

Una procedura speditiva per la valutazione dello stato di conservazione delle barriere paramassi a rete

Original

Una procedura speditiva per la valutazione dello stato di conservazione delle barriere paramassi a rete / Marchelli, Maddalena. - In: GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA. - ISSN 1121-9041. - STAMPA. - 160:2(2020), pp. 24-35. [10.19199/2020.2.1121-9041.024]

Availability:

This version is available at: 11583/2854155 since: 2020-11-30T14:04:24Z

Publisher:

Patron Editore

Published

DOI:10.19199/2020.2.1121-9041.024

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)

DX.DOI.ORG/10.19199/2020.2.1121-9041.024

Una procedura speditiva per la valutazione dello stato di conservazione delle barriere paramassi a rete

Le barriere paramassi a rete sono sistemi multicomponente per la mitigazione del pericolo da caduta massi. Come misure di protezione passive, sono utilizzate per intercettare e arrestare la propagazione dei blocchi di roccia a seguito del loro distacco da una parete o da un pendio. Durante la loro vita utile di progetto, le barriere sono soggette a fenomeni di invecchiamento, corrosione, e carichi da impatto; questi causano perdite di efficienza o, addirittura, di efficacia. Una procedura multi-matriciale per la valutazione dei danni, già proposta per le reti in aderenza, è qui adattata e personalizzata per questi sistemi. Considerando le barriere paramassi come sistemi multicomponente e individuando tutti i possibili meccanismi di danneggiamento sono studiati gli effetti di ogni potenziale danno sul comportamento complessivo. Applicazioni del metodo proposto a casi reali sono qui illustrati.

Parole chiave: caduta massi, barriere paramassi, sistema di valutazione speditivo, effetti dell'invecchiamento, efficienza.

A quick-assessment procedure to evaluate the degree of conservation of rockfall net fences. Rockfall net fences are multicomponent protection devices for mitigating rockfall hazard. As passive measures, they are used to intercept and stop rock blocks propagation after their detachment from a cliff or a slope. During their design working life, net fences subjected to ageing phenomena, corrosion and impact loads, causing their efficiency loss or even their effectiveness. A multi-matricial procedure for the assessment of the damages, already proposed for drapery mesh systems, is adapted and tailored for these structures. Treating net fences as multicomponent systems and, besides the individuation on the possible failure mechanisms, the effects of each potential damage on the overall behaviour are deeply investigated. Applications on real cases are presented.

Keywords: Rockfall, net fences, quick assessment, ageing effects, efficiency.

1. Introduzione

Da metà del secolo scorso le barriere paramassi flessibili o ad alta deformabilità rappresentano uno dei sistemi di protezione più efficaci per la mitigazione del rischio (Peila & Ronco, 2009; Volkwein *et al.*, 2011a; De Biagi *et al.*, 2020; Marchelli *et al.*, 2020). Questo sistema viene impiegato a protezione sia di infrastrutture, come strade ad alta percorrenza, ferrovie, sentieri che di edifici e piccole borgate (Guzzetti *et al.*, 2004; Peila & Guardini 2008; Ventura *et al.*, 2017; Vallero *et al.*, 2020).

Nate come un'evoluzione delle barriere paramassi rigide, grazie

alla loro capacità deformativa e alla loro facilità di installazione, queste opere sono ampiamente impiegate e, ad oggi, sono disponibili prodotti con capacità di assorbimento energetico da 100 a 10000 kJ. Queste opere sono essenzialmente costituite da una rete che intercetta e arresta i blocchi in transito, sostenuta da montanti metallici che fungono da elementi di supporto, e da elementi di connessione, quali funi e dispositivi di giunzione, che trasferiscono i carichi alle fondazioni. L'allungamento della rete, unitamente all'attivazione di sistemi di dissipazione dell'energia eventualmente presenti, consente il raggiungimento di una deforma-

zione elasto-plastica molto elevata (Govoni *et al.*, 2011; Gottardi *et al.*, 2011, Castanon-Jano *et al.*, 2017). Il crescente interesse verso questo sistema ha comportato lo studio e la presenza sul mercato di molteplici soluzioni tecnologiche, e.g. differenti per tipologia di rete, per numero di funi, metodo di installazione, e dispositivi di dissipazione dell'energia. Lo studio e la realizzazione di componenti sempre più innovativi è funzione della possibilità di sviluppo delle tecniche di modellazione numerica (Gottardi & Govoni, 2010; Bertrand *et al.*, 2012; Gentilini *et al.*, 2013; Thoeni *et al.*, 2013; Castanon-Jano *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2018; Coulibaly *et al.*, 2019; Dougelas *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020) e della possibilità di effettuare prove in scala reale (Buzzi *et al.*, 2013; D'Agostino & Bertoldi, 2014; Giacomini & Govoni, 2016; Gao *et al.*, 2018). Questa grande variabilità ha portato a considerare le barriere paramassi come un "kit", la cui progettazione e immissione sul mercato risulta funzione di alcune caratteristiche prestazionali principali, quali la capacità di assorbimento energetico, l'altezza, e la deformabilità (UNI 11211-4, 2018; ETAG 027, 2008; EAD 340059-00-0106, 2018).

Malgrado questi notevoli sviluppi, solo pochi studi si sono tuttavia concentrati solo pochi studi si sono concentrati sull'effetto del tempo sulla funzionalità delle opere di protezione (Volta, 2011; Gorlato *et al.*, 2012; Luciani *et al.*, 2016; Luciani *et al.*, 2018; Lecce, 2018). L'invecchiamento, la corrosione, l'interazione con vegeta-

Maddalena Marchelli*

* Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente, il Territorio e le Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino

zione, detriti, animali o persone possono influire significativamente sull'efficienza e, conseguentemente, sull'efficacia delle barriere paramassi. In quanto kit o sistemi multicomponente, tutti i fattori sopracitati possono coinvolgere diverse parti, compromettendo l'intero sistema in maniera differente. Conseguentemente, possono verificarsi differenti tipi di danneggiamento, e.g. la rottura della rete, la deformazione dei montanti, lo sfilamento degli ancoraggi. Questi danni possono, a loro volta, compromettere significativamente le capacità prestazionali dell'intero sistema e quindi la sua funzionalità. Risulta quindi necessario prevedere una campagna periodica di ispezione, volta alla valutazione del livello di conservazione di queste opere e al grado di manutenzione richiesto. Questo aspetto risulta cruciale nella prospettiva di definire per le amministrazioni pubbliche, solitamente proprietarie delle opere, una scala di priorità degli interventi di manutenzione, in riferimento al rischio di caduta massi (Gottardi *et al.*, 2011; Gorlato *et al.*, 2012; Mignelli *et al.*, 2014; Howald *et al.*, 2017; Marchelli & De Biagi, 2019; Marchelli *et al.*, 2019b; Scavia *et al.*, 2020).

Sulla base dei risultati di studi passati riportati in letteratura e di una fitta campagna osservazionale in situ effettuata dall'Autore, sono stati dapprima identificati e classificati i diversi tipi di danno, suddivisi in differenti gruppi sulla base della loro origine:

- dovuti al contesto circostante (i.e. in relazione all'interazione con la vegetazione, alla variazione della morfologia del sito in cui questi sistemi sono installati);
- errori di progettazione, posizionamento sul versante e installazione;
- dovuti all'impatto dei blocchi (nell'ipotesi che dopo l'impatto non venga eseguita nessuna azione manutentiva o di ripristino);

- dovuti ad effetti di invecchiamento, agli agenti atmosferici, all'usura e alla corrosione (nell'ipotesi che non venga eseguita nessuna azione manutentiva nel tempo);
- procedure manutentive non corrette.

Assumendo come ipotesi di partenza che all'inizio della vita utile del sistema, questo abbia completa efficienza, ossia considerando assenti eventuali problemi connessi con la progettazione, posizionamento e installazione, che però incidono ampiamente sull'efficacia del sistema (Dimasi *et al.*, 2015), lo scopo del presente lavoro è quello di fornire una procedura speditiva codificata per la valutazione dello stato di conservazione di queste strutture. Proprio a causa del gran numero di differenti tecnologie presenti sul mercato, la procedura proposta mira ad essere di validità generale, con un buon compromesso tra costi e tempi per l'ispezione e l'accuratezza del metodo. Il metodo richiede infatti campagne di indagine periodiche ma non un sistema di monitoraggio in continuo. Queste indagini ispettive devono essere eseguite da tecnici e personale opportunamente istruito e forniscono un risultato semi-qualitativo in termini di estensione del danno e del grado di conservazione dell'intero sistema. Il presente lavoro si basa su un'analisi multimetrica già proposta per le reti in aderenza (Marchelli *et al.*, 2019a), e qui personalizzato per le barriere paramassi a rete.

2. Efficienza delle barriere paramassi nel tempo

Come espresso nell'introduzione, le barriere paramassi a rete costituiscono un sistema ampiamente impiegato per la protezione

da caduta massi di infrastrutture e borgate. Il loro utilizzo a livello mondiale unitamente allo sviluppo di nuovi materiali e modelli di calcolo ha portato alla progettazione di nuove e sempre differenti tecnologie per la realizzazione di queste opere. Allo scopo di studiare e caratterizzare in maniera univoca il comportamento resistente di questi sistemi è stato sviluppato e codificato in Europa un criterio per la valutazione e la conseguente immissione sul mercato, funzione delle caratteristiche prestazionali fondamentali (ETAG 027, 2008; EAD 340059-00-0106, 2018). Unitamente anche la modalità di progettazione delle barriere paramassi è di tipo prestazionale, con particolare riferimento alla capacità di assorbimento energetica, all'altezza e alla deformazione (UNI 11211-4, 2018; ONR 24810, 2017). L'attuale pratica progettuale consiste infatti, sulla base dei risultati delle analisi di propagazione, nella scelta di un prodotto commerciale idoneo, ossia per il quale sia verificato che l'energia e l'altezza del blocco impattante siano inferiori alla capacità nominale della barriera, sia in termini di energia che di altezza. Pertanto, i criteri progettuali e commerciali di tipo prestazionale presentano una caratteristica di generale validità, che non entra nella specificità dei componenti del prodotto stesso, inteso come kit.

Imitando questo approccio anche la valutazione dell'efficienza nel tempo deve necessariamente essere univoca e comprendere la grande variabilità dei prodotti esistenti. Tuttavia, occorre tenere presente che come ogni singolo componente può influire significativamente sulla risposta del sistema, così ogni danneggiamento anche localizzato può influire sull'efficienza ed efficacia globale dell'opera. Punto di partenza del metodo proposto è stata quindi la definizione dei componenti essenziali che costituiscono una barriera

paramassi a rete. Sono stati studiati tutti i possibili danni di ogni componente, considerando diversi aspetti: l'invecchiamento, la corrosione, l'usura, gli agenti atmosferici, l'interazione con i detriti, la vegetazione, gli animali e le persone, gli impatti. Infine, è stata valutata l'influenza dei danni di ogni componente sull'efficienza globale del sistema. Sulla base di queste informazioni è stato sviluppato un metodo semi-qualitativo per la valutazione dello stato di conservazione dell'opera, presentato nel Par. 3.

2.1. Elementi principali

Le barriere paramassi a rete sono costituite essenzialmente da una sequenza di moduli funzionali (campate) costituiti da una struttura di intercettazione, due elementi di supporto, elementi di collegamento, e gli ancoraggi a terra (Peila & Ronco, 2009; Volkwein *et al.*, 2011b) (Fig. 1). La struttura di intercettazione è costituita da uno o due livelli di pannelli di rete in acciaio: la rete principale deve resistere all'impatto dei blocchi rocciosi deformandosi plasticamente e trasferire il carico alle strutture di supporto e di collegamento e, conseguentemente, ai loro rispettivi ancoraggi. Spesso si osserva la presenza di uno strato aggiuntivo di rete, definita rete secondaria, con una maglia più fine rispetto alla rete principale, in grado di trattenere i detriti o volumetrie contenute. La struttura di supporto è costituita da montanti metallici con la sola funzione di mantenere in posizione la struttura di intercettazione. A seconda degli spostamenti e rotazioni consentiti alla struttura stessa, il collegamento tra montanti e le loro fondazioni può avvenire con cerniere mono-bi-multi direzionali o incastri, e il numero e tipologia degli elementi di collegamento può variare. La struttura di collegamento comprende tutte le



Figura 1. Esempio di barriera paramassi a rete
Example of net fence.

funi, suddivisibili in longitudinali (superiore, inferiore, intermedie di trasmissione) e di controvento (laterali, di monte, di valle), i dispositivi di giunzione (e.g. grilli, morsetti), ed eventuali dispositivi di dissipazione di energia (freni). La presenza dei freni permette la dissipazione di parte dell'energia cinetica mentre la restante parte viene trasferita alla struttura di fondazione. Generalmente il sistema di ancoraggio al terreno è realizzato con cavi o barre non presollecitati cementati nel terreno.

Come precedentemente espo-

sto è possibile trovare una grande varietà di tecnologie per ciascuna di queste parti principali. La rete principale può prevedere una maglia ad anelli (a sua volta realizzati con fili semplicemente avvolti e/o intrecciati o con una fune spiroidale), a omega, esagonale o romboidale (a filo singolo o multiplo), o a pannelli di fune (Fig. 2). I montanti, realizzati con profilati metallici, possono essere tubolari, con profili HEA o IPE. Le funi sono realizzate generalmente in acciaio zincato ma il loro numero e posizionamento nel sistema varia da soluzione a so-

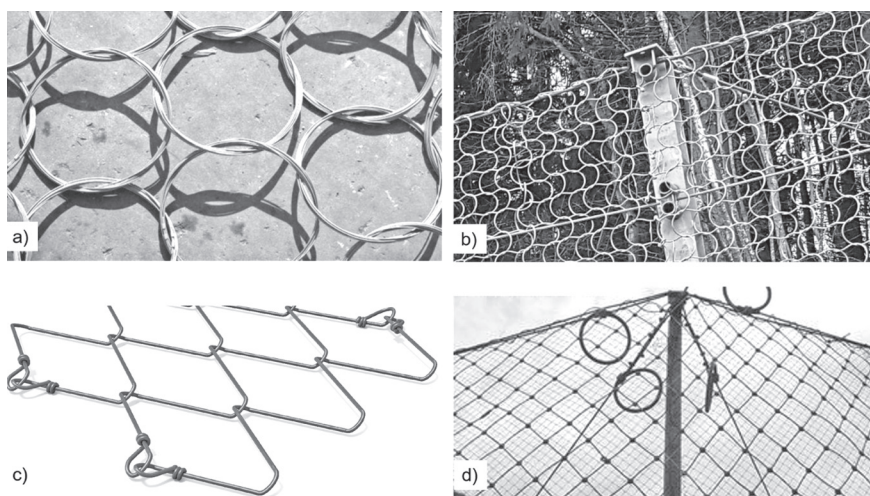


Figura 2. Differenti tipologie di rete principale: a) rete ad anelli (www.maccafferri.com), b) rete a omega (www.trumer.eu), c) rete romboidale (www.geobrugg.com), d) rete a pannelli di fune (www.heslymetalmesh.com).

Different types of principal mesh: a) ring net (www.maccafferri.com), b) omega net (www.trumer.eu), c) rhomboidal net (www.geobrugg.com), d) wire cable net (www.heslymetalmesh.com).

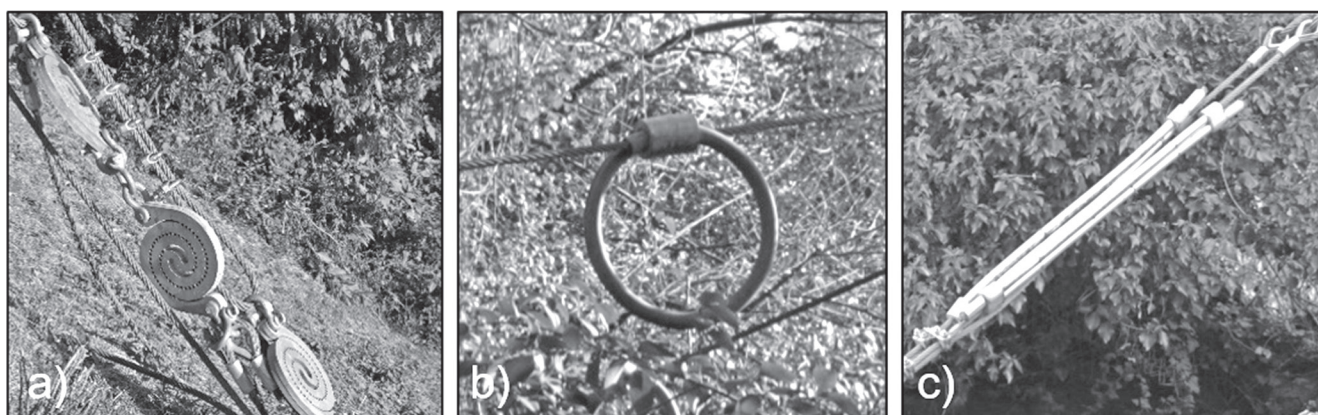


Figura 3. Differenti tipologie di dispositivi di dissipazione dell'energia: a) a deformazione materiale, b) misto a deformazione materiale e attrito, c) misto a deformazione materiale e attrito.

Different types of energy dissipation devices: a) by plastic deformation, b) by mixed friction/plastic deformation, c) by mixed friction/plastic deformation.

luzione. A titolo esemplificativo il numero di funi longitudinali varia a seconda della capacità di assorbimento energetico e deformabilità richiesta all'insieme. Anche gli elementi di connessione o giunzione, quali grilli e morsetti, possono presentare tecnologie differenti. Infine, molto varie sono le tipologie di freni che si possono riscontrare: l'azione frenante può svilupparsi per solo attrito, per deformazione plastica, per entrambi, o per rottura parziale (Castanon-Jano *et al.*, 2017) (Fig. 3). Occorre infine ricordare che non tutti questi elementi sono presenti in ogni prodotto.

Come già precedentemente esplicitato, per cercare di mantenere un carattere di generale validità del metodo proposto, indipendentemente dalle variabili costruttive, sono stati individuati i componenti principali di cui una barriera paramassi a rete può essere costituita, raggruppando all'interno di ciascun componente tutti gli elementi che lo costituiscono (Tab. 1).

2.2. Danneggiamenti degli elementi costituenti

A seguito di un completo studio della letteratura esistente (Volta, 2011; Bertrand *et al.*, 2012; Gentilini *et al.*, 2013; Thoeni *et al.*, 2013;

Dimasi *et al.*, 2015; Luciani *et al.*, 2016; Castanon-Jano *et al.*, 2018; Lecce, 2018; Xu *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2020) e un'approfondita campagna d'indagine effettuata dall'Autore, sono stati identificati tutti i possibili scenari critici o danneggiamenti che possono verificarsi sui componenti principali costituenti il sistema barriera pa-

ramassi. A titolo di esempio si è osservato come per quanto riguarda il sistema di intercettazione, l'accumulo di detriti o la presenza di un blocco incastrato possa causare sollecitazioni non previste e, quindi, la limitazione delle capacità deformative e dissipative in caso di urti successivi, o, snervamento dell'acciaio costituente la maglia, o

Tabella 1. Componenti principali delle barriere paramassi a rete.

Principal components of the net fences.

Componente principale	Elementi costituenti il componente principale
Rete principale	Rete ed elementi di connessione tra i pannelli di rete
Rete secondaria	Rete ed elementi di connessione tra i pannelli di rete
Montanti	Montanti, relative fondazioni e elementi di connessione tra i montanti e la rete
Fune longitudinali superiori	Fune, relativi ancoraggi, elementi di giunzione delle funi stesse ed elementi di connessione con la rete e i montanti, eventuali sistemi di dissipazione energetica
Funi longitudinali inferiori	Fune, relativi ancoraggi, elementi di giunzione delle funi stesse ed elementi di connessione con la rete e i montanti, eventuali sistemi di dissipazione energetica
Funi di controvento laterale	Fune, relativi ancoraggi, elementi di giunzione delle funi stesse ed elementi di connessione con i montanti, eventuali sistemi di dissipazione energetica
Funi di controvento di monte	Fune, relativi ancoraggi, elementi di giunzione delle funi stesse ed elementi di connessione con i montanti, eventuali sistemi di dissipazione energetica
Funi di controvento di valle	Fune, relativi ancoraggi, elementi di giunzione delle funi stesse ed elementi di connessione con i montanti, eventuali sistemi di dissipazione energetica
Altre funi (verticali, di trasmissione, etc)	Fune, relativi ancoraggi, elementi di giunzione delle funi stesse ed elementi di connessione con la rete e i montanti, eventuali sistemi di dissipazione energetica

la parziale lacerazione della stessa. Blocchi di grande dimensione non rimossi possono inoltre punzonare la rete portandola perfino a rottura. Similmente la presenza di interazione con la vegetazione può causare sollecitazioni non previste e, in presenza di ristagni d'acqua, favorire la corrosione della rete stessa. Quest'ultimo fenomeno è ancora più evidente in particolari condizioni ambientali, per esem-

pio in presenza di aria salmastra. L'umidità può favorire la crescita di funghi che possono modificare l'ambiente chimico. Essendo un sistema caratterizzato da parti essenzialmente metalliche, i fenomeni ossidativi e corrosivi possono interessare tutti i componenti della barriera stessa, riducendo la sezione resistente delle funi, dei profilati metallici, e degli elementi di connessione. Infiltrazioni di acqua

o l'umidità possono inoltre influire sull'adesione degli ancoraggi nel terreno, con eventuale sfilamento degli stessi. Urti o interazione con animali o persone possono provocare la rottura di alcuni elementi o, nel caso delle connessioni, una riduzione della coppia di serraggio. La Tabella 2, nella seconda colonna, riporta tutti potenziali danneggiamenti riscontrabili per ogni singolo componente.

Tabella 2. Potenziali danneggiamenti e classe di importanza per ciascun elemento dei componenti principali della barriera paramassi.
Potential damages and class of importance for each element of the principal components of the net fence.

Componente	Potenziale danneggiamento	Classe di importanza
Rete principale	Presenza di vuoti al piede della barriera	C3
	Presenza di specie vegetali ad alto fusto o cespugli che limitino la capacità deformativa della rete	C3
	Presenza di detriti nella rete	C2
	Presenza di sterpaglie, specie vegetali arbustive e/o rampicanti nella rete	C1
	Lacerazioni della rete	C3
	Deformazioni	C2
	Danneggiamento\corrosione\mancanza di elementi di giunzione tra i pannelli di rete	C3
	Rottura giunzioni rete-funi	C3
	Presenza di zone arrugginite e/o danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo	C1
Rete secondaria	Presenza di strappi, deformazioni e/o perforazioni	C2
	Presenza di zone arrugginite e/o danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo	C1
	Presenza di specie vegetali arbustive e/o rampicanti	C1
Montanti	Presenza di zone arrugginite e/o danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo	C1
	Presenza di specie vegetali arbustive e/o rampicanti	C1
	Danneggiamento della cerniera di base	C3
	Deformazione importante e/o rottura del montante	C3
	Ancoraggio dei montanti: variazione della geometria originaria di eventuali chiodi e/o barre (elementi piegati o deformati in modo permanente, fratturati o estratti)	C2
Funi longitudinali superiori	Rotture anche parziali con importanti lesioni dei fili costituenti	C3
	Fune lasca o tesa in modo anomalo (anche una sola)	C2
	Danneggiamento della connessione fune-testa del montante o distacco dagli elementi di ritenuta di testa	C3
	Ammaloramento/danneggiamento/distacco/assenza degli ancoraggi o degli elementi di giunzione tra fune e ancoraggio a terra	C3
	Presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo della fune	C1
	Freni: presenza di specie vegetali/ detriti nell'area di scorrimento dei freni	C2
	Freni: deformazioni permanenti o scorrimenti	C3
	Freni: presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo	C1
Funi longitudinali inferiori	Rotture anche parziali con importanti lesioni dei fili costituenti	C3
	Fune lasca o tesa in modo anomalo (anche una sola)	C2
	Danneggiamento della connessione fune-piede del montante o distacco dagli elementi di ritenuta di piede	C3
	Ammaloramento/danneggiamento/distacco/assenza degli ancoraggi o degli elementi di giunzione tra fune e ancoraggio a terra	C3
	Presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo della fune	C1
	Freni: presenza di specie vegetali/ detriti nell'area di scorrimento dei freni	C2
	Freni: deformazioni permanenti o scorrimenti	C3
	Freni: presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo	C1

continua

segue tab. 2

Componente	Potenziale danneggiamento	Classe di importanza
Funi di controvento laterale	Rotture anche parziali con importanti lesioni dei fili costituenti	C3
	Fune lasca o tesa in modo anomalo (anche una sola)	C2
	Presenza di rotture della testa dell'ancoraggio, sfilamenti/ deformazioni permanenti/ rotture dell'ancoraggio	C3
	Presenza di ammaloramento/ danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo della testa dell'ancoraggio, danneggiamento/corrosione/assenza degli elementi di giunzione fune-ancoraggio	C2
	Presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo della fune	C1
	Freni: presenza di specie vegetali/ detriti nell'area di scorrimento dei freni	C2
	Freni: deformazioni permanenti o scorrimenti	C3
	Freni: presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo	C1
Funi di controvento di monte	Rotture anche parziali con importanti lesioni dei fili costituenti	C3
	Fune lasca o tesa in modo anomalo (anche una sola)	C2
	Presenza di rotture della testa dell'ancoraggio, sfilamenti/ deformazioni permanenti/ rotture dell'ancoraggio	C3
	Presenza di ammaloramento/ danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo della testa dell'ancoraggio, danneggiamento/corrosione/assenza degli elementi di giunzione fune-ancoraggio	C3
	Presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo della fune	C1
	Freni: presenza di specie vegetali/ detriti nell'area di scorrimento dei freni	C2
	Freni: deformazioni permanenti o scorrimenti	C3
	Freni: presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo	C1
Funi di controvento di valle	Rotture anche parziali con importanti lesioni dei fili costituenti	C3
	Fune lasca o tesa in modo anomalo (anche una sola)	C2
	Presenza di rotture della testa dell'ancoraggio, sfilamenti/ deformazioni permanenti/ rotture dell'ancoraggio	C3
	Presenza di ammaloramento/ danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo della testa dell'ancoraggio, danneggiamento/corrosione/assenza degli elementi di giunzione fune-ancoraggio	C1
	Presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo della fune	C1
	Freni: presenza di specie vegetali/ detriti nell'area di scorrimento dei freni	C2
	Freni: deformazioni permanenti o scorrimenti	C3
	Freni: presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo	C1
Altre funi (e.g. di trasmissione, verticali)	Rotture anche parziali con importanti lesioni dei fili costituenti	C3
	Fune lasca o tesa in modo anomalo (anche una sola)	C2
	Presenza di rotture/sfilamenti/ deformazioni permanenti/ammaloramento/corrosione dell'ancoraggio o della testa o danneggiamento/corrosione/assenza degli elementi di giunzione fune-ancoraggio	C1
	Presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo della fune	C1
	Freni: presenza di specie vegetali/ detriti nell'area di scorrimento dei freni	C2
	Freni: deformazioni permanenti o scorrimenti	C3
	Freni: presenza di zone arrugginite/danneggiamento significativo del rivestimento anticorrosivo	C1

2.3. Effetti del danneggiamento dei componenti sul sistema

I possibili danneggiamenti locali identificati nel Par. 2.2 influenzano l'efficienza dell'intero sistema

in maniera differente, a seconda sia dell'elemento danneggiato che del tipo di danno. I componenti identificati nella Tabella 1 hanno infatti un ruolo differente nella funzionalità del sistema stesso e, conseguentemente, il loro danneg-

giamento o la loro assenza (se non prevista all'origine) compromette l'efficienza e, talvolta, l'efficacia globale in maniera differente. Conseguentemente, l'identificazione di una gerarchia tra i possibili danneggiamenti su ciascun elemento

di ogni componente principale e lo studio di come il danno possa propagarsi e influire sulla funzionalità dell'insieme risultano fondamentali nella procedura di valutazione del grado di conservazione dell'opera.

Per lo sviluppo del metodo proposto, a seguito presentato, l'Autore, sulla base di un'accurata ed estesa analisi osservazionale in campo, ha associato ad ogni potenziale danneggiamento un livello d'importanza, ossia un peso, espresso mediante una classe C , funzione dell'influenza che questo può avere sulla funzionalità del sistema. Sono state individuate 3 classi di importanza C : $C1$ (poco importante), $C2$ (mediamente importante), $C3$ (molto importante). La terza colonna di Tabella 2 riporta le classi attribuite a ciascun possibile danneggiamento.

3. Metodologia

In relazione a quanto espresso precedentemente la metodologia per la valutazione dello stato di conservazione del sistema si basa su due aspetti fondamentali: (i) la valutazione dello stato di danno d (dal rilievo in situ effettuata dall'operatore) per ciascuno degli n potenziali danneggiamenti su ogni elemento dei componenti principali, (ii) la valutazione dell'importanza C che i diversi possibili danneggiamenti sui differenti elementi rivestono sull'integrità dell'opera.

A partire da questi dati, è possibile fornire una stima dello stato di conservazione dell'opera. Partendo dall'ipotesi di iniziale completa efficacia ed efficienza del sistema, ossia dall'ipotesi di corrette scelte progettuali, sia in merito alla tipologia di opera che al suo dimensionamento, e di installazione, lo stato di conservazione può decrementare l'efficienza dell'opera fino a renderla non solo inefficiente

ma anche inefficace comportando quindi la perdita della sua funzionalità.

La valutazione dello stato di conservazione è effettuato mediante l'applicazione di un algoritmo basato su un sistema multi-matriciale già adottato per le reti in aderenza (Marchelli *et al.*, 2019a). Ad ogni n -esimo potenziale danno l'operatore, associa uno stato di danno d , a scelta fra: $d0$ (nessun danno), $d1$ (danno moderato), $d2$ (danno intenso).

L'adozione di una classe di importanza, benchè scelta sulla base dell'esperienza dell'Autore, permette quindi di limitare la soggettività intrinseca nelle operazioni di rilievo, in quanto l'associazione dello stato di danno è funzione della sensibilità dell'operatore che esegue il rilievo. Risulta pertanto necessario che la scheda sia compilata da operatori specializzati nel settore o adeguatamente formati. A valle dell'operazione di rilievo lo stato di conservazione viene identificato avvalendosi di un doppio sistema matriciale:

- (i) attraverso una matrice 3×3 (Tab. 3) sono individuati dei punteggi P_i da associare a ciascun potenziale danneggiamento in funzione della sua classe di importanza C e dal livello di danno d . Le colonne individuano la classe di importanza associata alla i -esimo potenziale danno, mentre le righe il livello di danno attribuito. Questo permette

di ottenere un punteggio percentuale complessivo dell'opera, in accordo con la seguente formula:

$$P_{TOT} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_{max}}, \quad (1)$$

dove $P_{max} = 5n_{C3} + 3n_{C2} + 2n_{C1}$, in cui n_{C3} , n_{C2} , n_{C1} sono il numero dei potenziali danni aventi classe d'importanza $C3$, $C2$, $C1$, rispettivamente. Questo punteggio fornisce un'indicazione qualitativa del numero di danneggiamenti: maggiore è il punteggio, maggiore sarà la probabilità che più elementi dell'opera siano in stato di degrado. Occorre tener presente che qualora alcuni elementi dei componenti principali non siano previsti e quindi non presenti nel sistema nella sua conformazione iniziale (e.g. altre funi), questi sono esclusi per la valutazione di P_{max} , che può quindi variare da sistema a sistema, consentendo però il carattere di generale validità del metodo.

- (ii) mediante una seconda matrice 3×3 si perviene ad un livello di conservazione A da associare a ciascuno degli n potenziali danni in funzione della sua classe di importanza C e dal livello di danno d (Tab. 4): $A0$ (nessun intervento richiesto), $A1$ (necessita intervento, perdita parziale di funzionalità), $A2$ (necessita intervento im-

Tabella 3. matrice di associazione dei punteggi per la definizione dello stato di conservazione dell'opera in funzione del livello di danno e della classe d'importanza di ciascun potenziale danno.

Table of the scores for the definition of the degree of conservation, depending on the level of damage and the class of importance.

Livello di danno \ Classe di importanza	C1	C2	C3
	$d0$	$P_i = 0$	$P_i = 0$
$d1$	$P_i = 1$	$P_i = 2$	$P_i = 3$
$d2$	$P_i = 2$	$P_i = 3$	$P_i = 5$

Tabella 4. Matrice di associazione del livello di conservazione A in funzione del livello di danno e della classe d'importanza di ciascun potenziale danno.

Table of the scores for the definition of the degree of conservation, depending on the level of damage and the class of importance.

Livello di danno	Classe di importanza	C1	C2	C3
	d0		A0	A0
d1		A0	A0	A1
d2		A0	A1	A2

mediato, perdita totale di funzionalità. Possibile necessità di sostituzione.). Incrociando la classe corrispondente e il livello di danno dato dall'operatore, è associato all'opera uno

stato di conservazione A_{TOT} , pari al peggiore livello di conservazione ottenuto considerando gli n potenziali danni:

$$A_{TOT} = peggiore(A)_{1...n} \quad (2)$$

Mentre quindi l'indicazione del punteggio consente di avere un'idea qualitativa sull'estensione dei danni (Tab. 5), lo stato di conservazione informa sul grado di funzionalità dell'opera in quel momento e sulla necessità di intervento. Ne consegue che, se anche si verifica un solo danneggiamento ma grave e di classe di importanza C3, l'intera funzionalità dell'opera è compromessa (stato di conservazione A3) anche se l'estensione del danno risulta bassa.

Tabella 5. Estensione del danno in funzione del punteggio percentuale complessivo dell'opera P_{TOT} .

Damage extent depending on the global score of the system P_{TOT} .

P_{TOT} (%)		Estensione del danno
0	10	Bassa
11	25	Moderata
26	50	Media
51	75	Medio-alta
76	100	Alta

4. Caso studio

La procedura di valutazione dello stato di conservazione qui proposta è stata testata in diversi siti situati nelle Alpi italiane nord occidentali e centrali. La campagna è servita sia per verificare l'influenza dei singoli danneggiamenti sul funzionamento complessivo dell'opera di mitigazione del rischio da caduta massi, sia per testare le potenzialità dell'approccio multimetricale, al fine di valutare se la procedura proposta fosse in grado di minimizzare la soggettività intrinseca nelle operazioni di rilievo. I siti investigati sono situati ad un'altitudine compresa tra i 200 e i 2000 m s.l.m.

Anche in zone limitrofe è stata osservata una grande variabilità delle soluzioni tecnologiche adottate. Sono emerse inoltre differenti realtà relativamente ai livelli di danno. A titolo di esempio sono illustrati 4 casi studio relativi alle Alpi Centrali, localizzati a quota tra 250 e 350 m s.l.m.

Nell'esempio 1 (Fig. 4) si osserva come la barriera paramassi, realizzata con una rete principale



Figura 4. Barriera paramassi a rete di cui all'esempio 1.
Net fence of the example 1.

ad anelli e una rete secondaria a maglia esagonale, con capacità di assorbimento energetico di progetto pari a 3000 kJ, sia in ottimo stato di conservazione: non sono stati riscontrati danneggiamenti nei componenti dell'opera stessa e, conseguentemente nessuna azione manutentiva è richiesta. La Figura 5 (esempio 2) mostra una barriera paramassi realizzata con un prodotto simile a quello dell'esempio 1. Tuttavia la presenza di una fitta vegetazione interagente con la rete può limitarne la capacità deformativa. Si osserva inoltre la presenza di un piccolo varco ai piedi della barriera stessa, che potrebbe far transitare i blocchi al di sotto della stessa. I restanti componenti dell'opera non presentano danneggiamenti. In questo secondo caso pertanto il livello di conservazione risulta A1, ossia necessita un intervento manutentivo, ma il punteggio globale P_{TOT} risulta inferiore a 10%, in quanto il danneggiamento è contenuto: la rimozione della

vegetazione associata ad un'operazione di chiusura dei varchi al piede riporterebbero l'opera ad una condizione di piena funzionalità. I punteggi e i livelli di conservazione ottenuti ben rispecchiano la realtà di quanto osservato.

La Figura 6 (esempio 3) riporta il caso di una barriera paramassi realizzata con una rete principale a pannelli di fune ed una rete secondaria a maglia esagonale, con funi verticali e diagonali addizionali presenti in ciascuna campata. La capacità di assorbimento energetico nominale è di 750 kJ. In questo esempio si osserva come siano presenti detriti e blocchi nella rete, nonché sterpaglie e specie vegetali interagenti con la stessa e con tutti i componenti della barriera. La rete principale manifesta deformazioni e spanciamenti, senza essere però lacerata, differentemente dalla rete secondaria che presenta lacerazioni in più punti. Gli ancoraggi di alcuni montanti presentano difetti di natura geometrica,

i.e. elementi piegati che non consentono il corretto trasferimento dei carichi, osservabile anche nelle fessure presenti nella trave di ripartizione di base. Dall'applicazione del metodo proposto livello di conservazione risulta A2 ma il punteggio globale P_{TOT} è inferiore al 50% in quanto la struttura di collegamento non risulta danneggiata. Un'azione manutentiva mirata alla rimozione della vegetazione e dei blocchi/detriti, la sostituzione dei pannelli deformati e la regolarizzazione delle fondazioni di alcuni montanti porterebbero al ripristino della funzionalità dell'opera. Infine Figura 7 (esempio 4) mostra una barriera paramassi realizzata negli anni '80, una rete principale ad anelli del tipo parasiluri, montanti tubolari dotati di una cerniera multidirezionale, e presenza di controventi sia laterali che di valle e di monte, unitamente a funi longitudinali addizionali. I freni presenti lavorano per rottura materiale e per attrito, con una



Figura 5. Barriera paramassi a rete di cui all'esempio 2.
Net fence of the example 2.

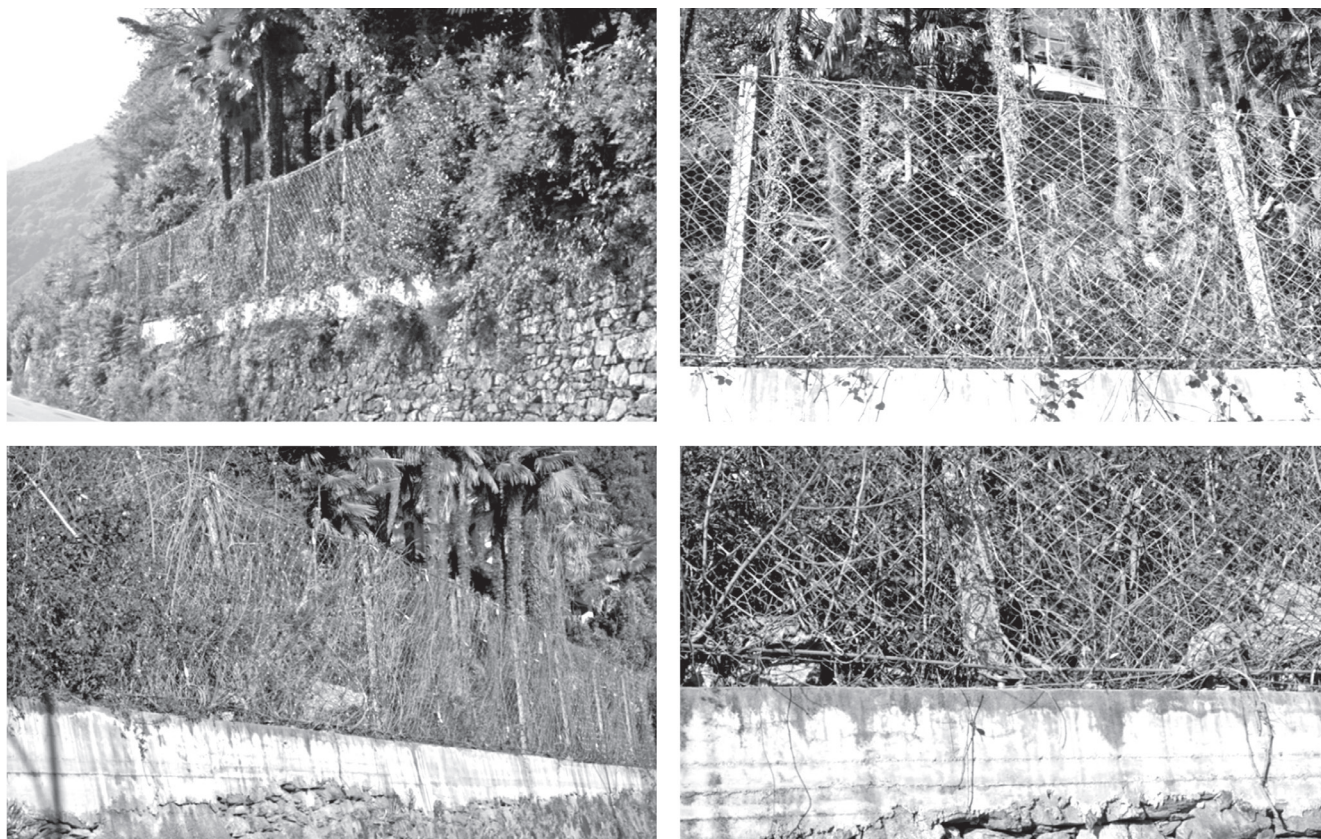


Figura 6. Barriera paramassi a rete di cui all'esempio 3.
Net fence of the example 3.

capacità di assorbimento energetico del prodotto pari a 2000 kJ. In questo caso si possono osservare numerosi danneggiamenti, dovuti all'interazione con la vegetazione e alla presenza di detriti, quali spanciamenti e lacerazioni sia nella rete primaria che nella secondaria. Molti elementi di giunzione risultano assenti, sia nella rete che nelle funi. Alcuni montanti mostrano un danneggiamento significativo della cerniera di base, nonché una

variazione della geometria iniziale di installazione. Molte funi risultano lasche o tese in modo anomalo. Anche in questo caso il livello di conservazione risulta A2 ma il punteggio globale P_{TOT} è superiore al 75%. In questo caso la rimozione e la sostituzione del prodotto si mostra essere la soluzione più conveniente in termini di tempi e costi, in quanto nessun intervento manutentivo riuscirebbe a ripristinare lo stato di piena funzionalità

dell'opera stessa. Anche in questi due esempi i punteggi e i livelli di conservazione ottenuti sembrano aderire a quanto osservato.

In tutti gli esempi proposti quindi la situazione osservata è ben rappresentata dai risultati della procedura, che evidenzia come alcuni sistemi (esempio 1) non necessitino interventi, altri interventi più o meno localizzati (esempio 2 e 3), mentre in altri casi l'opera risulti totalmente inefficace (esempio 4).



Figura 7. Barriera paramassi a rete di cui all'esempio 4.
Net fence of the example 4.

5. Conclusioni e futuri sviluppi

Le barriere paramassi sono tra i sistemi di protezione per la caduta massi maggiormente impiegati al fine di mitigare il rischio. Tuttavia, l'invecchiamento, l'usura o il danneggiamento nel tempo di anche un singolo componente potrebbe inficiare anche completamente la loro funzionalità. Data la loro importanza un monitoraggio continuo costituirebbe un efficace metodo per valutare il mantenimento della loro efficienza nel tempo. Purtroppo, questo sistema è raramente adottato, in quanto richiede tempi e costi talvolta non gestibili, comportando così mancanza di dati quantitativi utili per la pianificazione dei lavori di manutenzione.

Di conseguenza, la procedura di valutazione speditiva qui proposta mira a fornire una stima qualitativa dell'efficienza di un sistema di barriere paramassi a rete, in termini di livello di conservazione ed estensione del danno, e, conseguentemente, a fornire un utile supporto per la definizione una lista di priorità per i lavori di intervento. La presenza sul mercato di differenti tecnologie e prodotti ha portato l'Autore a cercare una procedura di generale validità. Il metodo presentato si basa su un'analisi multimetrica, che prevede una procedura di ispezione codificata. L'idea cardine è che il deterioramento di diversi elementi minori o il danneggiamento di un componente fondamentale possano compromettere l'efficienza dell'intero sistema. Ciò comporta che la valutazione finale dipenda sia dal componente danneggiato/deteriorato che dall'entità del danno stesso. La procedura parte dall'individuazione da parte dell'Autore di una lista di possibili danneggiamenti, che il personale tecnico deve valutare durante la campagna di rilievo. Ad ogni possibile danneggiamento sono associati un livello di danno,

assegnato dal tecnico rilevatore, e una classe di importanza, assegnata dall'Autore per limitare la soggettività dell'approccio. Mediante un doppio sistema matriciale, in funzione dei livelli di danno e della classe d'importanza si ottiene un punteggio globale e un livello di conservazione alla struttura stessa, indicando se sono necessari lavori di manutenzione urgenti.

È stata effettuata una campagna in sito estesa alle Alpi nord-occidentali e centrali per validare le classi di importanza proposte assegnate ad ogni problematica e, nonostante la vasta gamma di tecnologie diverse osservate, emerge un buon accordo tra le condizioni osservate del sistema e i risultati ottenuti. La doppia informazione ottenuta dal punteggio globale e dal livello globale di conservazione ha fornito una soluzione convincente per comprendere sia la gravità che l'estensione dell'eventuale intervento di manutenzione richiesto.

Tuttavia occorre ricordare come la fase transitoria tra protezione totale e sicurezza parziale è una delle più sconosciute e necessita ulteriori indagini e procedure per essere meglio simulata e gestita. Una campagna di analisi numeriche e test su scala reale sulla degradazione della barriera potrebbe essere utile, così come le analisi basate sull'affidabilità.

Bibliografia

Bertrand, D., Trad, A., Limam, A. e Silvani, C., 2012. *Full-scale dynamic analysis of an innovative rockfall fence under impact using the discrete element method: From the local scale to the structure scale*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 45, pp. 885-900.

Buzzi, O., Spadari, M., Giacomini, A., Fityus, S. e Sloan, S.W., 2013. *Experimental testing of rockfall barriers designed for the low range of impact*

energy. Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 46, pp. 701-712.

Coulibaly, J.B., Chanut, M.A., Lambert, S. e Nicot, F., 2019. *Toward a Generic Computational Approach for Flexible Rockfall Barrier Modeling*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 52, pp. 4475-4496.

Castanon-Jano, L., Blanco-Fernandez, E., Castro-Fresno, D. e Ballester-Muñoz, F., 2017. *Energy Dissipating Devices in Falling Rock Protection Barriers*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 50, pp. 603-619.

Castanon-Jano, L., Blanco-Fernandez, E., Castro-Fresno, D. e Ferreño, D., 2018. *Use of explicit FEM models for the structural and parametrical analysis of rockfall protection barriers*. Engineering, Structures, Volume 166, pp. 212-226.

D'Agostino, V. e Bertoldi, G., 2014. *On the assessment of the management priority of sediment source areas in a debris-flow catchment*. Earth Surface Processes and Landforms, Volume 39, pp. 656-668.

De Biagi, V., Marchelli, M. e Peila, D., 2020. *Reliability analysis and partial safety factors approach for rockfall protection structures*. Engineering Structures, Volume 213, pp. 110553.

Dimasi, C., Luciani, A., Martinelli, D., Paganone, M. e Peila, D., 2015. *Controllo delle barriere paramassi a rete per la loro gestione e manutenzione*. GEAM Geingegneria Ambientale e Mineraria, Volume 146, pp. 65-73.

Dugelas, L., Coulibaly, J.B., Bourrier, F., Lambert, S., Chanut, M.A., Olmedo, I. e Nicot, F., 2019. *Assessment of the predictive capabilities of discrete element models for flexible rockfall barriers*. International Journal of Impact Engineering, Volume 133, pp. 103-365.

EAD 340059-00-0106, 2018. *EAD 340059-00-0106:2018 Falling Rock Protection Kits*. EOTA: Bruxelles, Belgio.

ETAG 027, 2008. *ETAG 027:2008 Guidelines for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits*. EOTA: Bruxelles, Belgio.

Gao, Z., Al-Budairi, H. e Steel, A., 2018. *Experimental testing of low-energy*

- rockfall catch fence meshes. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Volume 10, pp. 798-804.
- Gentilini, C., Gottardi, G., Govoni, L., Mentani, A. e Ubertini, F., 2013. *Design of falling rock protection barriers using numerical models*. *Engineering Structures*. Volume 50, pp.96-106.
- Giacomini, A. e Govoni, L., 2016. *Numerical Modelling of a Low-Energy Rockfall Barrier: New Insight into the Bullet Effect*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Volume 49, pp. 1247-1262.
- Gorlato, A., Gottardi, G., Govoni, L., Mentani, A., Ranalli, M. e Strada, C., 2012. *The role of falling rock protection barriers in the context of landslide risk analysis and mitigation*. *INTERPRAEVENT 2011*, pp. 699-706.
- Gottardi, G. e Govoni, L., 2010. *Full-scale modelling of falling rock protection barriers*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Volume 43, pp. 261-274.
- Gottardi, G., Govoni, L., Mentani, A., Ranalli, M. e Strada, C., 2011. *The effectiveness of protection systems toward rockfall risk mitigation*. In: *ISGSR 2011*, pp. 157-164.
- Govoni, L., de Miranda, S., Gentilini, C., Gottardi, G. e Ubertini, F., 2011. *Modelling of falling rock protection barriers*, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*. Volume 11, pp. 126-137.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P. e Ghigi, S., 2004. *Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, Central Italy*. *Environmental management*. Volume 34, pp. 191-208.
- Howald, E.P., Abbruzzese, J.M. e Grisanti, C., 2017. *An approach for evaluating the role of protection measures in rockfall hazard zoning based on the Swiss experience*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Volume 17, pp. 1127-1144.
- Lecce, A., 2018. *Studio delle problematiche di caduta massi su una strada ad alta percorrenza e della durabilità delle opere di protezione*. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino.
- Luciani, A., Todaro, C. e Peila, D., 2018. *Maintenance and risk management of rockfall protection net fences through numerical study of damage influence*. *Frattura ed Integrità Strutturale*. Volume 12, pp. 241-250.
- Luciani, A., Peila, D. e Barbero, M., 2016. *Studio numerico dell'influenza dell'ammaloramento delle barriere paramassi a rete*. *GEAM Geoingegneria Ambientale e Mineraria*. Volume 147, pp. 31-38.
- Marchelli, M., De Biagi, V. e Peila, D., 2019a. *A quick-assessment procedure to evaluate the degree of conservation of rockfall drapery meshes*. *Frattura ed Integrità Strutturale*. Volume 47, pp. 437-450.
- Marchelli, M., De Biagi, V., Grange, H. e Peila, D., 2019b. *Applicazione del modello di frammentazione frattale ad un caso reale di caduta massi. Problematrice inerenti la scelta dei parametri di modello*. *GEAM Geoingegneria Ambientale e Mineraria*. Volume 157, pp. 22-32.
- Marchelli, M. e De Biagi, V., 2019. *Optimization methods for the evaluation of the parameters of a rockfall fractal fragmentation model*. *Landslides*. Volume 16, pp. 1385-1396.
- Marchelli, M., De Biagi, V. e Peila, D., 2020. *Reliability-Based Design of Protection Net Fences: Influence of Rockfall Uncertainties through a Statistical Analysis*. *Geosciences*. Volume 10, pp. 280.
- Mignelli, C., Peila, D., Russo, S.L., Ratto, S.M. e Broccolato, M., 2014. *Analysis of rockfall risk on mountainside roads: evaluation of the effect of protection devices*. *Natural Hazards*. Volume 73, pp. 23-35.
- Peila, D. e Ronco, C., 2009. *Technical Note: Design of rockfall net fences and the new ETAG 027 European guideline*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Volume 9, pp. 1291-1298.
- Scavia, C., Barbero, M., Castelli, M., Marchelli, M., Peila, D., Torsello, G. e Vallero, G., 2020. *Evaluating Rockfall Risk: Some Critical Aspects*. *Geosciences*. Volume 10, p. 98.
- Thoeni, K., Lambert, C., Giacomini, A. e Sloan, S.W., 2013. *Discrete modeling of hexagonal wire meshes with a stochastically distorted contact model*. *Computers and Geotechnics*. Volume 49, pp. 158-169.
- UNI 11211-4, 2018. *UNI 11211-4:2018 Opere di difesa dalla caduta massi. Parte 4 : Progetto definitivo ed esecutivo*. Ente Italiano di Normazione, Roma, Italia.
- Vallero, G., De Biagi, V., Barbero, M., Castelli, M. e Napoli, M.L., 2020. *A method to quantitatively assess the vulnerability of masonry structures subjected to rockfalls*. *Natural Hazards*. Volume 103, pp. 1307-1325.
- Ventura, A., De Biagi, V. e Chiaia, B., 2017. *Effects of rockfall on an elastic-plastic member: A novel compliance contact model and dynamic response*. *Engineering Structures*. Volume 148, pp. 126-144.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L.K.A. e Gerber, W., 2011a. *Rockfall characterisation and structural protection – a review*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Volume 11, pp. 2617-2651.
- Volkwein, A., Wendeler, C. e Guasti, G., 2011b. *Design of flexible debris flow barriers*. *Proceedings of the International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, pp. 1093-1100.
- Volta, F., 2011. *Il ruolo delle barriere paramassi nella mitigazione del rischio da frana nella provincia autonoma di Bolzano*. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Bologna.
- Xu, H., Gentilini, C., Yu, Z., Qi, X. e Zhao, S., 2018. *An energy allocation based design approach for flexible rockfall protection barriers*. *Engineering Structures*. Volume 173, pp. 831-852.
- Zhao, L., Yu, Z.X., Liu, Y.P., He, J.W., Chan, S.L., e Zhao, S.C., 2020. *Numerical simulation of responses of flexible rockfall barriers under impact loading at different positions*. *Journal of Constructional Steel Research*. Volume 167, pp. 105953.