

## **MODELLAZIONE NUMERICA AVANZATA PER LA PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI DIFESA DA CADUTA MASSI**

Laura Govoni  
*Università di Bologna*  
*l.govoni@unibo.it*

Guido Gottardi  
*Università di Bologna*  
*guido.gottardi2@unibo.it*

### **Sommario**

La modellazione del comportamento di barriere paramassi, strutture metalliche progettate per intercettare e arrestare blocchi in caduta in aree interessate da movimenti rapidi di versante, riveste oggi grande interesse, anche in considerazione della recente pubblicazione delle European Guideline for Technical Approval of falling rock protection kits (ETAG 027). Il presente contributo esamina, in primo luogo, alcuni aspetti dello sviluppo e calibrazione una metodologia numerica avanzata per l'analisi del comportamento di queste opere, sviluppata a partire dai dati raccolti in diverse campagne di prova condotte in scala reale. I risultati e le principali applicazioni, che trovano spazio sia nella progettazione strutturale di dettaglio nonché nella pianificazione di interventi di difesa complessivi, anche basati su una conveniente gestione e manutenzione delle opere esistenti, sono quindi brevemente esposti e commentati.

### **Introduzione**

In aree interessate da frane di crollo, l'impiego di barriere paramassi a rete per la messa in sicurezza del versante è particolarmente diffuso, anche in considerazione del loro limitato impatto ambientale e della facilità con la quale possono essere installate e mantenute. Perlopiù realizzate in acciaio, lo scopo di queste strutture è quello di arrestare blocchi in caduta dissipandone, all'impatto, l'energia cinetica (da qualche decina ad oltre 4500 kJ). Una barriera paramassi è generalmente costituita dalla ripetizione di più moduli funzionali identici (Figura 1a) composti da una struttura di intercettazione, una struttura di sostegno e da speciali elementi di raccordo (Figura 1b) aventi la funzione di trasferire le forze di impatto alle fondazioni, ancoraggi realizzati con doppie funi e piastre di base in calcestruzzo collegate al terreno mediante chiodature.

E' convenzione distinguere le barriere a limitata deformabilità da quelle ad alta deformabilità, essendo le prime caratterizzate da una bassa capacità di assorbimento energetico e piccola deformabilità, le seconde da una significativa deformabilità plastica del sistema, che permette la dissipazione di valori anche elevati di energia (Figura 1c e 1d).

Le barriere ad alta deformabilità, con capacità di assorbimento energetico superiore a 100 kJ, vengono attualmente progettate, dimensionate e quindi commercializzate sulla base dei risultati di prove in vera grandezza. Oggi disciplinate dalla European Guideline for Technical Approval of falling rock protection kit - ETAG 027 (EOTA, 2008), queste prove sono tradizionalmente intese a verificare se un prototipo di barriera, progettata per assorbire una data energia cinetica, è in grado di resistere all'impatto di blocchi dotati di energia di intensità minore o uguale al valore di progetto (Higgins, 2003).

I parametri necessari alla scelta e la messa in opera di barriere ad alta deformabilità nella progettazione di interventi di messa in sicurezza di un versante (forze agenti in fondazione  $F$  spostamenti del punto di impatto  $S$  e altezze  $H$ ) sono tradizionalmente estrapolati dai risultati di prove in scala reale, opportunamente modificati mediante fattori di sicurezza che tengono conto, oltre ad altre incertezze, delle condizioni incontrate in sito, generalmente diverse da quelle realizzate in campo prova (Peila *et al.*, 2006). Relativamente alle barriere a limitata deformabilità, vale la pena di osservare che, in assenza di dati sperimentali di riferimento, queste sono, in molti casi, messe in opera senza un vero e proprio dimensionamento (de Col e Cocco, 1996).

La crescente disponibilità di dati sperimentali precisi ed affidabili provenienti da prove di impatto su prototipi in vera grandezza su barriere ad alta deformabilità, ha recentemente reso possibile la messa a punto di modelli numerici (Nicot *et al.*, 2001; Cazzani *et al.*, 2002; Oggeri *et al.*, 2006; De Miranda *et al.*, 2010; Gentilini *et al.* 2011), che rappresentano ad oggi il punto di partenza per lo sviluppo di veri e propri strumenti progettuali di supporto al dimensionamento delle opere in fase di produzione e alla scelta e messa in opera delle medesime all'interno di un più ampia procedura di pianificazione di interventi di messa in sicurezza di versante.

In questo contesto, il presente contributo illustra brevemente alcuni dettagli, i risultati e le principali applicazioni di una strategia di modellazione numerica di barriere paramassi sviluppata e calibrata sulla base di un ampio, variato e consistente database sperimentale, finalizzato allo studio del comportamento di barriere ad alta deformabilità (da 500 a 5000 kJ), recentemente progettate, testate e distribuite (Gottardi e Govoni, 2010; Gentilini *et al.*, 2011).



Figura 1. Barriere paramassi a) schema di un singolo modulo funzionale, b) componenti strutturali di un singolo modulo funzionale; c) barriere paramassi a limitata deformabilità e d) ad alta deformabilità.

### Dettagli sulla modellazione numerica di barriere paramassi

La modellazione è basata sui dati sperimentali ottenuti da prove in vera grandezza condotte presso il campo prove a caduta verticale di Fonzaso (BL) su prototipi di barriere con capacità di assorbimento fino a 500, 3000, e 5000 kJ (Gottardi e Govoni, 2010). Durante una prova di impatto ciascun prototipo, costituito di tre moduli funzionali installati con inclinazione circa normale ad una parete sub-verticale è fatto impattare in corrispondenza della campata centrale da un blocco in caduta libera avente massa e velocità nota. Durante la prova è possibile misurare il massimo spostamento della barriera in direzione verticale ( $S$ ) nonché le forze ( $F$ )

agenti sulle fondazioni. La Figura 2 illustra alcuni dettagli sperimentali con riferimento ad un prototipo di barriera avente capacità di assorbimento energetico fino a 5000 kJ.

Le prove hanno permesso di esaminare la risposta dei prototipi in presenza di diversi valori di energia di impatto, da un terzo (energia SEL) fino ad una volta (energia MEL) il valore di progetto.

A partire da questi dati si sono sviluppati tre modelli FE di barriera (Gentilini *et al.* 2011), ciascuno corrispondente ad uno dei prototipi. Tutti i modelli presentano geometria tridimensionale e sono costituiti da elementi monodimensionali. Particolare attenzione è stata posta nella definizione dei legami costitutivi assegnati agli elementi, per i quali si è in taluni casi (pannello di rete e elementi dissipatori) resa necessaria una complessa procedura di identificazione. Le analisi, di tipo non-lineare e dinamico, con algoritmo di integrazione esplicito, particolarmente adeguato alla modellazione di fenomeni di impatto, sono state condotte con energia pari al livello SEL e MEL al fine di verificare la capacità dei modelli di riprodurre il comportamento osservato su prototipo sia in termini di spostamenti ( $S$ ) che di forze ( $F$ ) agenti sulle fondazioni. I risultati delle analisi hanno confermato la validità della strategia di modellazione come si osserva, con riferimento al prototipo di barriera avente capacità di assorbimento fino a 5000 kJ, in Figura 3 nella quale sono mostrati alcuni risultati, in termini di massimo allungamento ( $S$ ) e forze mobilitate agli ancoraggi ( $F^* = F/E_{kSm}$ ), nel tempo, unitamente alle corrispondenti grandezze misurate sperimentalmente.

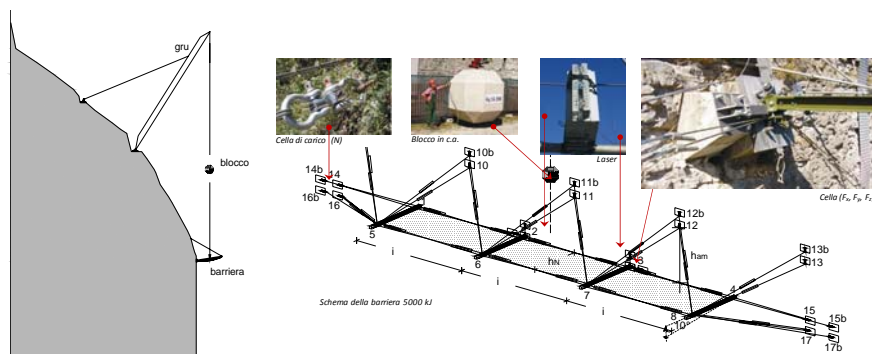


Figura 2. Dettagli sperimentali di una prova in vera grandezza condotta su un prototipo di barriera avente capacità di assorbimento energetico fino a 5000 kJ presso il campo prove di Fonzaso (BL).

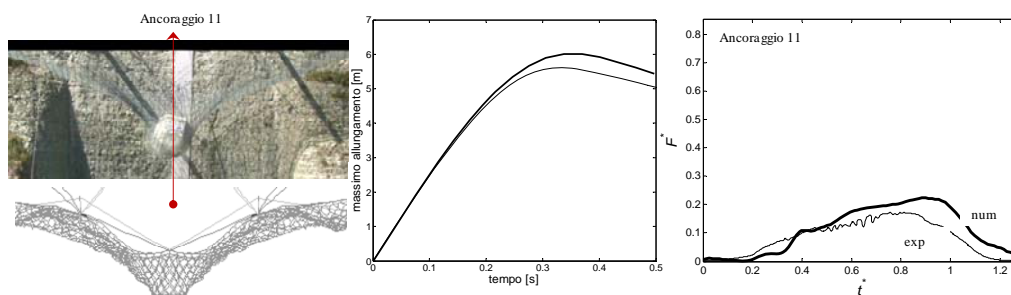


Figura 3. Risultati di una prova condotta al massimo livello di energia su modello e prototipo di barriera con capacità di assorbimento energetico fino a 5000 kJ: deformazioni, spostamenti, forze.

## Applicazioni della modellazione numerica di barriere paramassi nella pianificazione di interventi di messa in sicurezza di un versante

### Progettazione di nuovi interventi di difesa

La strategia di modellazione numerica, validata sulla base del comportamento osservato

sperimentalmente su prototipi, può essere quindi estesa all'interpretazione della risposta di barriere paramassi in diverse condizioni al contorno e di impatto.

In quest'ottica i risultati delle prove su prototipo condotte in accordo con le ETAG 27, tradizionalmente impiegati, attraverso l'uso di coefficienti di sicurezza, come parametri per la scelta e la messa in opera di queste barriere, possono essere invece utilizzati per lo sviluppo e la calibrazione di modelli numerici in grado, a loro volta, di fornire più attendibili parametri di progettazione di interventi.

In Figura 4 sono i risultati qualitativi di due analisi condotte sul modello di un prototipo di barriera avente capacità di assorbimento fino a 5000 kJ.

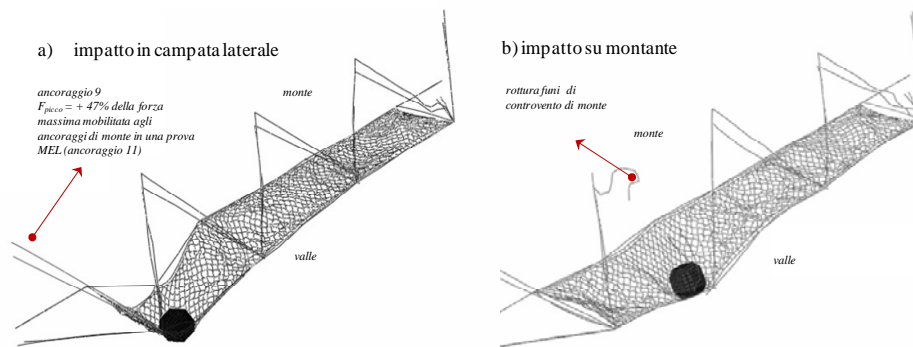


Figura 4. Analisi condotte sul modello di barriera con capacità di assorbimento energetico fino a 5000 kJ: a) impatto in campata laterale e b) impatto sul montante.

In particolare, la Figura 4a riporta un fotogramma estratto da una analisi effettuata sul modello soggetto, in corrispondenza della campata laterale, all'impatto di un blocco avente la massima energia. In presenza di un impatto non simmetrico si registra un incremento di oltre il 47% nel valor massimo delle forze di picco mobilitate agli ancoraggi (ancoraggio 9) rispetto ai valori registrati in analisi condotte in condizioni di prova. In Figura 4b è invece illustrato un fotogramma di analisi condotta sul medesimo modello di barriera fatta impattare su un montante interno da un blocco avente la massima energia cinetica. I risultati dell'analisi evidenziano un superamento della tensione ammissibile negli elementi fune dei controventi di monte.

#### *Gestione e manutenzione di barriere paramassi esistenti*

La strategia di modellazione può essere inoltre estesa all'interpretazione del comportamento di altre tipologie di barriere paramassi già messe in opera, per le quali le informazioni relative al comportamento sperimentale osservato su prototipi sono limitate quando non assenti (Gottardi *et al.*, 2011). E' il caso, ad esempio, di barriere ad alta deformabilità di progettazione non recente per le quali si dispone dei risultati di prove in vera grandezza ottenuti in campi prova solo parzialmente strumentati, o di barriere a limitata deformabilità per le quali anche la capacità di assorbimento energetico è non nota.

In questi casi la modellazione numerica dell'opera, che può essere condotta impiegando le strategie già messe a punto e validate su base sperimentale, necessita dei dati necessari alla descrizione della geometria di un modulo funzionale e del comportamento meccanico dei suoi componenti (Figura 1).

I dati contenuti nel catasto delle opere di protezione presenti sul territorio, di recente realizzato dalla Provincia Autonoma di Bolzano, opportunamente integrati mediante rilievo diretto e acquisizione della documentazione relativa alla loro messa in opera, hanno costituito

il punto di partenza per lo sviluppo dei modelli numerici di alcune tipologie di barriere paramassi presenti sul territorio della provincia.

In particolare si sono realizzati modelli di alcune tipologie di barriere ad alta deformabilità e di altre tipologie di barriere, perlopiù a limitata deformabilità, per le quali è stato necessario procedere numericamente alla determinazione della capacità massima di assorbimento energetico.

In Figura 4 sono illustrati, alcuni risultati preliminari di analisi numeriche condotte su due tipologie di barriere particolarmente diffuse sul territorio.

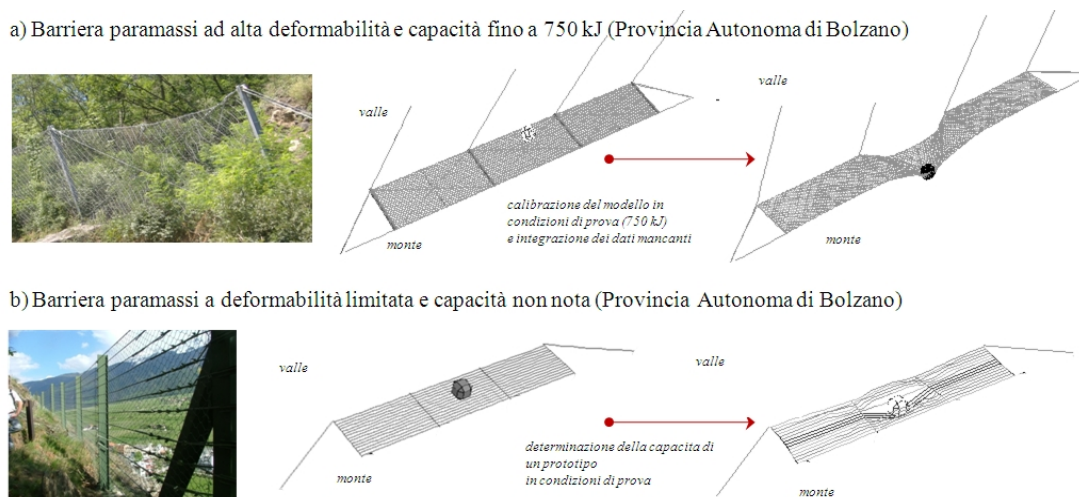


Figura 4. Modelli numerici di due tipologie di barriere della Provincia Autonoma di Bolzano: a) barriera paramassi a capacità di assorbimento energetico fino a 750 kJ e b) barriera paramassi a limitata deformabilità.

In particolare, la Figura 4a illustra una barriera ad alta deformabilità avente capacità dichiarata fino a 750 kJ ed il corrispondente modello numerico, realizzato e calibrato sulla base dei dati di prove in vera grandezza. In Figura 4b è mostrata una tipologia di barriera paramassi a deformabilità limitata unitamente al relativo modello numerico, realizzato con riferimento ad un prototipo di barriera di tre moduli funzionali. In analogia con i criteri di una procedura di prova in vera grandezza, il modello di barriera è stato sottoposto all'impatto nella campata centrale di blocchi aventi energia cinetica crescente fino a rottura, in maniera tale da pervenire ad una stima della capacità di assorbimento energetico.

Questi modelli costituiscono il punto di partenza per lo sviluppo di uno strumento finalizzato alla valutazione dell'efficacia delle barriere paramassi presenti sul territorio, in relazione alle previsioni di caduta formulabili in condizioni attuali. Infatti i modelli, sviluppati in condizioni di prototipo, possono essere modificati per tener conto, oltre alle particolari condizioni spaziali e di impatto anche dello stato di conservazione. I risultati di tali analisi possono essere quindi introdotti in più generali strumenti finalizzati all'analisi del rischio da caduta massi. In Figura 5. sono mostrati alcune delle carte realizzate dalla Provincia Autonoma di Bolzano per la valutazione della *priorità di intervento* sulle opere di protezione presenti sul territorio provinciale. Queste carte fanno parte di una più ampia procedura di accertamento della pericolosità ( $H$ ) di versante modificata per tener conto della presenza di opere di protezione (Gottardi *et al.*, 2011). Per definire la *priorità di intervento*, come illustrato in Figura è necessario conoscere i parametri: dimensionamento dell'opera (i.e. l'opera installata deve essere correttamente dimensionata nei confronti del blocco di progetto), posizionamento (l'opera deve essere correttamente posizionata nei confronti delle traiettorie di progetto dei blocchi) ed infine il suo stato di conservazione.

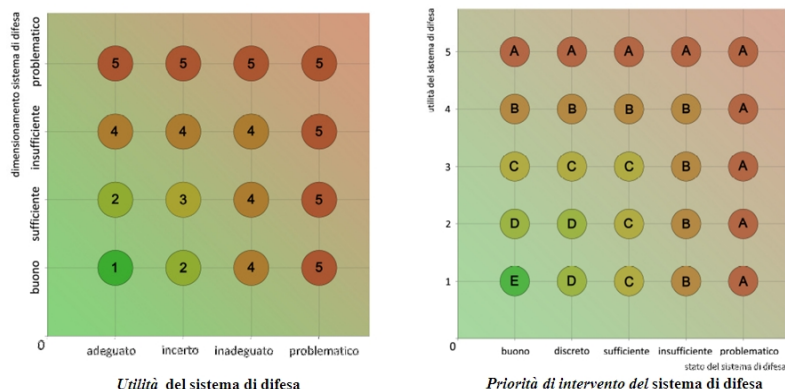


Figura 5. Procedura per la valutazione della priorità di intervento su un'opera di protezione nella Provincia Autonoma di Bolzano.

### Osservazioni conclusive

Il presente contributo ha brevemente illustrato i principali dettagli di una strategia di modellazione numerica per l'analisi del comportamento di barriere paramassi. La strategia è stata sviluppata e calibrata sulla base di dati ottenuti da prove in vera grandezza e quindi estesa per analizzare la risposta di barriere paramassi in condizioni al contorno e di impatto più vicine a quelle reali. La metodologia è stata inoltre applicata a barriere già in opera, per le quali le osservazioni sperimentali sono limitate quando non assenti. Risultati di queste ultime analisi trovano applicazione all'interno di più ampie procedure per la gestione e manutenzione di strutture esistenti.

### Bibliografia

- Cazzani A., Mongiovì L. e Frenèz T. (2002). Dynamic finite element analysis of interceptive devices for falling rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39 (3) 303–321.
- de Col R. e Cocco S. (1996). Motivazioni tecniche ed economiche per la standardizzazione di prove sulle opere paramassi nella Provincia Autonoma di Trento. *Giornata di studio "La protezione contro la caduta di massi dai versanti rocciosi"*, Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, 65-72.
- de Miranda S., Gentilini C., Gottardi G., Govoni L. e Ubertini F. (2010). A simple model to simulate the full-scale behaviour of falling rock protection barriers, *Atti 7<sup>th</sup> International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2010)*, Zurigo; Vol. 2, pp. 1247-1252.
- EOTA (2008). *Guideline for European technical approval of falling rock protection kits (ETAG 027)*. February 2008, Brussels.
- Gentilini C., Govoni L., de Miranda S., Gottardi G. e Ubertini F. (2011). Three-dimensional numerical modelling of falling rock protection barriers, *Computer and Geotechnics*, in attesa di pubblicazione.
- Gottardi and Govoni (2010) Full scale modelling of rockfall protection barriers, *Rock Mech. Rock Engng.* 43 (2010), pp. 261-274.
- Gottardi G., Govoni L., Mentani A., Ranalli M. e Strada C. (2011). The effectiveness of protection systems toward rockfall risk mitigation. *Atti 3<sup>rd</sup> ISGSR (ISGSR2011)*, Monaco di Baviera, 2-3 Giugno 2011, p. 157-164.
- Higgins J. D. (2003). *Recommended procedure for the testing of rock-fall barriers*. AASHTO Technical Report, Washington.
- Nicot F., Cambou B. e Mazzoleni G. (2001). From a constitutive modelling of metallic rings to the design of rockfall restraining nets. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 34 (2), pp. 98–118.
- Oggeri C., Peila D. e Valfré A. (2006). Calcolo e dimensionamento di barriere paramassi a rete. *Le Strade*, 10, pp. 158–164.
- Peila D., Oggeri C. e Baraton P. (2006). *Barriere paramassi a rete, interventi e dimensionamento*. GEAM Quaderni di studio e documentazione 25, Torino.