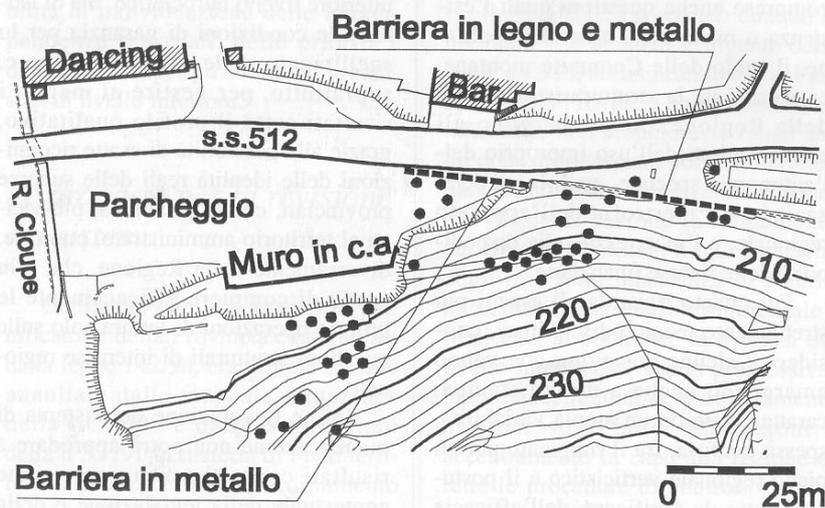


## ALLA VERIFICA DEI NUOVI METODI DI PROGETTAZIONE DELLE BARRIERE DI DIFESA PASSIVA

Enrico Artini - Alessandro Coccolo

La prima applicazione ad un caso reale della procedura progettuale RDBD (Rockfall Defensive Barrier Design), strumento tecnico operativo già diffusamente descritto in un precedente numero della rivista.



Sopra il titolo: la cartografia con evidenziata la zona dell'intervento; Sotto: la planimetria con l'ubicazione delle infrastrutture da proteggere, le opere di difesa esistenti e i volumi litoidi censiti.

La zona oggetto del presente studio è collocata in corrispondenza delle pendici nordoccidentali del monte Naruint (Bordano, UD), nei pressi della sponda meridionale del lago di Cavazzo. In particolare è stata esaminata la condizione di rischio da caduta massi a cui sono soggetti gli insediamenti antropici e le infrastrutture posti a cavallo della strada statale n. 512. Ragioni di sintesi giornalistica impediscono di scendere nei dettagli dell'analisi, per cui nel seguito della trattazione si presenteranno sinteticamente i vari punti sviluppati durante l'applicazione della procedura, evidenziando nel contempo i risultati ritenuti più significativi.

### La procedura RDBD

Le varie fasi che concorrono alla definizione dell'iter progettuale RDBD (Rockfall Defensive Barrier Design) [Artini e Coccolo, 1998] sono sinteticamente illustrate nel quadro A già proposto in un precedente numero della Rivista. Si ricorda che, secondo quanto previsto in tale procedura, l'iter progettuale si sviluppa attraverso l'assunzione di parametri strettamente probabilistici, i livelli di sicurezza (*Safety Level*), in contrapposizione alle grandezze di tipo deterministico fino ad oggi prevalentemente utilizzate in questo settore dell'ingegneria geotecnica.

Il primo parametro da individuare, attraverso una analisi critica delle indagini preliminari, è  $SL_{req}$  (Required Safety Level), cioè la probabilità che si ritiene accettabile a priori per la salvaguardia delle opere da proteggere dai fenomeni di caduta massi. Essa dipende in larga misura dalla tipologia e dall'importanza di tali opere, è legata a considerazioni di natura economica, sociale e pianificatoria, ed è stimabile attraverso alcuni metodi di valutazione del rischio [Hudson, 1992]. Risulta evidente che l'assunzione di  $SL_{req}$  dovrebbe essere integrata negli usuali strumenti di pianificazione di competenza agli Enti gestori del territorio, in relazione alle zone ritenute a rischio.

Il secondo parametro che deve venire quantificato è  $SL_{act}$  (Actual

dott. ing. Enrico Artini, libero professionista in Spilimbergo (PN)  
dott. ing. Alessandro Coccolo, libero professionista in Gemona del Friuli (UD) - CP Ingegneria

Safety Level), cioè il livello di sicurezza della situazione esistente. Esso si ricava a partire da indagini particolareggiate e mirate (geologiche, geomorfologiche, topografiche), seguite dall'applicazione di un modello di simulazione probabilistica tarato sul pendio in esame. Va tenuta ovviamente in considerazione la capacità resistiva delle eventuali opere paramassi preesistenti, qualora ritenute valide e collaboranti.

A questo punto è necessario controllare i valori assunti dai parametri introdotti ("verifica preliminare", cfr. Quadro A). Qualora si riscontri una condizione  $SL_{act} > SL_{req}$  la procedura può dirsi terminata, nel senso che non è necessario prevedere alcun intervento protettivo. Se invece  $SL_{act} < SL_{req}$  è necessario procedere alla progettazione degli interventi di difesa, i quali hanno come obiettivo il raggiungimento di un livello di sicurezza di progetto SLd indicante la probabilità di intercettazione dei massi da parte del pendio e del sistema di difesa in progetto.

La validità di ogni passo progettuale sviluppato viene sondata attraverso la "verifica progettuale"  $SL_d > SL_{req}$ . Qualora tale relazione non risulti in alcun modo verificata, e quindi il livello di sicurezza di progetto risulti minore del livello di sicurezza richiesto, o si ritiene di accettare una condizione di rischio residuo ( $DSL = SL_{req} - SL_d$ ), o si procede alla ricollocazione/interdizione delle infrastrutture da proteggere.

Di seguito verrà illustrato per punti principali l'iter applicativo di tale procedura generale sul caso applicativo scelto.

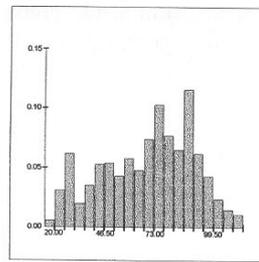
## Le indagini preliminari

Storicamente non si hanno notizie di fenomeni franosi documentati antecedenti agli eventi sismici che hanno interessato l'area nel 1976. In seguito ad essi, rilievi sistematici hanno censito e localizzato i blocchi mobilizzati dalle frane di crollo verificatesi nella zona [Sgobino, 1982].

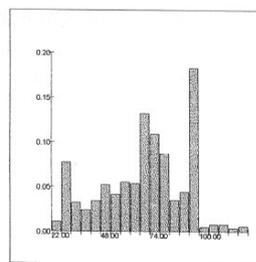
Dal punto di vista urbanistico-territoriale, si è osservato che le direttrici di scendimento dei blocchi in frana possono interessare:

1) un tratto della strada statale S.S. 512, a traffico sostanzialmente locale, per una lunghezza pari a circa 150 m;

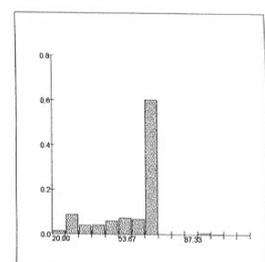
2) una attività ricreativa (discoteca) che è soggetta a presenza antropica molto numerosa (500÷1000 perso-



(a)  
senza opere  
 $SL_{act} = 0.876$



(b)  
solo rilevato  
 $SL_{act} = 0.969$



(c)  
rilevato e barriera  
 $SL_{act} = 0.997$

Qui sopra: il confronto degli istogrammi di arresto dei massi, ricavati attraverso le simulazioni numeriche al computer. Si nota il variare del livello di sicurezza, che cresce con l'inserimento delle opportune opere di difesa fino a raggiungere e superare il livello di sicurezza richiesto; Sotto: la tabella riassuntiva dei valori dedotti durante taratura del modello ed usati poi in tutte le simulazioni successive, relativamente alla sez. I. Si nota che la variabilità stocastica del coefficiente di restituzione E, degli angoli di attrito  $\delta$  e dei volumi V viene riprodotta tramite funzioni probabilistiche, in particolare anche funzioni beta-distribui-

ne) per alcune ore di alcuni giorni della settimana;

3) una attività commerciale (bar) in genere non molto frequentata. La presenza antropica si accresce notevolmente in concomitanza all'apertura dell'adiacente discoteca;

4) un parcheggio al servizio delle attività appena citate, avente superficie pari a circa 2000 m<sup>2</sup>. Tale zona risulta essere frequentata solamente nei fine settimana (attività turistico-ricreativa legata alla presenza del lago).

In base alle argomentazioni appena delineate, stanti la sismicità della zona (S=12), possibile causa scatenante di rockfalls, e lo stato delle presenze umane, temporanee ma con fasce orarie ad elevatissima pressione antropica, si è ritenuto sufficientemente cautelativo assumere come livello di sicurezza richiesto:

$$SL_{req} = 0.98$$

L'analisi della situazione esistente

Il pendio di discesa presenta una larghezza di circa 150 m alla base (strada statale S.S. 512) e di circa 80 m al piede della scarpata rocciosa. È dotato di inclinazione nell'intervallo 35°-40°, e si sviluppa tra le isoipse 200 e 270 m. Alle quote superiori il

versante diviene subverticale, a causa di una parete rocciosa calcareo-dolomitica di età norica, orientata in direzione NE-SO, il cui coronamento superiore raggiunge le isoipse 325÷330 m. La parte terminale e mediana del pendio, tra le isoipse 200÷235 m, è costituita da detrito di falda, prevalentemente ghiaia con sabbia, mentre nella parte superiore, fino all'attacco della parete, sono maggiormente presenti affioramenti rocciosi caotici, residui di antichi crolli di età post-glaciale, che alterano sensibilmente la regolarità del versante. Tutto il pendio presenta un ricoprimento di terreno di 10÷50 cm. La vegetazione è sostanzialmente erbacea nella zona apicale, al piede della parete rocciosa, arbustiva in quella mediana e arborea nella parte terminale.

I sopralluoghi effettuati sul pendio detritico hanno consentito di censire tutti i volumi rocciosi presenti lungo le direttrici di scendimento allineate con la zona a rischio. Si sono riscontrati esclusivamente blocchi di calcare e dolomia, con volumetrie ricorrenti comprese nell'intervallo 0.1÷0.5 m<sup>3</sup>. Numerose le schegge litoidi riscontrate, con volume 0.03÷0.06 m<sup>3</sup>. Le condizioni geostatiche della scarpata sono risultate particolarmente criti-

**PENDIO: CAVAZZO - s.s. 512**

rif: C

**SEZIONE: Profilo di scendimento n° 1**

rif: S1

Distrib. E roccia:		Distrib. E detrito:		$\delta r$ roccia:		$\delta r$ detrito:	
tipo:	$\beta(3.8;2.5)$	tipo:	$\beta(3.8;2.5)$	tipo:	uniforme	Tipo:	uniforme
$E_{medio}$	0.601	$E_{medio}$	0.601	$\delta r_{medio}$	22.0°	$\delta r_{medio}$	31.0°
$E_{min}$	0.00	$E_{min}$	0.00	$\delta r_{min}$	20.0°	$\delta r_{min}$	30.0°
$E_{max}$	1.00	$E_{max}$	1.00	$\delta r_{max}$	24.0°	$\delta r_{max}$	32.0°
Distrib. Dei volumi:		Angoli limite:		Impatti principali:		Condizioni iniziali:	
tipo:	$\beta(1;5)$	$\theta_{min}$	4.5°	$V_{imp}$	25.0 m/s	Moto:	scivola
$V_{medio}$	0.50 m <sup>3</sup>	$\theta_{max}$	22.5°	$E_{Pmin}$	0.20	$X_0$	0.0 m
$V_{min}$	0.20 m <sup>3</sup>	$\lambda_r$	5.0°	$E_{Pmax}$	0.60	$\delta_s$	30.0°
$V_{max}$	2.00 m <sup>3</sup>			$\gamma$	26.5 kN/m <sup>3</sup>	$V_0$	0.1 m/s

che, in quanto evidenti fratture di trazione presenti sul coronamento fanno ritenere che due blocchi compatti di circa  $500 \div 700 \text{ m}^3$  siano in condizioni prossime all'equilibrio limite. Tale scenario non è stato tuttavia considerato nel presente studio, in quanto non risulta in alcun modo sanabile da interventi di protezione passiva e richiede invece l'utilizzo di tiranti attivi di ancoraggio in parete. Sulla scorta di quanto riportato, tenendo inoltre in considerazione il generale stato di suddivisione ed alterazione superficiale dell'ammasso roccioso e l'entità delle cadute libere prevedibili, si è ritenuto opportuno adottare nei calcoli un volume roccioso unitario residuo di progetto pari a:

$$VRUR = 0.5 \text{ m}^3$$

La modellazione topografica del pendio detritico ha previsto la realizzazione di un rilievo di 780 punti di dettaglio, effettuato con stazione totale Geotronics 640M, e successivamente la definizione di un DTM (Digital Terrain Model) dell'intera area rilevata. Nella parete rocciosa sono state invece effettuate 5 calate di rocciatori muniti di prismi riflettenti, attraverso le quali è stato possibile caratterizzare geometricamente la scarpata. Grazie all'acquisizione di tali dati si sono costruiti 5 profili trasversali completi, estesi dal coronamento della scarpata alle infrastrutture a rischio, sui quali si sono effettuate le simulazioni probabilistiche di discesa.

Per quanto riguarda infine le opere di difesa preesistenti all'intervento in progetto, si è riscontrata la presenza di barriere monofilare a bassa deformabilità in acciaio (montanti IPE200 e traversi C100/5) e in acciaio/legno (montanti IPE200 e tondoni trasversali  $\varnothing 20 \text{ cm}$ ), per complessivi 50 m di intervento. Non risultano invece realizzate opere attive di stabilizzazione della parete sovrastante il pendio. Le tipologie delle opere, il loro grado di vetustà e il generale livello manutentivo sono tali per cui, cautelativamente, si è ritenuto di non considerare alcun contributo resistivo delle stesse ai fini della determinazione di  $SL_{act}$ .

Come consigliato in RDBD, dalle indagini di dettaglio adottate in questa fase si è estratta anche l'informazione riguardante l'angolo di attrito equivalente  $\Phi_e$  [Onofri e Candian, 1979]: per ogni sezione di analisi sono stati calcolati i valori di tale angolo di attrito equivalente, anche applicando la correzione di forma attraverso la

regressione lineare, assumendo come punto di massimo espansione il ciglio della strada. Nel caso esemplificativo della sezione 1 si sono ottenuti valori di  $\Phi_e$  rispettivamente di  $51.45^\circ$  e di  $39.16^\circ$ , che risultano essere maggiori del limite  $27.15^\circ$  proposto dallo studio di Onofri e Candian. Da queste considerazioni risulta evidente la tendenza dei blocchi di frana a interessare le aree antropizzate da proteggere, quindi è ragionevole attendersi la necessità di progettazione di opere di difesa.

Al fine di arrivare alla valutazione del livello di sicurezza attuale ( $SL_{act}$ ) attraverso delle simulazioni numeriche, si rende necessario scegliere un modello di simulazione, quindi adottare un software specifico che lo implementi e poi effettuare la taratura sul caso in esame.

In riguardo al modello da assumere, è evidente che esso deve essere obbligatoriamente probabilistico per poter essere integrato nella procedura RDBD. Esso dovrà rappresentare la naturale casualità del sistema, mediante appropriati metodi di generazione pseudo-casuale delle grandezze chiave della propagazione dei massi sul versante, e dovrà essere in grado di fornire la quantificazione delle grandezze di progetto in termini probabilistici. A tal fine è assolutamente necessario che il modello consenta nella sua implementazione un elevato numero di simulazioni affinché sia possibile affermare l'identità tra frequenza e probabilità. Nel caso applicativo in esame si è scelto un modello bidimensionale basato sul punto materiale, con una raffinata implementazione della stocasticità del fenomeno nei parametri chiave dello stesso ottenuta attraverso l'uso di varie funzioni di distribuzione di probabilità, tra le quali anche la funzione Beta [Artini, 1997].

Il software che implementa tale modello, realizzato da uno degli autori, possiede un motore di calcolo evoluto con funzioni di generazione pseudo-casuale che, in accoppiata con una oculata scelta dei parametri geometrici, è in grado di simulare i fenomeni di scendimento massi sui pendii con le morfologie più disparate. Tale software, ormai testato su numerosi casi di studio di livello internazionale, consente di riprodurre in tempi estremamente ridotti campioni di scendimento contenenti fino a 10.000 cadute ciascuno.

La taratura viene eseguita facendo riferimento ad informazioni acquisite sul pendio, come gli spazi di arresto

dei massi già caduti o le tracce di impatto degli stessi sul terreno e sugli alberi, e, successivamente, eseguendo una serie di simulazioni probabilistiche. Variando opportunamente i parametri significativi del moto dei massi e del pendio, nonché le possibili funzioni di probabilità, si ricerca la convergenza tra valori simulati e misurati delle grandezze cinematiche ed energetiche caratteristiche del fenomeno.

La taratura porta quindi a determinare i parametri geometrici e geomeccanici da adottare in tutte le simulazioni seguenti (analisi dello stato di fatto, verifica delle opere progettate). Se tali dati non fossero disponibili, si possono assumere valori già presenti in letteratura, ricavati su pendii simili o con notevoli analogie a quello in esame.

Le simulazioni effettuate in questa fase sulle varie sezioni del caso di studio hanno consentito di ottenere la probabilità di raggiungimento delle zone a rischio ( $SL_{act}$ ), assumendo come riferimento l'ascissa X del bordo strada. Come esempio di seguito viene riportata la "verifica preliminare" relativa alla sezione 1 (cfr. istogramma (a) del Quadro B) con  $X=101.5 \text{ m}$ , dalla quale emerge la necessità di procedere alla progettazione degli interventi protettivi.

#### VERIFICA PRELIMINARE

$$P\{X > 101.5 \text{ m}\} = 0.124$$

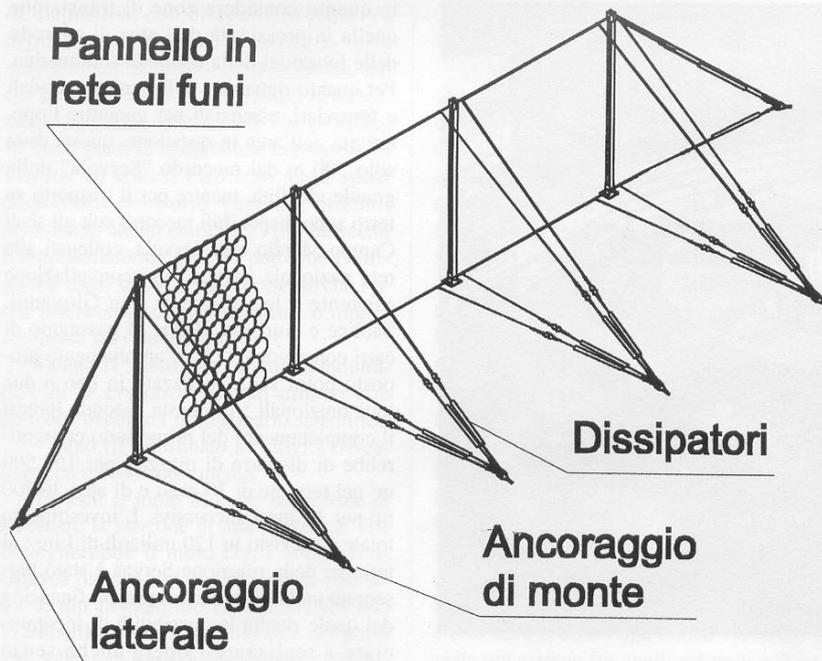


$$SL_{act} = 0.876 (< SL_{req} = 0.98)$$

### La progettazione degli interventi di protezione

Poiché le esigenze di riordino e riqualificazione ambientale del parcheggio antistante il bar ed il dancing consigliavano la realizzazione di un muro con paramento frontale in pietrame al limite dell'area suddetta, si è ritenuto opportuno realizzare tale struttura anche con funzione di difesa paramassi. Si è pertanto previsto a tergo dell'opera un rilevato in gabbioni, con finalità di intercettazione dei blocchi e dissipazione dell'energia d'impatto, separato dal paramento posteriore del muro attraverso uno strato di terra ammortizzante.

La "verifica di progetto", effettuata a seguito delle analisi probabilistiche di scendimento massi compiute inserendo la geometria del rilevato, ha indicato che in alcuni profili di

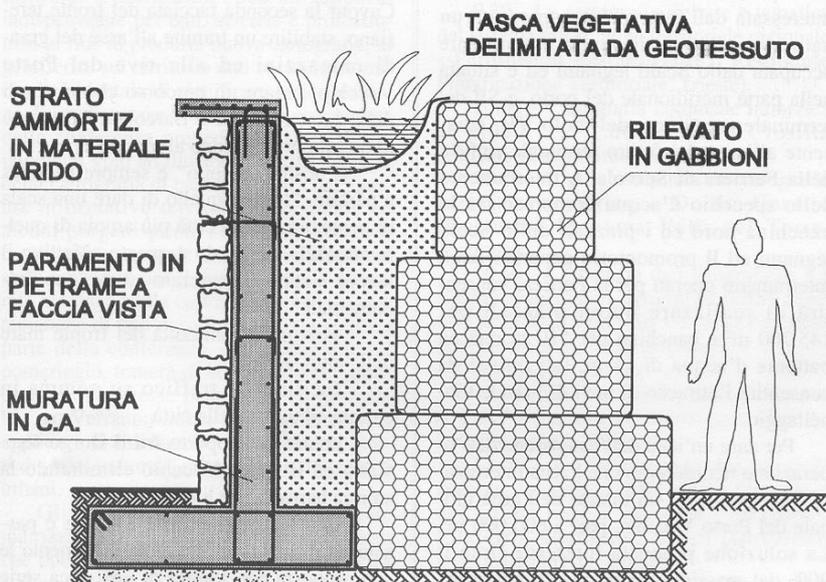


Qui sopra: un esempio di barriera paramassi ad alto assorbimento di energia, costituita da pannelli in rete antisommersibile collegati a dissipatori plastici, adottata nel progetto; Sotto: la sezione trasversale del sistema difensivo muro-rilevato in gabbioni progettato.

discesa il livello di sicurezza di progetto  $SL_d$  non ha raggiunto il valore di  $SL_{req}$  fissato, pertanto si è reso necessario integrare il sistema difensivo originariamente previsto attraverso l'installazione di barriere paramassi a rete. Sempre in riferimento alla già citata sezione 1 si ottiene una verifica di progetto in corrispondenza dell'ascissa X prescelta:

Il posizionamento planimetrico ottimale delle reti è stato guidato dalla preliminare determinazione dei minimi delle funzioni involuppo relative alle altezze di volo e alle energie cinetiche possedute dai blocchi durante le simulazioni lungo i profili

di scendimento prescelti, verificando nel contempo che le zone simultaneamente caratterizzate da bassi valori dei due parametri fossero dotate di una buona accessibilità del sito. I livelli energetici ottenuti attraverso le simulazioni hanno consigliato l'utilizzo di barriere classificate almeno C5 secondo la normativa francese [1994], e pertanto dotate di una energia dissipabile di almeno 1 MJ e di un'altezza utile di intercettazione minima di 3 m. A seguito dell'inserimento nel sistema difensivo delle barriere a rete, il livello di sicurezza di progetto  $SL_d$  determinato sulla scorta di quanto proposto da uno degli autori



[Paronuzzi e Coccolo, 1995], è risultato essere su ogni sezione del pendio maggiore del livello di sicurezza richiesto  $SL_{req}$ .

Il raggiungimento del livello di sicurezza prefissato per il sito specifico, associato allo sviluppo delle necessarie verifiche strutturali sul rilevato e sulle barriere, ha premesso di considerare completato l'iter progettuale.

### Conclusioni

Il lavoro qui descritto ha rappresentato il primo tentativo organico di applicazione di una metodologia generale ad un caso specifico e reale. Si è adottato un approccio globale ed organizzato, che ha guidato le varie fasi della progettazione e ha "imposto" l'assunzione di strumenti di analisi fondati su criteri strettamente probabilistici. Gli autori ritengono ormai irrinunciabile l'acquisizione di una nuova mentalità nella progettazione delle opere paramassi, e l'applicazione della procedura teorica RDBD vuole essere un passo concreto in questa direzione.

E.A. - A.C.

Gli autori ringraziano il p.ind. Valentino Rabassi e il geol. Federico Sgobino della Comunità Montana del Gemonese, per la disponibilità prestata e per il supporto geologico, ed il p.ind. Maurizio Ippolito per l'inquadramento topografico realizzato.

### Bibliografia

- 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. 1, pp. 209
- ARTINI E., COCCOLO A. (1998) - *La progettazione delle opere paramassi*. Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia, 2, II, pp. 25-29.
- HUDSON J.A. (1992) - *Rock Engineering System: theory and practice*. Ellis Horwood, pp. 185
- 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.
- NORME FRANCAISE NF P95-308 (1994): *T1 Equipements de protection contre les eboulements - T2 Ecrans de filets - E Rock Falling protection equipments/Net trap*.
- 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.
- SGOBINO F. (1982) - *Studio geologico in prospettiva sismica del territorio*. Comunità Montana del Gemonese, Gemona del Friuli (UD).