabilità della struttura per impatti successivi, comportamento degli utenti, installazione di segnaletica addizionale o variabile etc.);
- la manutenzione e la sorveglianza periodica determinano una significativa incidenza sulla validità delle valutazioni quantitative utilizzate nei metodi di stima.

La procedura presentata nell'esempio dagli autori è stata incentrata su un albero degli eventi, in modo da pervenire ad una quantificazione pratica di una grandezza di riferimento di immediata comprensione, senza sottintendere né gli aspetti di pericolosità (prima serie di parametri tipici del versante e del tracciato) né quelli di vulnerabilità (interventi di difesa) né, infine, quelli di esercizio della strada (comportamento). Analogo approccio può essere seguito per la caratterizzazione di bersagli fissi o di strutture di altro tipo (ad es. linea ferroviaria).
Va sottolineato come la buona conoscenza delle condizioni del versante (rilievo gesotrutturale) e della sua dinamica (geomorfologia e simulazioni o prove di lancio), influenzino la miglior definizione del numero di transiti critici, senza necessariamente abbassarne il valore, mentre la sua riduzione dipende dagli interventi, attivi o passivi. Per poter considerare un benefico effetto della migliore conoscenza delle condizioni del versante sulla sicurezza è invece necessario agire in termini di gestione del traffico (ad esempio con l'interdizione dei giorni soggetti ad un "evento scatenante").
E' allo studio, a complemento del metodo proposto, una prima parte dedicata alla quantificazione dei parametri connessi alla massa rocciosa (dimensione e cinematismo dei blocchi), nonché una indicizzazione del livello di incertezza nella sequenza di analisi del problema (a partire dalla caratterizzazione dell'ammasso roccioso, alla morfologia, alla dinamica del versante). Va comunque ribadita la primaria importanza della fase di rilievo geostrutturale, indispensabile per l'individuazione dei parametri geomeccanici del versante. Altresì si rimarca come, ai fini di una efficace ricostruzione storica e statistica degli eventi, andrebbero sempre registrati con cura, ove possibile, tutti gli eventi manifestatisi lungo i tratti di versante osservabili, indipendentemente dal fatto che possano aver cagionato danni.

Bibliografia

[1] AGS, 2000 - "Landslide Risk Management: Concepts and Guidelines", Australian Geomechanics Society Subcommittee on landslide Risk Management, Australian Geomechanics Journal, Volume 35, No.1, pp. 49-92.

[2] Aleotti P., Chowdury R. - "Lanslide hazard assessment: summary review and new perspectives" Bull.Eng. Geol. Env. N.58, 1999.

[3] Ambalagan R. - "Software for engineering control of landslide and tunnelling hazards", chapter 19, A.A. Balkema Publishers.

[4] Barbero M., Barla G., Mortara G. - "Previsione degli eventi franosi a grande rischio", MIR 1998, Torino.

[5] Budetta P. - "The modified Rockfall hazard rating system: a new toll for roads risk assessment" Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 01659, 2003 European Geophysical Society 2003.

[6] Budetta P. - "Esposizione al rischio delle strade nei riguardi dei fenomeni di caduta massi", Bozza del 10 ottobre 20 del Gruppo di lavoro UNI –U 7103, I sezione: "Programma d'intervento".

[7] Bunce C.M. 1994 - Risk Analysis for Rock Fall on Highways. MSc thesis submitted to the department of Civil Engineering, University of Alberta, Canada. 129 pages.

[8] Bunce C. M., Cruden D.M. - Morgenstern, "Assessment of the hazard from rock fall on a highway", Canadian Geotechnical Journal 34: pp. 344-356 (1997).

[9] Cancelli A., G.B. Crosta - "Previsione e prevenzione per frane da crollo: descrizione del fenomeno e analisi del rischio", Convegno su previsione e prevenzione di movimenti franosi rapidi, Trento, 17-18-19 giugno 1999.

[10] CANUTI P., CASAGLI N. TARCHIANI U. - "Criteri generali per la valutazione dei livelli di pericolosità e di rischio da frana, con indicazione delle normative e delle tipologie di intervento per la mitigazione del rischio; La Protezione Civile verso gli Anni 2000. P. Malesani (Editor). CISPRO e CNR, Firenze: 90-105, 1999.

[11] CROSTA G. e LOCATELLI C. (1999) - Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo. In: Orombelli (editor): Studi in onore di Severino Belloni. GlaucoBrigati,Genova.

[12] EINSTEIN H.H. (1988) - Special Lecture: Landslide risk assessment procedure. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, July 1988, Lausanne. In: C. Bonnard (Editor) "Landslide", v. 2, pp. 1075-1090.

[13] EUSEBIO A, RABBI E. - "Rischio geologico e protezione delle infrastrutture", Le strade 12/98 pp.40-42.

[14] FELL R., FINLAY P.J. - "Landslides: risk perception and acceptance", Canadian Geotechnical Journal 34: pp. 169-188, 1997.

[15] FELL R. - "Landslides risk assessment and acceptable risk", Canadian Geotechnical Journal 31: pp. 261-272, 1994.

[16] FRANKLIN, J.A., SENIOR, S.A. (1997). - "The Ontario rockfall hazard rating system". En Engineering Geology and the Environment. Marinos, Koukis, Tsiambaos & Stournaras (eds). Edit. Balkema. Rotterdam, Holanda.

[17] GIOIA U., MAZZUCCHELLI A., SCESI L., Seno S. - "Pareti rocciose instabili e strade: un sistema di valutazione delle priorità di intervento", GEAM Marzo 2001: pp. 75-82.

[18] HANTZ D., VENGEON J.M., C. DEUSSAGFE-PEISSER - "An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment", Natural Hazards and Earth System Sciences 2003 3:693-701, European Geosciences Union 2003.

[19] HOEK P. - "Analysis of rockfall hazards", Practical rock engineering.

[20] HUDSON - Rock Engineering Systems: Theory & Practice, Ellis Horwood, 1992.

[21] HUNGR O., EVANS S.G., HAZZARD J. - "Magnitude and frequency of rock falls and risk slides along the main transportation corridors of southwester British Columbia", Canadian Geotechnical Journal 36: pp. 224-238, 1999.

[22] HUNGR O., BECKIE R.D. - "Assessment of the hazard from rock fall on a highway: discussion", Canadian Geotechnical Journal 35: p. 40, 1998.

[23] KEITH TURNER A., SCHUSTER ROBERT L., (1996) - "Landslides. Investigation and mitigation", Special Report 247, Transportation Research Board, Washington.

[24] KOVARI K. - "La sicurezza del sistema nel campo della costruzione di gallerie in aree urbane: l'esempio della galleria dello Zimmerberg", Gallerie e grandi opere sotterranee, n°68, dicembre 2002.

[25] MAZZOCCOLA D., SCIESA E. - La metodologia RHAP (Rockfall Hazard Assessment Procedure), Prevenzione dei fenomeni di instabilità delle pareti rocciose, Programme Interreg II C, 84–95, 2001.

[26] MAZZOCCOLA D. - La metodologia RES, Prevenzione dei fenomeni di instabilità delle pareti rocciose, Programme Interreg II C, 96–108,2001.

[27] MAZZACCOLA D.F. and J A HUDSON - "A Comprehensive Method of Rock Mass Characterisation for Indicating Natural Slope Instability" Quart. J. Eng. Geol. 29, 37-56, (1996).

[28] OBONI F. - "Analisi di rischio e presa di decisioni", Atti delle conferenze di geotecnica di Torino, XIX ciclo, 4-5-6 novembre 2003.

[29] OGGERI C., PEILA D. (2000) - Protections of transportation systems against rock falls. Proc. 8th Int.Symp. on Landslide, Cardiff. Thomas Telford, p. 1141-1146.

[30] PIERSON L. A., DAVIS, S. A. y VAN VICKLE R. (1990). - "The Rockfall Hazard Rating Systenp, Implementation Manual". Technical Report FHWA - OR - EG - 90 - 01. FHWA, U.S. Department of Transportation.

[31] PRINA E., BONNARD C., VULLIET L. - "Vulnerability and risck assessment of a mountain road crossing landslides", R.I.G. n.2, 2004.

[32] REGIONE PIEMONTE, (2001) - "Prevenzione dei fenomeni di instabilità delle pareti rocciose. Confronto dei metodi di studio dei crolli nell'arco alpino", Programma INTERREG II C-"Falaises".

[33] REGIONE PIEMONTE, Ordine Regionale dei Geologi del Piemonte, (2002) - "Legenda regionale per la redazione della carta geomorfologica e del dissesto dei P.R.G.C redatta in conformità alla circolare P.G.R. n.7/LAP/96 e successiva N.T.E./99", Torino.

[34] REGIONE PIEMONTE, CNR-IRPI Torino, CSI Piemonte (1990) - "Banca Dati Geologica", Torino.

[35] ROMANA M. (1993) - "A geomechanics classification for slopes: Slope Mass Rating". (In "Comprehensive Rock Engineering". Ed. J. Hudson). Pergamon. Vol 3. Pp 575-600.

[36] ROUILLET, J. D., JABOYEDOFF, M., MARRO C., PHILIPPOSSIAN F., and MAMIN M. - Matterock: une m´ethodologie d'auscultation des falaises et de d´etection des ´eboulements majeurs potentiels, Rapport PNR31,VDF,Z´urich,1998.

[37] TOSCO P., 2004 - "Applicazione di metodi di quantificazione del rischio per caduta massi alla SP della Sacra di S.Michele", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino.

[38] VARNES D.J. e IAEG Commission on Landslides - "Landslide hazard zonation. A review of principles and practice", UNESCO Press, Paris, 1984.