

Studio numerico dell'influenza dell'ammaloramento delle barriere paramassi

*Original*

Studio numerico dell'influenza dell'ammaloramento delle barriere paramassi / Luciani, Andrea; Peila, Daniele; Barbero, Monica. - In: GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA. - ISSN 1121-9041. - STAMPA. - 147:1(2016), pp. 31-38.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2651845 since: 2016-11-02T14:31:34Z

*Publisher:*

Patron Editore

*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)

# Studio numerico dell'influenza dell'ammaloramento delle barriere paramassi a rete

Andrea Luciani\*  
Daniele Peila\*  
Monica Barbero\*\*

\* DIATI, Politecnico di Torino, Torino  
\*\* DISEG, Politecnico di Torino, Torino

Le barriere paramassi a rete sono largamente utilizzate nella protezione del territorio da eventi di crolli in roccia. Queste opere possono essere soggette ad ammaloramenti che ne riducono la capacità di assorbimento dell'energia e conseguentemente si ripercuotono sull'efficacia nella mitigazione del rischio. Risulta quindi importante, al fine di una progettazione ottimale dell'intervento, stabilire l'influenza degli ammaloramenti sul comportamento delle barriere paramassi. A questo scopo nel presente studio viene simulato il comportamento di una barriera paramassi a rete attraverso la modellazione numerica esplicita in condizioni ottimali e in 10 diverse condizioni di deterioramento. Sulla base dei risultati ottenuti si stabilisce un confronto, giungendo a valutare l'effetto del fenomeno e a stimare un'efficienza residua per le opere deteriorate.

**Parole chiave:** barriere paramassi a rete, modellazione numerica esplicita, ammaloramento, efficienza, rischio caduta massi.

**Numerical study of the influence of deterioration on the rockfall protection net fences.** The rockfall protection net fences are widely used for the protection of structures and infrastructures. These works may be subjected to deteriorations that reduce their ability to absorb energy. This reduction has repercussions on the effectiveness of risk mitigation. Therefore, in order to optimise the design, it is important to evaluate the influence the deteriorations have on the behaviour of the net fences.

With this aim, this study shows the explicit numerical modelling of a net fence both in the optimal initial conditions and in 10 different deteriorated conditions, it compares the results and it estimates the deteriorated fence residual efficiency.

**Keywords:** Rockfall protection net fences, explicit numerical modelling, deterioration, efficiency, rockfall risk.

**Étude numérique de l'influence des dommages des écrans de filet pare-blocs dynamiques.** Les écrans de filet pare-blocs dynamiques sont largement utilisés pour la protection du territoire. Ces équipements de protection peuvent subir des dommages qui réduisent leur capacité d'absorption de l'énergie et par conséquent avoir un impact sur l'efficacité dans l'atténuation des risques de chute de pierres. Pour une conception optimale de ces équipements, il est important d'établir l'influence des dommages sur le comportement des écrans de filet. Cette étude a donc pour objectif de simuler grâce à une modélisation numérique explicite le comportement d'un écran de filet pare-blocs dynamique dans des conditions optimales et dans 10 conditions différentes de détérioration. Sur la base des résultats obtenus, une comparaison est établie, pour évaluer l'effet du phénomène et obtenir une estimation résiduelle des équipements détériorés.

**Mots-clés:** écrans de filet pare-blocs, modélisation numérique explicite, détérioration, efficacité, risque de chute de pierres.

## 1. Introduzione

Le barriere paramassi a rete svolgono un ruolo essenziale nel garantire la sicurezza di centri abitati, strutture, infrastrutture e vie di comunicazione contro fenomeni franosi rapidi particolarmente distruttivi come la caduta massi. Lo studio del comportamento di queste opere è stato affrontato sia mediante

prove in vera grandezza, in particolare dopo lo sviluppo delle norme ETAG 027 (Duffy *et al.*, 1996, Peila *et al.*, 1995, 1998, Gottardi e Govoni, 2010, Trad *et al.*, 2011, Buzzi *et al.*, 2013), sia mediante analisi pseudo-statiche (Peila *et al.*, 1998, Cantarelli e Giani, 2006) e modellazioni numeriche (Nicot *et al.*, 2001, Grassl *et al.*, 2002, Cazzani *et al.*, 2002, Volkwein, 2005, Peila *et al.*,

2006, Gentilini *et al.*, 2012, Escallón e Wendeler, 2013, Gentilini *et al.*, 2013, Moon *et al.*, 2014, Escallón *et al.*, 2015).

Un aspetto di particolare importanza, ma non frequentemente studiato, è però quello del comportamento nel tempo di queste opere e, specialmente, di come i possibili deterioramenti che esse possono subire nel tempo ne influenzino sia funzionamento ed efficienza. Questa valutazione è di grande importanza per gli enti gestori che devono conoscere il termine entro il quale l'opera, e quindi l'investimento, garantisce la riduzione del rischio e quindi pianificare quando essa vada sostituita, o quali provvedimenti siano necessari per allungare questo intervallo temporale. Inoltre, in fase progettuale, è importante effettuare analisi di rischio adeguate nel caso di opere preesistenti (Mignelli *et al.*, 2012, 2014).

L'utilizzo della modellazione numerica per lo studio delle opere paramassi è reso necessario dalla complessità e dal costo delle prove in vera grandezza ed i complessi fenomeni deformativi che si innescano al momento di un impatto richiedono l'utilizzo di software di modellazione dinamica di tipo esplicito grazie ai quali è possibile valutare l'influenza che i deterioramenti possono avere sull'efficienza dell'opera paramassi e quindi fornire indicazioni di confronto tra i risultati così ottenuti e quelli di una barriera non deteriorata.

Per poter quantificare l'eventuale perdita di efficienza del sistema e confrontare le barriere deteriorate con quelle non deteriorate, si è deciso di simulare numericamente una prova di impatto secondo le proce-

ture previste nelle norme ETAG 027 al fine di fornire un esempio applicativo e metodologico.

## 2. La modellazione eseguita

La barriera modellata è una barriera commerciale che ha un'energia nominale MEL di 3000 kJ e che è stata studiata con prove in vera grandezza riportate da Gottardi e Govoni (2010), a cui si è fatto riferimento per la taratura del modello. La barriera presenta:

- struttura di sostegno composta da 4 profilati HEA 200 di acciaio S275, di altezza 5 m, interasse 10 m, vincolati alla base da una cerniera monodirezionale che consente la rotazione nella direzione monte-valle;
- struttura di intercettazione formata da una rete principale ad anelli, ciascuno dei quali ha diametro 350 mm ed è concatenato con altri 6;
- struttura di connessione formata da 2 funi longitudinali inferiori e 2 superiori, 8 controventi di monte e 4 cavi laterali. Tutte le funi sono di diametro 20 mm e le funi longitudinali possono scorrere sui montanti nel piano dei montanti;
- rete connessa ad una sola fune longitudinale superiore e ad una sola fune longitudinale inferiore;
- dissipatori a deformazione di materiale tubolari con corsa massima 1 m. Essi sono disposti uno su ogni controvento di monte, uno

su ogni fune laterale e tre su ogni fune longitudinale.

La fig. 1 riporta lo schema generale della barriera.

### 2.1. Descrizione del modello numerico utilizzato

Nell'analisi è stato utilizzato il software ABAQUS/Explicit 6.13 che usa una formulazione agli elementi finiti esplicita ed è in grado di modellare eventi dinamici non lineari con variazione delle condizioni di contatto.

Il blocco è simulato come un elemento non deformabile di forma poliedrica, con la geometria prevista dalle norme ETAG 027, in moto con velocità di impatto pari a 25 m/s. Le dimensioni del blocco sono state ricavate in funzione dell'energia di impatto e l'interazione tra massa e struttura è stata simulata con un'interazione di contatto tra la superficie del blocco e la superficie della rete e delle funi. La modellazione del contatto è a comportamento tangenziale con coefficiente di attrito pari a 0.4.

I montanti sono simulati con elementi beam tridimensionali a 2 nodi (che possono essere sottoposti a sforzo normale, taglio e momento) ed hanno la sezione del profilo HEA 200, con densità 7800 kg/m<sup>3</sup> e comportamento lineare elastico con modulo di deformabilità pari a 210 GPa. La fondazione del montante è schematizzata da una cerniera monodirezionale con direzione monte-valle.

Le funi sono discretizzate da elementi truss tridimensionali a 2 nodi che non hanno rigidità flessionale e possono sostenere solo sforzi assiali. Il materiale costituente le funi è modellato con un comportamento elasto-plastico inelastico bilineare con modulo di deformabilità della parte elastica pari a 150 GPa e quello del tratto plastico inelastico pari a 5 GPa. La deformazione di plasticizzazione è stata assunta pari a 0.001 e la deformazione ultima pari a 0.006, a cui corrisponde una tensione di rottura delle funi di diametro 20mm di 1770 MPa.

Gli ancoraggi delle funi al terreno e in testa ai montanti sono simulati con cerniere sferiche mentre il collegamento tra le funi longitudinali e i montanti è realizzato imponendo un vincolo tra il nodo di testa del montante e i nodi delle funi in corrispondenza del punto di contatto. Tale vincolo consente la rotazione e lo spostamento in direzione longitudinale bloccando gli spostamenti nelle altre due direzioni.

I dissipatori sono modellati utilizzando un legame costitutivo che rispecchia il comportamento del sistema fune-dissipatore. Tale legame costitutivo è trilineare: un primo tratto elastico con modulo 63 GPa fino al raggiungimento della forza di attivazione del freno, pari 45 kN; il secondo all'attivazione del freno con deformabilità maggiore e modulo 1.4 GPa, fino a giungere alla completa corsa del dissipatore, pari a 1 m; l'ultimo tratto è reso con rigidità pari a

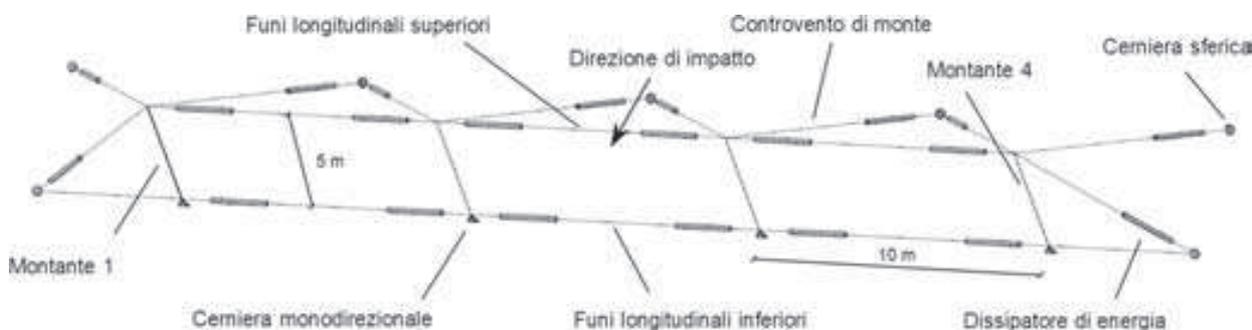


Fig. 1. Schema della barriera studiata.  
Drawing of the studied net fence.

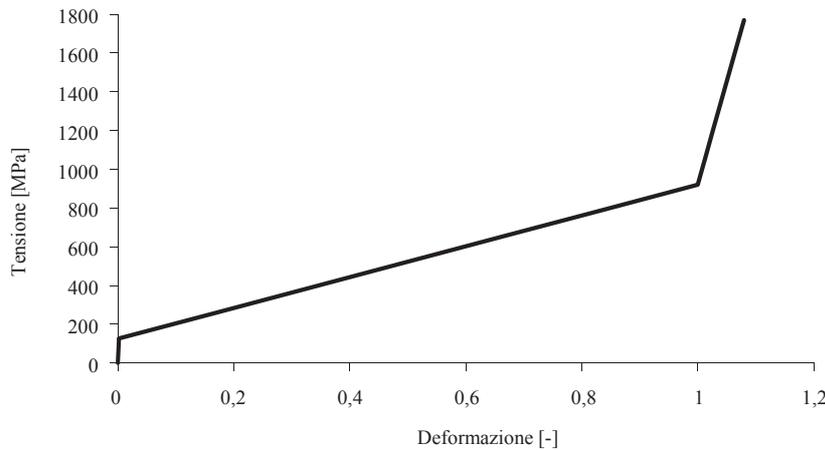


Fig. 2. Legame costitutivo del dissipatore.  
Constitutive relation of the energy dissipating device.

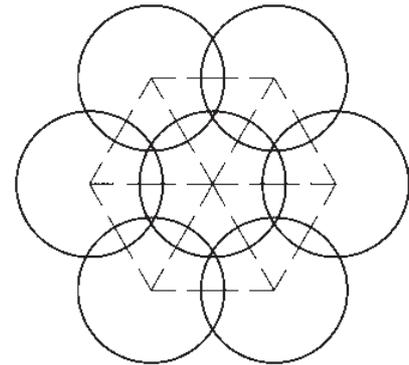


Fig. 3. Schema della modellazione della rete ad anelli con una rete equivalente esagonale.  
Drawing of the modelling of the ring net with an equivalent hexagonal net.

quella della fune, 150 GPa, e tensione di rottura pari a 1770 MPa (fig. 2).

La modellazione della rete ad anelli richiede di simulare le fasi di ovalizzazione e deformazione elevata che gli anelli subiscono durante un impatto, nonché il loro scorrimento, il che è particolarmente complesso (Nicot *et al.*, 2001). Nella presente ricerca la rete è modellata con una maglia esagonale di lato 350 mm, vincolata con cerniere sferiche ad ogni vertice (fig. 3).

La rete è composta da elementi truss tridimensionali a 2 nodi reagenti a soli sforzi assiali. Le proprietà meccaniche assegnate a questi elementi sono state tarate usando le prove in vera grandezza riportate da Gentilini *et al.* (2013). Il legame costitutivo ottenuto è trilineare con un tratto iniziale con modulo di deformazione di 170 GPa fino ad una deformazione 0.001, un tratto a deformazione più marcata, con modulo di deformazione di 4 GPa fino ad una deformazione di 0.25, e un tratto finale con modulo 170 GPa. (fig. 4).

La connessione tra la rete e le funi è stata modellata come una cerniera sferica, trascurando la possibilità della rete di scorrere sulle funi. Tale assunzione, pur differente dalla realtà, è stata necessaria per rendere operativamente più veloci i tempi per la modellazione numerica.

I risultati per la taratura del mo-

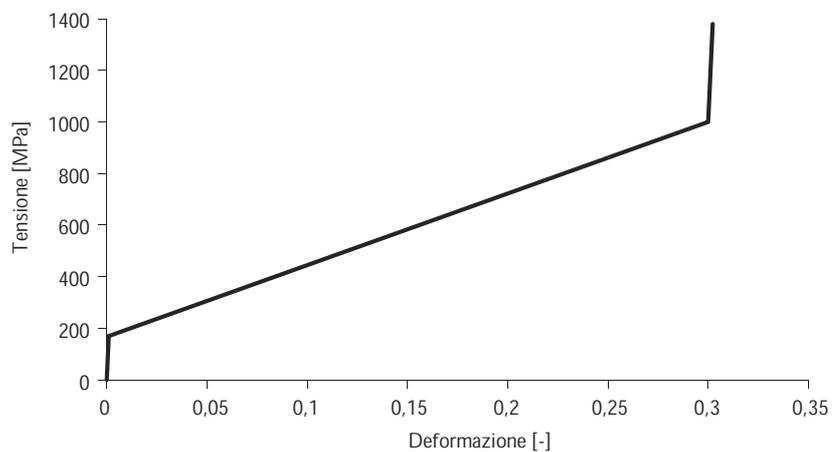


Fig. 4. Legame costitutivo della rete.  
Constitutive relation of the net.

dello sono stati validati mediante confronto con le misurazioni effettuate durante le prove in vera grandezza realizzate sulla barriera e riportate da Gottardi e Govoni (2010) e in tab. 1 e tab. 2 si riportano i valori misurati e quelli ottenuti dalla simulazione per energia MEL e SEL.

I parametri usati per la fase di taratura sono: il tempo di arresto del blocco, ovvero l'istante per cui la velocità del blocco si annulla; l'elongazione massima, ovvero il massimo spostamento verso valle della rete al tempo di arresto, e l'elongazione finale, che è lo spostamento verso valle della rete alla fine della prova (stabilita quella dopo 6 s nella simulazione numerica); infine l'altezza residua è la distanza in

mezzeria tra fune longitudinale superiore e fune longitudinale inferiore misurata a fine prova nel piano dei montanti prima della prova.

Tab. 1. Confronto dei risultati prova MEL reale con quella simulata numericamente presente studio.

Comparison between the result of the MEL test in the tests and in the numerical simulation in this study.

	Prova vera grandezza	Modello numerico
Tempo di arresto [s]	0.30	0.32
Elongazione massima [m]	5.35	5.38
Elongazione finale [m]	4.80	5.05
Altezza residua [m]	3.55	3.34

Tab. 2. Confronto dei risultati prova SEL reale con quella simulata numericamente nel presente studio.

Comparison between the result of the SEL test in the tests and in the numerical simulation in this study.

	Prova vera grandezza	Modello numerico
Tempo di arresto [s]	0.26	0.22
Elongazione massima [m]	3.90	3.73
Elongazione finale [m]	3.20	3.35
Altezza residua [m]	3.95	3.71

Dal confronto dei risultati il modello numerico mostra una buona concordanza con i valori ottenuti dalle prove in vera grandezza sulla barriera, sia al livello energetico MEL che a quello SEL.

A titolo esemplificativo si riportano in fig. 5 i risultati del modello numerico a diversi istanti durante la simulazione della prova MEL.

### 3. Simulazione dei danneggiamenti

Il modello numerico, dopo essere stato tarato secondo quanto precedentemente descritto, è stato utilizzato per elaborare diversi modelli di configurazioni danneggiate della barriera al fine di studiare l'effetto dei deterioramenti sull'efficienza dell'opera.

Sulle nuove configurazioni sono state simulate le stesse prove MEL e SEL del modello iniziale confrontando i risultati; l'efficienza residua delle barriere danneggiate ( $e_r$ ) è stata valutata come il rapporto

$$e_r = \frac{E_{MR}}{E_{ETAG}} (\%)$$

tra  $E_{MR}$ , energia massima resistente del modello danneggiato, e  $E_{ETAG}$ , energia nominale del modello originale secondo le ETAG 027, pari nel caso studiato a 3000 kJ.

Sui modelli sono stati simulati

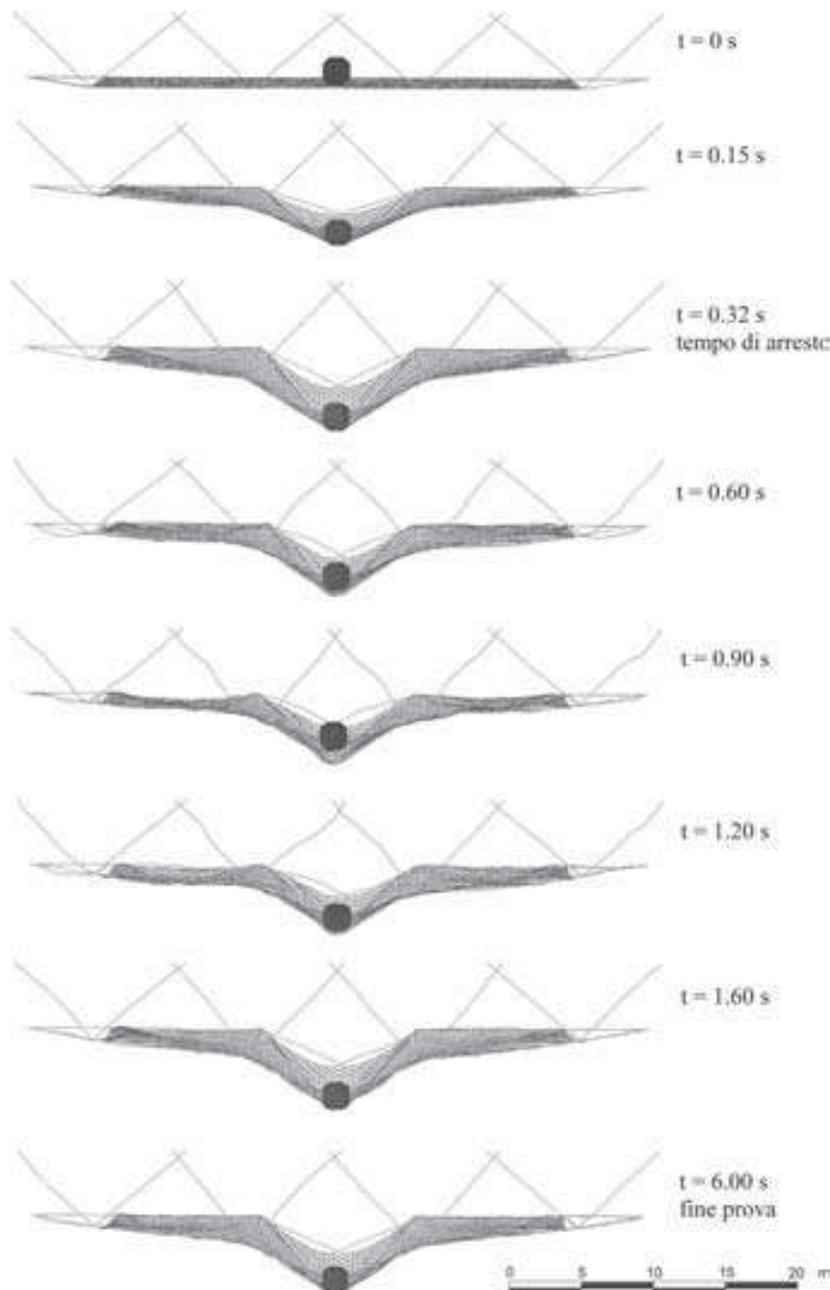


Fig. 5. Deformazione della barriera ottenuta dalla modellazione numerica per diversi istanti di tempo per la prova al livello energetico MEL.

Deformation of the net fence obtained by the numerical model for different times during the MEL test.

impatti ad energia decrescente con intervalli di 100 kJ, a partire dal valore di energia nominale di 3000 kJ, fino ad identificare il valore dell'energia a cui la barriera resiste senza rotture delle funi. Questo valore è stato quindi assunto come l'energia massima resistente della barriera de-

teriorata; in particolare la barriera è considerata non resistente qualora uno degli elementi fondamentali costituenti il modello subisca una deformazione plastica superiore a quella massima prevista per il materiale costituente l'elemento.

Nel caso della rete ad anelli, es-

sendosi utilizzata nella simulazione numerica una rete equivalente, si è assunta la rottura della rete per valori di deformazione plastica della stessa superiori a quelli massimi misurati durante la simulazione della prova MEL sulla modello non deteriorato.

Globalmente lo studio ha previsto la simulazione delle seguenti dieci configurazioni di danneggiamento: l'effetto della rottura di uno o più controventi di monte, che può anche essere dovuto allo sfilamento sulle giunture morsettate (casi I-IV), della rottura degli ancoraggi di fondazione di monte (casi V-VI), l'inefficacia dei dissipatori di energia della longitudinale inferiore (caso VII) e del dissipatore di energia di un controvento di monte (caso VIII) e l'influenza della corrosione sulla fune (casi IX e X).

La rottura dei controventi e degli ancoraggi è stata simulata eliminando dalla modellazione di volta in volta gli elementi considerati mentre l'inefficacia dei dissipatori è stata modellata attribuendo agli elementi del dissipatore il legame costitutivo della fune; infine la corrosione è stata modellata riducendo la sezione trasversale degli elementi sottoposti a degrado (fig. 6). In tutte le prove l'impatto è considerato al centro del pannello centrale con una velocità d'impatto di 25 m/s.

Sulla base delle analisi effettuate si sono ottenuti i seguenti risultati.

Nei casi I, II, IV e VI la barriera si è confermata in grado di reggere un impatto con energia 3000 kJ, mentre nei casi III e V l'impatto a 3000 kJ ha provocato la rottura della rete e si è scesi ad una energia massima resistente di 2900 kJ. Pertanto la rottura di uno o più dei controventi o di uno degli ancoraggi di monte ha comportato perdita di efficienza della barriera ridotta in termini di energia massima resistente. Si osservano però elongazioni massime maggiori (fino al 20% in più) rispetto al caso non danneggiato (figg. 7-8) e inoltre si osservano altezze residue minori come mostrato figg. 9-10.

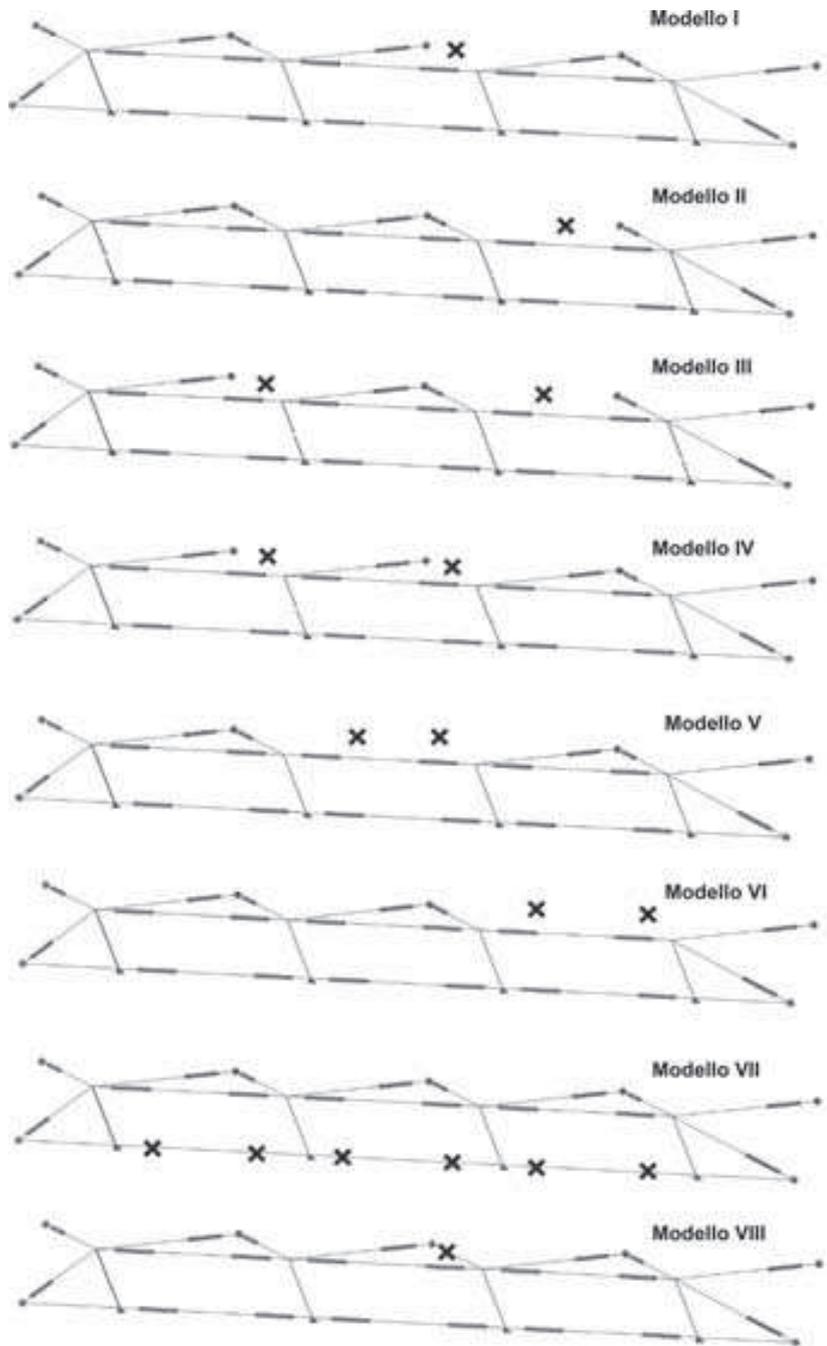


Fig. 6. Schemi dei danneggiamenti simulati nei casi I – VIII; i casi IX – X riguardanti la corrosione non sono rappresentati in quanto prevedono soltanto il cambiamento della sezione degli elementi. Le croci indicano l'elemento eliminato.

Sketches of the simulated deteriorations on the cases I – VIII; the cases IX – X, concerning the corrosion, are not reported because they concern only the reduction of the elements section. The crosses indicate the eliminated elements.

Nel caso VII (inefficacia dei dissipatori delle funi longitudinali inferiori) la barriera non ha resistito alla prova MEL a 3000 kJ e si sono rotte le funi longitudinali inferiori in

corrispondenza dei collegamenti ai montanti centrali. È evidente che la rottura della fune è dovuta alla maggiore rigidità che assume in questa configurazione e conseguentemente

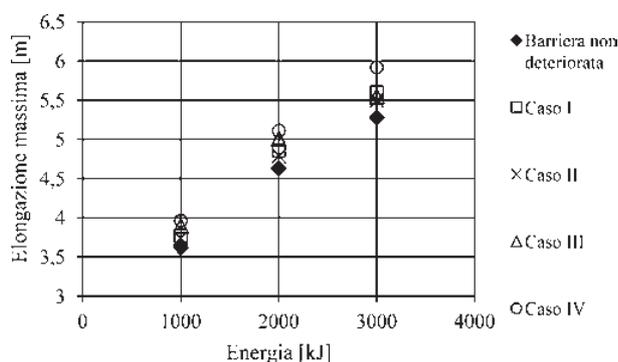


Fig. 7. Elongazione massima della barriera studiata per differenti livelli energetici di impatto e per i diversi casi di ammaloramento: casi I – IV rottura di un controvento di monte.  
Maximum elongation of the net fence for different impact energy levels and different deteriorations: cases I – IV breaking of upstream cables.

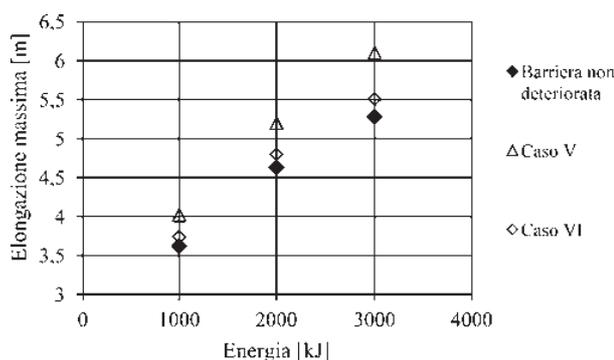


Fig. 8. Elongazione massima della barriera studiata per differenti livelli energetici di impatto e per i diversi casi di ammaloramento: casi V – VI rottura di un ancoraggio di monte.  
Maximum elongation of the net fence for different impact energy levels and different deteriorations: cases V – VI breaking of an upstream anchorage.

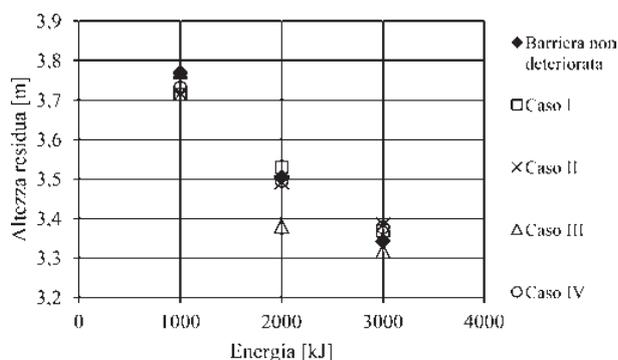


Fig. 9. Altezza residua della barriera studiata per differenti livelli energetici di impatto e per i diversi casi di ammaloramento: casi I – IV rottura di un controvento di monte.  
Residual height of the net fence for different impact energy levels and different deteriorations: cases I – IV breaking of upstream cables.

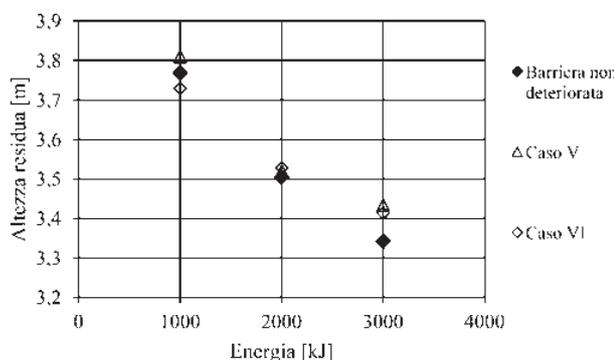


Fig. 10. Altezza residua della barriera studiata per differenti livelli energetici di impatto e per i diversi casi di ammaloramento: casi V – VI rottura di un ancoraggio di monte.  
Residual height of the net fence for different impact energy levels and different deteriorations: cases V – VI breaking of an upstream anchorage.

alle maggiori tensioni a cui è soggetta. Il calcolo ha fornito un'energia massima resistente pari a 1600 kJ e quindi un'efficienza residua del 53% rispetto al caso originale.

Nel caso VIII (inefficienza del dissipatore del controvento di monte) la barriera non ha resistito alla prova MEL a 3000 kJ a causa della rottura delle funi longitudinali inferiori in corrispondenza dei collegamenti ai montanti centrali ed agli ancoraggi con energia massima resistente di 2500 kJ e un'efficienza residua del 83% rispetto a quella iniziale.

L'effetto della corrosione si manifesta principalmente nella riduzione della capacità di assorbimento ener-

getico della barriera. La corrosione della fune al 5% della sezione trasversale intacca l'efficienza del sistema del 13%, che aumenta la 20% nel caso di penetrazione della corrosione per il 10% della sezione trasversale.

La tab. 3 riporta, per i casi analizzati, le energie massime resistenti ottenute dal calcolo.

## 4. Conclusioni

Il presente lavoro riporta un'analisi numerica dell'influenza sul comportamento delle barriere paramassi a rete di possibili danneggiamenti

tramite modellazione numerica. È stato realizzato un modello di barriera paramassi con il software ABAQUS/Explicit 6.13, tarato su prove in vera grandezza riportate in letteratura. Il modello così ottenuto è stato utilizzato come base per la realizzazione di configurazioni deteriorate nelle quali si è verificato il livello di energia che la barriera degradata è in grado di assorbire, arrivando a quantificare l'efficienza residua, espressa come il rapporto tra l'energia massima resistente della barriera deteriorata e l'energia nominale della barriera secondo la classificazione prevista dalle ETAG 027.

Si è anche valutato come il dan-

Tab. 3. Risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche nei casi deteriorati; destra e sinistra sono valutati da valle; i montanti sono numerati da sinistra verso destra.  
*Numerical simulation results for the deteriorated cases; left and right are evaluated from downstream; the posts are numbered from left to right.*

Modello	Deterioramento	Energia massima resistente [kJ]	Efficienza residua [%]
I	Rottura controvento sinistro 3° montante	3000	100
II	Rottura controvento destro 3° montante	3000	100
III	Rottura controvento sinistro 2° montante e destro 3° montante	2900	97
IV	Rottura controvento sinistro 2° e 3° montante	3000	100
V	Rottura controvento sinistro 3° montante e destro 2° montante	2900	97
VI	Rottura controvento sinistro 4° montante e destro 3° montante	3000	100
VII	Inefficacia dissipatori fune longitudinale inferiore	1600	53
VIII	Inefficacia dissipatore controvento sinistro del 3° montante	2500	83
IX	Corrosione funi 10% della sezione trasversale	2400	80
X	Corrosione funi 5% della sezione trasversale	2600	87

neaggiamento influisca sull'altezza residua e sulla deformazione massima, essendo entrambi parametri fondamentali per una corretta progettazione.

La modellazione numerica adottata si è rivelata uno strumento idoneo per stabilire il comportamento di barriere deteriorate e quindi fornire una prima indicazione nell'ottica del ripristino.

Dalle analisi sviluppate risulta che la rottura o l'inefficienza di un controvento influisce quasi solo in termini di altezze residue ed elongazioni massime e influisce poco o affatto in termini di energia assorbita dall'opera.

Più marcata è invece l'influenza sull'efficienza dell'opera del malfunzionamento dei dissipatori di energia che provoca l'irrigidimento del sistema e comporta efficienze residue quasi dimezzate rispetto a quelle originali, con una riduzione significativa della capacità della barriera di assorbire l'energia di impatto. Anche la corrosione delle funi intacca l'efficienza dell'opera a causa della rottura di questi componenti ad energie di impatto inferiori a quelle nominali,

con un valore minimo di efficienza residua del 80% nel caso di corrosione della fune per il 10% della sezione trasversale.

È importante sottolineare che il presente studio è relativo ad una particolare configurazione geometrica che è quella della barriera analizzata. I risultati pubblicati non sono quindi direttamente estrapolabili ad altre tipologie di barriere. Quello che si vuole sottolineare è però l'importanza della metodologia proposta anche nell'ottica di fornire informazioni complete e robuste agli utilizzatori finali dei prodotti.

### Bibliografia

Buzzi, O., Spadari, M., Giacomini, A., Fityus, S., Sloan, S.W., 2013. *Experimental Testing of Rockfall Barriers Designed for the Low Range of Impact Energy*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 46, pp. 701-712.

Cantarelli, G., Giani, G.P., 2006. *Analisi dei metodi di verifica dell'efficienza di reti di protezione contro la caduta*

massi. Rivista Italiana di Geotecnica, 40 (3), pp. 23-31.

Cazzani, A., Mongiovi, L., Frenez, T., 2002. *Dynamic finite element analysis of interceptive devices for falling rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, pp. 303-321.

Dimasi, C., Luciani, A., Martinelli, D., Paganone, M., Peila D., 2015. *Controllo delle barriere paramassi a rete per la loro gestione e manutenzione*. Geotecnica Ambientale e Mineraria, vol. 146, n. 3, pp. 65-731.

Duffy, J.D., Wade Hoon, 1996. *Fild tests and evaluation of HI-tech 50 and 70 foot-ton rockfall fence*. Report No. CA/05-96-02, California Dept. of Transportation, San Luis Obispo, Ca.

EOTA, 2008. *Guideline for European technical approval of falling rock protection kits (ETAG 027)*, Brussels.

Escallón, J.P., von Botticher, A., Wendeler, C., Chatzi, E., Bartelt, P., 2015. *Mechanics of chain-link wire nets with loose connections*. Engineering Structures, 101, pp. 68-87.

Escallón, J.P., Wendeler, C., 2013. *Numerical simulations of quasi-static and rockfall impact tests of ultra-high strength steel wire-ring nets using Abaqus/Explicit*. In: 2013 SIMULIA Community conference.

Gentilini, C., Gottardi, G., Govoni, L., Mentani, A., Ubertini, F., 2013. *Design of falling rock protection barriers using numerical models*. Engineering Structures, 50, pp. 96-106.

Gentilini, C., Govoni, L., de Miranda, S., Gottardi, G., Ubertini, F., 2012. *Three-dimensional numerical modelling of falling rock protection barriers*. Computers and Geotechnics, 44, pp. 58-72.

Gottardi, G., Govoni, L., 2010. *Full-scale Modelling of Falling Rock Protection Barriers*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 43, pp. 261-274.

Grassl, H., Volkwein, A., Anderheggen, E., Ammann, W.J., 2002. *Steel-net rockfall protection – experimental and numerical simulation*. In: Pro-

- ceedings of Seventh International Conference on Structures Under Shock and Impact, Montreal, Canada, May 2002, pp. 143-153.
- Mignelli, C., Lo Russo, S., Peila, D., 2012. *ROckfall risk MAnagement assessment: the ROMA. approach*. Natural Hazards, 62, pp. 1109-1123.
- Mignelli, C., Peila, D., Lo Russo, S., Ratto, S.M., Broccolato, M., 2014. *Analysis of rockfall risk on mountain-side roads: evaluation of the effect of protection devices*. Natural Hazards, 73, pp. 23-35.
- Moon, T., Oh, J., Mun, B., 2014. *Practical design of rockfall catchfence at urban area from a numerical analysis approach*. Engineering Geology, 172, pp. 41-56.
- Nicot, F., Cambou, B., Mazzoleni, G., 2001. *Design of Rockfall Restraining Nets from a Discrete Element Modelling*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 34 (2), pp. 99-118.
- Peila, D., Oggeri, C., Baratono, P., 2006. *Barriere paramassi a rete. Interventi e dimensionamento*. Geingegneria Ambientale e Mineraria, Quaderni di studio e documentazione n° 25, Torino.
- Peila, D., Pelizza, S., Sassudelli, F., 1995. *Prove in scala reale su barriere paramassi deformabili a rete*. Geingegneria Ambientale e Mineraria, 86, pp. 147-153.
- Peila, D., Pelizza, S., Sassudelli, F., 1998. *Evaluation of Behaviour of Rockfall Restraining Nets by Full Scale Tests*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 31 (1), pp. 1-24.
- Trad, A., Limam, A., Bertrand, D., Robit, P., 2011. *Chapter 9: Multi-scale Analysis of an Innovative Flexible Rockfall Barrier*. In: Lambert, S., Nicot, F., *Rockfall Engineering*, Wiley-ISTE, pp. 303-341.
- Volkwein, A., 2005. *Numerical Simulation of Flexible Rockfall Protection Systems*. In: Proceedings of the International Conference on Computing in Civil Engineering, 2005, Cancun, Messico, ASCE, pp. 1285-1295.

### Ringraziamenti

La modellazione numerica della barriera è stata simulata da A. Luciani sotto la supervisione del prof. D. Peila e della prof.ssa M. Barbero. Lo sviluppo delle analisi degli ammaloramenti è stata sviluppata in particolare da A. Luciani e D. Peila. L'articolo è stato redatto congiuntamente dai vari autori e la versione finale è rivista e corretta da D. Peila.

La ricerca è stata condotta dal prof. D. Peila nell'ambito del contratto di ricerca con la Regione Autonoma Valle d'Aosta n. 222/2014.