

La Commissione geotecnica dell'Ordine degli Ingegneri della provincia di Udine ha predisposto, utilizzando le indicazioni di un proprio gruppo di studio, la relazione che qui pubblichiamo con lo scopo di suggerire una possibile procedura operativa (Rockfall Defensive Barrier Design - RDBD) finalizzata alla progettazione degli interventi paramassi di tipo passivo.



## La progettazione delle opere paramassi

**Enrico Artini  
Alessandro Cocco**

La necessità di dover definire una procedura progettuale nel campo delle opere paramassi è oggi di estrema attualità. Sempre più numerose sono infatti le strutture che producono servizi d'ingegneria le quali, per molteplici ragioni, ritengono di introdurre il Sistema Qualità UNI EN ISO 9001 nella loro attività professionale, ed è di tutta evidenza che gli attuali standard progettuali nel campo della geologia applicata mal si coniugano con la razionalizzazione, l'organizzazione e l'ottimizzazione del processo progettuale connessa all'adozione di tale sistema.

Il crollo litoide rientra appieno in quella categoria di sistemi naturali governati da leggi di tipo deterministico, le quali, però, non consentono una previsione rigorosa delle grandezze in esame. Infatti esso è influen-

zato dalle perturbazioni locali dei suoi parametri fondamentali, perturbazioni che hanno carattere aleatorio e che fanno sì che, date le medesime condizioni iniziali, lo sviluppo del moto successivo di due massi distinti possa dare luogo a traiettorie completamente diverse tra loro. Il fenomeno ha caratteristiche tali da essere paragonabile ad un sistema dinamico caotico, dove la previsione delle grandezze in esame è possibile solamente da un punto di vista probabilistico.

Ciò posto, occorre comprendere che il fine ultimo della progettazione di opere paramassi non si esplica nel dimensionamento strutturale in senso stretto delle opere difensive, cosa tra l'altro piuttosto ardua e "presuntuosa" vista la presenza di sollecitazioni impulsive da *shock* difficilmente modellabili, bensì mira al raggiungimento di un ben definito livello di sicurezza dell'area o dell'infrastruttura da difendere. Se questo concetto è chiaro, allora ben si comprende che

una procedura progettuale deve fungere da *organizer* di varie discipline, chiamate in causa in momenti diversi tra loro propedeutici e complementari (competenze pianificatorio-urbanistiche, geologiche, topografiche, ingegneristiche), e deve essere fondata su un approccio probabilistico sia durante la simulazione del crollo sia durante la progettazione delle opere di difesa.

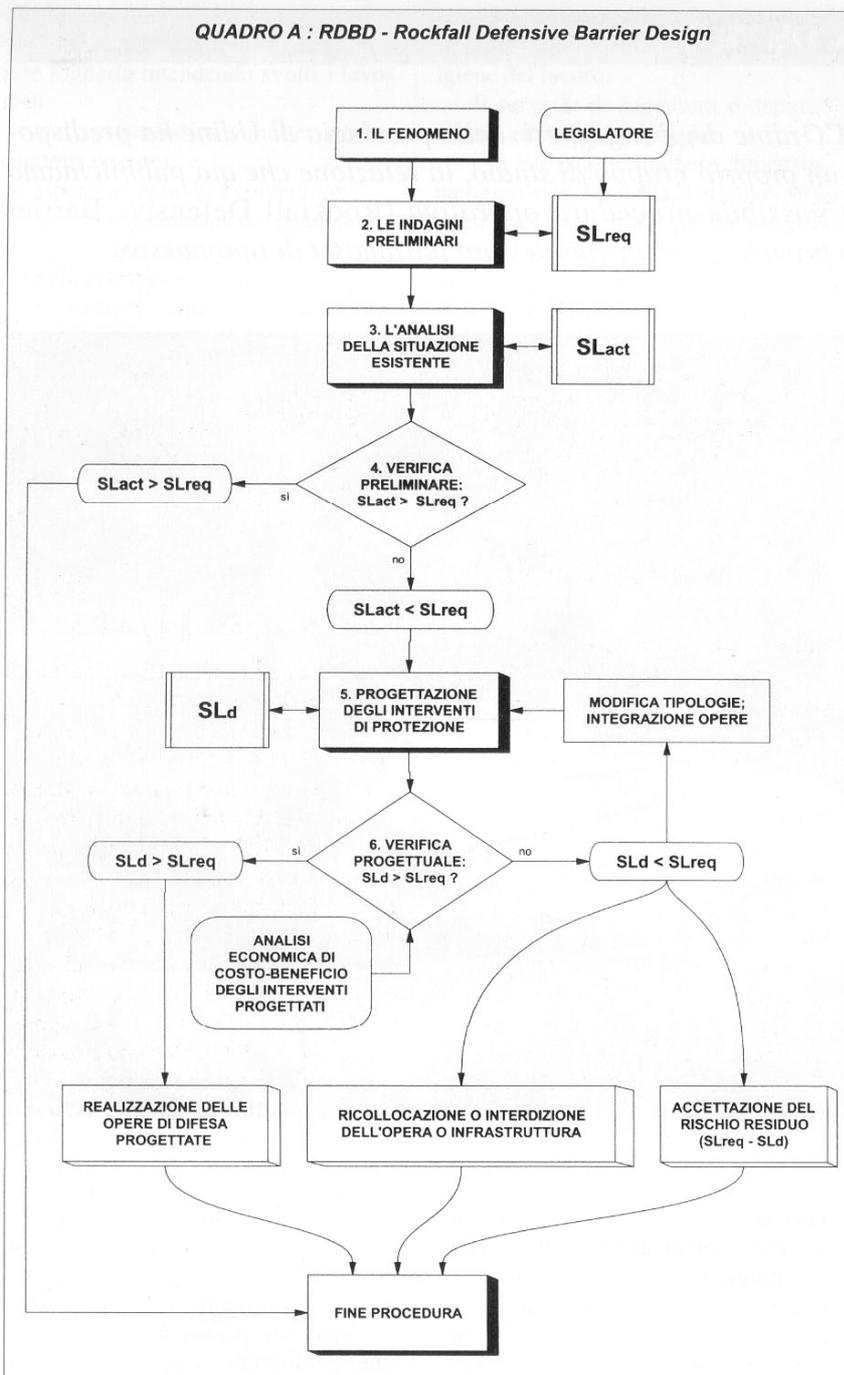
### La procedura "RDBD"

Le varie fasi che concorrono alla definizione dell'iter progettuale RDBD, così come proposto dagli Autori, sono sinteticamente illustrate

dott. ing. Enrico Artini - dottore in Ingegneria civile per la difesa del suolo e la pianificazione territoriale - Spilimbergo (PN)

dott. ing. Alessandro Cocco - CP Ingegneria - Gemona del Friuli, membro della Commissione Geotecnica dell'Ordine degli Ingegneri della provincia di Udine

**QUADRO A : RDBD - Rockfall Defensive Barrier Design**



Nella pagina a fianco, catastrofiche conseguenze di impatti multipli su di un filare di rete e sulla relativa struttura di sostegno. Gli effetti dovuti agli impatti risultano di molto amplificati dall'intrinseca rigidità del sistema. **Sopra il titolo**, interazione tra volume roccioso di alcuni mc e barriera paramassi a bassa deformabilità.

nel quadro A. È evidente l'assenza di un percorso unico, la presenza di varie uscite dal diagramma di flusso, e, soprattutto, la presenza di due punti obbligati di verifica.

L'elemento innovativo contenuto nella procedura RDBD consiste nell'assunzione di un parametro strettamente probabilistico, il livello di sicurezza, quale riferimento condizionante l'intero iter progettuale, in contrapposizione alle grandezze di tipo deterministico fino ad oggi utilizzate. I punti fondamentali della procedura sono illustrati nei prossimi paragrafi.

Al fine di definire il campo di applicazione delle opere di protezione passiva è utile fare riferimento alla nota classificazione di Varnes (1978), sinteticamente riassunta nel "quadro B" in relazione ai movimenti in roccia. In particolare si può affermare che tali opere possiedono un certo grado di efficacia esclusivamente riguardo ai fenomeni tipo B1, cioè relativamente ai cosiddetti crolli di roccia, o *rockfall*. È utile ricordare che il termine precedente indica quei normali processi evolutivi di versante in cui grossi massi isolati, o zolle di formazioni poco coerenti o alterate, a seguito di precarie condizioni di stabilità precipitano verso valle, scompaginandosi in frammenti di varia pezzatura.

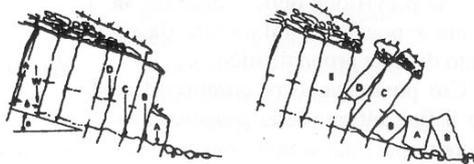
*Il livello di sicurezza richiesto*

**QUADRO B : IL FENOMENO**

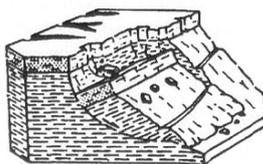
CLASSIFICAZIONE DI VARNES ABBREVIATA (1978) - esempi riferiti a frane in roccia



B1 Crollo di roccia (*Rock fall*)



B2 Ribaltamento di roccia (*Rock topple*)



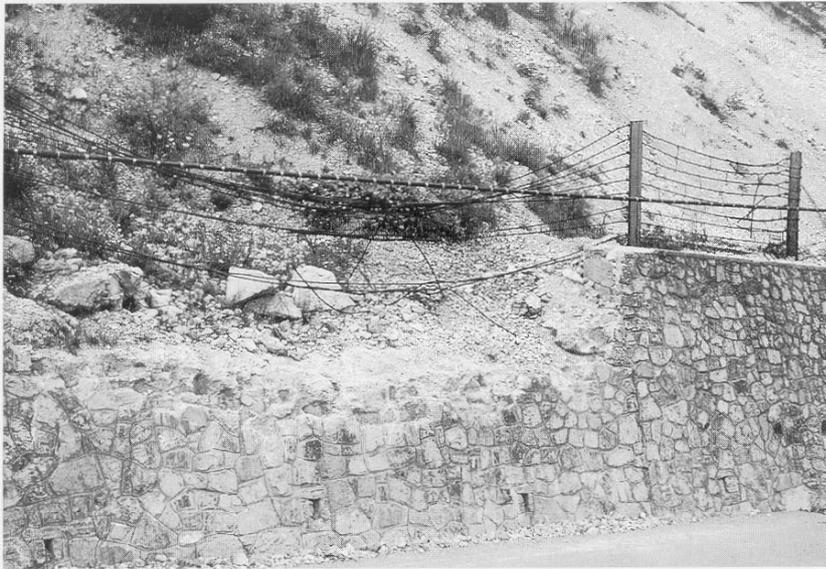
B3 Scivolamento rotazionale di roccia (*Rock slump*)



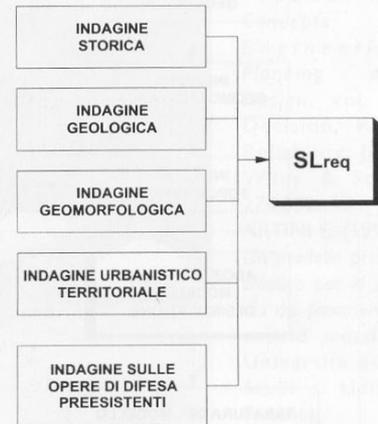
B4 Scivolamento traslazionale di roccia (*Rock slide*)

Nel quadro C si osserva come le indagini preliminari debbano portare all'individuazione del valore  $SL_{req}$  (*Required Safety Level*): è questa la probabilità che si ritiene accettabile a priori per la salvaguardia delle opere da proteggere dai fenomeni di caduta massi, e chiaramente dipende in larga misura dalla tipologia e dall'importanza di tali opere. La probabilità ritenuta accettabile che una scuola possa essere soggetta a impatto di massi viene generalmente ritenuta minore di quella accettabile qualora il medesimo fenomeno interessi, ad esempio, una pista forestale, ed è legata a considerazioni di vario tipo (economiche, sociali, pianificatorie, etc.).

Si noti come tale probabilità rica-



QUADRO C : LE INDAGINI PRELIMINARI



de nelle definizioni di tipo soggettivo (Vicario e Levi, 1997), non certo nelle definizioni a priori o a posteriori; essa coinvolge un ipotetico scommittitore virtuale che fa una puntata sul verificarsi dell'evento fondamentale: "l'opera da proteggere viene o no interessata dal fenomeno di caduta massi?"

Ecco perché, come risulta dal quadro A, è necessario un intervento del Legislatore a fissare i termini di imparzialità in questa scommessa virtuale, dove si va di fatto a fissare una sorta di "probabilità di guasto" ritenuta accettabile per il tipo specifico di opera da proteggere. In questo settore però non esiste, allo stato attuale, alcun riferimento normativo, e dunque la valutazione del grado di rischio accettabile è demandata al buon senso del progettista, del pianificatore, del decisore politico e ad alcuni metodi di valutazione del rischio (Varnes D.J., 1984; Einstein H.H., 1988; Hudson J.A., 1992). Gli Autori auspicano che quanto prima venga colmata questa grave lacuna, la quale, obbiettivamente, rappresenta un punto critico all'interno della procedura RDBD.

È importante osservare che  $SL_{req}$  deve essere indiscutibilmente fissato a priori: sarà proprio il confronto con tale valore a determinare in verifica preliminare (Punto 4 del quadro A) il ricorso o meno alla progettazione di opere di difesa passiva, ed in verifica progettuale (Punto 6 del quadro A) l'efficacia degli interventi progettati.

### L'analisi della situazione esistente

Il punto 3 del quadro A deve por-

tare alla determinazione del valore  $SL_{act}$  (Actual Safety Level) indispensabile per la verifica preliminare. Esso si ricava partendo da indagini particolareggiate e mirate (geologiche, geomorfologiche e topografiche), assumendo poi un modello di simulazione, tarandolo sul pendio in esame ed eseguendo le necessarie simulazioni, come si evince dal quadro D. Si dovrà valutare anche se le eventuali opere di difesa preesistenti, rilevate nel punto 2 del quadro A (indagini preliminari) sono da ritenersi valide e collaboranti, ed in tal caso stimarne l'efficacia oppure prevederne la rimozione.

### I parametri geotecnici

Le indagini geologiche e geomorfologiche hanno il compito preminente di individuare le tipologie di terreno presenti sul versante, i parametri elastici relativi e la classe volumetrica dei blocchi potenzialmente mobilizzabili.

A riguardo è auspicabile che nasca un inquadramento delle indagini geologiche e dei documenti ad esse conseguenti, al fine di giungere ad una standardizzazione formale e funzionale delle informazioni fornite all'ingegnere geotecnico.

Tali informazioni riguardano la definizione delle discontinuità primarie e secondarie, finalizzate alla quantificazione del crollo di progetto, la definizione del volume roccioso unitario residuo (V.R.U.R.) e della distribuzione dei coefficienti di restituzione elastica ( $e$ ) del pendio, nonché la definizione del blocco di progetto possibilmente in forma di distribuzione di probabilità.

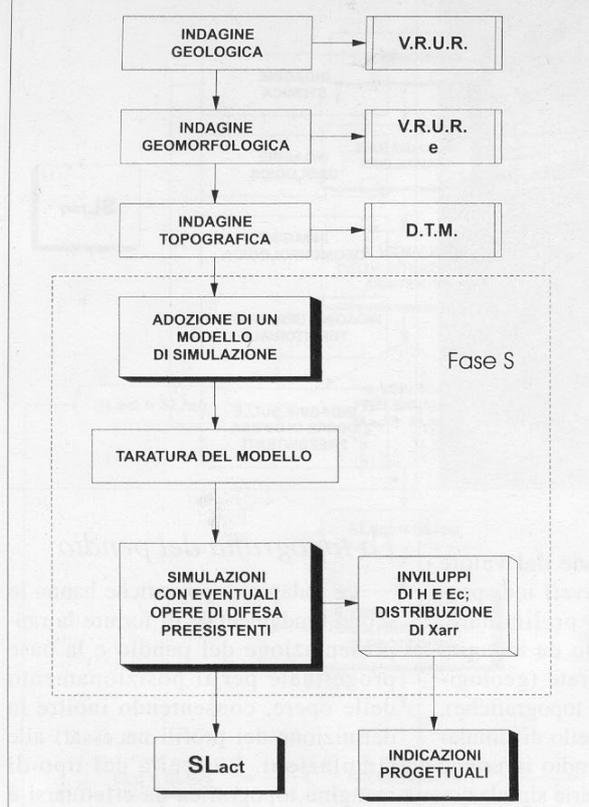
### La topografia del pendio

Le indagini topografiche hanno lo scopo fondamentale di fornire la rappresentazione del pendio e la base progettuale per il posizionamento delle opere, consentendo inoltre la definizione dei profili necessari alle simulazioni. La scelta del tipo di indagine topografica da effettuarsi è influenzata dalla modellazione del fenomeno che si andrà ad adottare, in quanto, come recentemente schematizzato da Artini (1997), esistono modelli che si basano su una rappresentazione in 2D del terreno e modelli che invece adottano una rappresentazione 3D dello stesso. Gli scriventi ritengono che la scelta ad oggi più soddisfacente in un'ottica progettuale sia quella di un modello 2D appoggiato su di un *DTM* (Digital Terrain Model) affidabile. Dalle indagini di dettaglio adottate in questa fase si consiglia di estrarre anche l'informazione riguardante l'angolo di attrito equivalente  $\theta_{eq}$  (Onofri e Candian, 1979), inserendo inoltre la correzione di forma relativa al profilo. In questo modo si ottiene un'indicazione fondamentale, anche se di massima, relativa al comportamento del pendio in esame rispetto alle massime propagazioni potenziali.

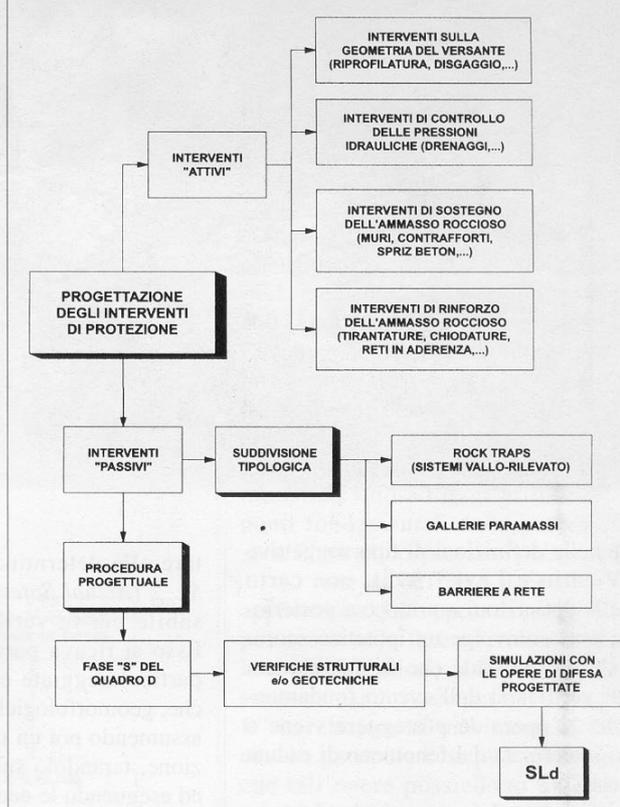
### Il modello di calcolo

Il passaggio fondamentale per poter ottenere  $SL_{act}$  consiste nel realizzare le simulazioni del fenomeno di caduta massi per mezzo di un modello teorico implementato su un programma per PC. La scelta del tipo di modello può influire pesantemente sulla bontà e sull'interpretazione dei risultati delle simulazioni, e quindi

QUADRO D : L'ANALISI DELLA SITUAZIONE ESISTENTE



QUADRO E : PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI DI PROTEZIONE



sui parametri che stanno alla base delle scelte progettuali. Infatti un modello privo di un motore di generazione pseudo-casuale corretto non fornirà una vera interpretazione stocastica del fenomeno, limitandosi ad una elaborazione statistica dei risultati non sempre interpretabile in termini probabilistici. Come conseguenza di tutto ciò si ritiene indispensabile che alla relazione tecnica venga allegata una descrizione del modello teorico e del software di simulazione adottato, il numero di traiettorie generate da quest'ultimo per ogni simulazione, i parametri geomeccanici assunti e ritenuti fondamentali e le modalità di generazione pseudo-casuale degli stessi con le rispettive leggi di probabilità assunte.

### La taratura del modello

Le simulazioni richieste devono prevedere una prima fase di taratura del modello nella quale si individuano i parametri geomeccanici caratteristici che riproducono il comportamento reale del pendio. La taratura sarà fatta sulla base dei dati storici rilevati, delle eventuali *back-analysis* a disposizione e del valore dell'angolo di attrito equivalente  $\theta_{eq}$  determinato in precedenza. In questa analisi non è

possibile basarsi solamente sulle distribuzioni degli spazi di arresto dei massi, ma deve essere studiato l'andamento probabilistico delle altezze di volo: è noto che l'assunzione di un modello errato (ad esempio un modello che presuppone dei moti di prevalente rotolamento) può portare a pericolose sottostime di queste ultime, con conseguenze pericolose sulla progettazione delle opere paramassi e sulla stima della loro affidabilità (Artini, 1997). Diventa poi essenziale che il programma determini l'involuppo delle altezze di volo e delle energie cinetiche, calcolato su un campione probabilistico di un numero sufficientemente elevato di traiettorie simulate (1.000÷10.000). Tale involucro è la base essenziale per il corretto posizionamento delle opere di difesa passive sul pendio, basato sulla minimizzazione contemporanea delle altezze e delle energie, così da adottare strutture dimensionate in modo efficace ed economico.

All'uscita di questa fase di analisi della situazione esistente (Fase S del quadro D) si ottengono indicazioni sul comportamento del pendio e sull'entità dei fenomeni di caduta massi in esso prevedibili, indicazioni di massima relative al posizionamento ed al dimensionamento delle opere di difesa passive, nonché il valore  $SL_{acr}$

### La progettazione degli interventi di sistemazione

Come sinteticamente illustrato nel quadro E, gli interventi di protezione da frane in roccia possono suddividersi in due grandi famiglie: gli interventi attivi, volti ad impedire il distacco di masse rocciose instabili ed il conseguente moto lungo i versanti (fenomeni tipo B2, B3, B4 del quadro B), e gli interventi passivi, i quali hanno lo scopo di intercettare, frenare ed arrestare i volumi che, abbandonata la propria sede originaria, hanno iniziato un percorso di discesa lungo il pendio di frana (*rockfall*, B1 del quadro B). Di seguito si farà riferimento esclusivamente alla seconda categoria di interventi.

Dal punto di vista tipologico è possibile suddividere gli interventi passivi in 3 gruppi distinti. Il primo è quello dei sistemi vallo-rilevato, ubicati per lo più nelle aree suborizzontali di fondovalle. Per essi alcune indicazioni progettuali e costruttive sono indicate da Paronuzzi (1989). Il secondo gruppo è quello delle gallerie paramassi artificiali, normalmente utilizzate per la protezione di arterie viarie di notevole importanza. Il principale problema riscontrabile nel dimensionamento di tali strutture consiste nella valutazione delle sollecita-

zioni dinamiche impulsive indotte sull'impalcato superiore, le quali, come indicato da Labiouse (1994), possono venire smorzate realizzando uno strato di terreno ammortizzante sulla soletta sommitale. Il terzo gruppo è costituito dalle barriere a rete, per le quali è già stato proposto da Coccolo e Paronuzzi (1995) un dettagliato quadro informativo in un precedente



I frequenti crolli litoidi che interessano la viabilità montana sono spesso causa di danni a persone e manufatti, e comportano sempre ingenti costi e disagi per la collettività.

numero della *Rassegna Tecnica*. Relativamente a tali sistemi di difesa si consiglia di fare riferimento a prodotti certificati, cioè barriere per le quali la capacità di assorbimento sia determinata per mezzo di prove distruttive in vera grandezza (Cfr. Peila, Pelizza e Sassudelli, 1995) e comprovata da documentazione rilasciata da idoneo Ente. Inoltre, in assenza di legislazione nazionale vigente, si suggerisce l'utilizzo della normativa francese NF P95-308, che, a tutt'oggi, risulta l'unico riferimento legislativo europeo esistente in materia.

A prescindere dalla tipologia delle opere e dalle relative e necessarie verifiche strutturali e/o geotecniche, il percorso progettuale è di tipo iterativo, e richiede il riutilizzo del modello di calcolo precedentemente tarato (Fase S del quadro D) al fine di generare una nuova serie di simulazioni in presenza degli interventi difensivi previsti. Tali simulazioni sono finalizzate a fornire i parametri caratteristici (massimo, minimo, percentili 0.90-0.95-0.99) delle distribuzioni di probabilità relative all'energia posseduta dai blocchi ( $E_c$ ), all'altezza di volo ( $H$ ), e agli spazi d'arresto ( $X_{arr}$ ) necessari al raggiungimento della soluzione progettuale finale. Successivamente la valutazione dell'affidabilità della soluzione prescelta può venire condotta secondo le usuali tecniche probabilistiche, per esempio con il metodo *FOSM* (First Order Second Moment) o con il metodo *FTD* (Fault Tree Diagram) (Cfr. Ang e Tang, 1994; Paronuzzi e Coccolo,

1995), e richiede che il programma di simulazione utilizzato fornisca la probabilità di efficacia del sistema difensivo nei confronti dei valori di energia dissipabile e di altezza utile adottata. Il livello di sicurezza globale può venire complessivamente espresso dalla grandezza  $SL_d$  (Design Safety Level) indicante la probabilità di intercettazione dei massi da parte del sistema di difesa in progetto. In conclusione, qualora la verifica progettuale (Punto 6 del quadro A) non risulti in alcun modo soddisfatta per il valore di  $SL_{req}$  adottato, o si ritiene di accettare una condizione di rischio residuo ( $\Delta SL = SL_{req} - SL_d$ ), o si procede alla ricollocazione/interdizione dell'opera o infrastruttura da proteggere.

## Conclusioni

La procedura *RDBD* organizza e coinvolge discipline e strumenti tra loro diversificati, al fine di progettare interventi di protezione passiva da fenomeni complessi come i crolli litoidi.

Pur se caratterizzata in questa fase da punti che richiedono ulteriori approfondimenti e supporti, essa può considerarsi un valido punto di partenza e una base per formare un approccio nuovo ed organico ai problemi di caduta massi.

Tale approccio, conformemente al fenomeno reale, non può che essere di natura probabilistica.

E. A. - A. C.

## Bibliografia

- ANG A., TANG W. (1984): *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. vol. 2: Decision, Risk, Reliability, John Wiley & Sons, 274-332.
- ARTINI E. (1997): *Un modello probabilistico per lo studio dei fenomeni di caduta massi*. - Università degli Studi di Udine, Facoltà di Ingegneria, tesi di laurea, A.A. 1996/97, Udine, vol I, 209 pp.
- COCCOLO A., PARONUZZI P. (1995): *L'impiego delle barriere paramassi* - Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia, anno XLVI, luglio-agosto 1995, n. 4, 20-25.
- EINSTEIN H.H. (1988): *Landslide risk assessment procedure* - Proc. 5° Int. Symp. On Landslides, Lausanne, vol. 2, 1075-1090.
- HUDSON J.A. (1992): *Rock Engineering System: theory and practice* - High Plains Press (JAH).
- LABIOUSE V., DESCOEUDRES F., MONTANI S., SCHMIDHALTER C.A. (1994): *Étude expérimentale de la chute de blocs rocheux sur une dalle en béton armé recouverte par des matériaux amortissants*. Revue Française de Géotechnique, n. 69, 42-62.
- NF P95-308 (1994): *T1-Equipements de protection contre les éboulements rocheux*. T2-Ecrans de filets. E-Rock Falling protection equipments/Net trap.
- ONOFRI R., CANDIAN C. (1979): *Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976*. Considerazioni sulle opere di difesa - Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Cluet, Trieste, I-42.
- PARONUZZI P. (1989): *Criteri di progettazione dei rilevati paramassi*. Geologia Tecnica I/89, 23-41.
- PARONUZZI P., COCCOLO A. (1995): *Crollo di progetto ed affidabilità delle barriere paramassi*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria - GEAM 86, giugno-settembre 1995, n.2-3, 147-154.
- PEILA D., PELIZZA S., SASSUDELLI F. (1995): *Prove in scala reale su barriere paramassi deformabili a rete*. GEAM, XXXII, n. 2-3, giugno-settembre 1995, 155-163.
- VARNES D. J. (1978): *Slope Movement Types and Processes*. Landslides Analysis and Control, Transportation Research Board, Special Report 176, Schuster e Krizek editors, 11-33.
- VARNES D.J. (1984): *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. - Natural Hazards 3, Ed. Unesco, Paris, 63 pp.
- VICARIO G., LEVI R. (1997): *Calcolo delle probabilità e statistica per Ingegneri* - Ed. Esculapio, 371 pp.