



**Politecnico
di Torino**



PIANO INTEGRATO TEMATICO (PITEM) “RISK - RESILIENZA, INFORMAZIONE,
SENSIBILIZZAZIONE E COMUNICAZIONE AI CITTADINI”. PROGETTO RISK-ACT

PROGETTAZIONE DEGLI STENDIMENTI PARALLELI DI BARRIERE PARAMASSI A RETE

(Prodotto della ricerca 6.1 dell'accordo tra Regione Autonoma Valle d'Aosta e Politecnico di Torino di cui al PD n.7355 del 14/12/2020).

ING. MADDALENA MARCHELLI, PHD

PROF. DANIELE PEILA (RESP. SCIENTIFICO)

30 Giugno 2022



r!SK





**Politecnico
di Torino**

Dipartimento di Ingegneria
dell'Ambiente, del Territorio
e delle Infrastrutture



Rockfall
Protection
Engineering
LABORATORY



Sommario

1	INTRODUZIONE	5
2	PREMESSA METODOLOGICA	5
3	DOPPIO STENDIMENTO.....	10
3.1	DESCRIZIONE PASSO-PASSO DEL CALCOLO.....	11
3.2	IPOTESI SEMPLIFICATIVA.....	13
4	BIBLIOGRAFIA	14
	TABELLA DEI SIMBOLI	15



**Politecnico
di Torino**

Dipartimento di Ingegneria
dell'Ambiente, del Territorio
e delle Infrastrutture



Rockfall
Protection
Engineering
LABORATORY

1 INTRODUZIONE

La presente relazione dettaglia le modalità di progettazione di stendimenti paralleli di barriere paramassi a rete, ossia stendimenti di barriere poste su isoipse “circa” parallele e intercettanti le traiettorie di crollo. Le valutazioni sono svolte nell’ipotesi di distacco di blocchi rocciosi dai versanti posti a monte di entrambi gli stendimenti. Nei seguenti paragrafi verrà dettagliata la modalità di progettazione ai fattori parziali di sicurezza, in accordo con gli Eurocodici, il D.M. 17/01/2018 Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” (NTC 2018), e la UNI 11211-4 (2018) “Opere di difesa dalla caduta massi – Parte 4: progetto definitivo ed esecutivo”.

2 PREMESSA METODOLOGICA

Come prima menzionato, per stendimenti paralleli di barriere paramassi si intendono stendimenti di barriere poste su isoipse circa parallele, quindi a diverse quote, ma planimetricamente intercettanti le traiettorie nell’ipotesi di distacco e caduta di blocchi rocciosi dai versanti posti a monte delle stesse.

In tal senso le aree sorgenti di potenziali distacchi sono individuate a monte degli stendimenti stessi. Considerando due stendimenti paralleli, **il caso in cui una sorgente sia collocata tra due stendimenti non ricade in questa categoria** in quanto, per quella sorgente, ci si riconduce alla progettazione di un solo stendimento di barriere.

Come per la progettazione delle opere di mitigazione del rischio, con particolare riferimento a quelle passive, una volta individuato il fenomeno potenzialmente pericoloso, il flowchart operativo parte da un processo di studio ed analisi dello specifico sito, individuando le principali caratteristiche topografiche e geomeccaniche dello stesso. In particolare, i rilievi in situ e nell’intorno devono essere tali da consentire di ottenere, con la maggiore accuratezza possibile, i seguenti dati:

- localizzazione delle aree di potenziale distacco;
- caratterizzazione geometrica e meccanica (e.g. forma, volume, peso specifico) dei blocchi potenzialmente instabili;
- valutazione dei cinematismi di innesco ed eventuale identificazione della loro probabilità di distacco;
- DTM (eventuale DSM) del pendio potenzialmente interessato dal fenomeno a scala adeguata;
- individuazione delle caratteristiche principali del pendio, e.g. tipo di suolo, scabrezza, stato del detrito presente, presenza di vegetazione;
- individuazione di testimoni muti e rilievo dei blocchi eventualmente presenti al piede.

Questi principi relativi all’analisi di rischio del fenomeno di caduta massi su aree antropizzate o su infrastrutture risultano in accordo con l’UNI 11211-1 (2018) “Opere di difesa dalla caduta massi – Parte 1: Termini e definizioni” per cui si prescrive la *“raccolta dei dati storici e dei parametri che influenzano la caduta massi su un versante (condizioni geologiche, litologiche, geomeccaniche, geomorfologiche, vegetazionali) e successive elaborazioni che consentano di perimetrare le aree di distacco, analizzare la propagazione delle traiettorie di caduta [...]”*. Unitamente alle indagini in situ, è infatti fondamentale anche un’analisi degli eventi pregressi, sia dal punto di vista temporale che di magnitudo dell’evento. Le analisi in parete, al piede, e le indagini storiche permettono la definizione sia dei volumi potenzialmente instabili che dei volumi che possono raggiungere i piedi del versante e, quando possibile, anche un tempo di ritorno associato a tali volumetrie. La conoscenza di questi parametri consente la scelta del volume del blocco di progetto V_b per la progettazione delle opere di difesa. In accordo con la norma UNI 11211-1 (2018), per blocco di progetto s’intende il *“volume roccioso di riferimento preso in considerazione per la progettazione delle opere paramassi e nelle simulazioni di caduta massi”*. La UNI 11211-1 definisce il “masso di progetto” come *“il volume roccioso utilizzato per la progettazione delle opere paramassi (barriere o rilevati). Esso è rappresentativo al 95° percentile (o maggiore) dei massi che possono colpire l’opera.”* La definizione del

blocco di progetto risulta quindi essenziale ai fini della quantificazione energetica di impatto e della corretta progettazione delle altezze delle opere di mitigazione.

La conoscenza dei dati sopra descritti consente quindi di definire uno o più scenari con cui condurre le analisi di propagazione, atte ad individuare l'evoluzione del fenomeno. Queste analisi preliminari possono essere condotte con differenti metodologie, tuttavia, qualora si evidenzia la necessità di prevedere interventi di mitigazione del rischio, queste devono essere effettuate mediante modelli numerici fisicamente basati, con particolare riferimento ad approcci di tipo probabilistico, che consentano quindi di studiare non solo i punti di arresto ma anche la dinamica e la cinematica dei blocchi in caduta in tutte le loro possibili traiettorie. Tali analisi si definiscono infatti "traietto grafiche". In particolare velocità e, nota la massa, energia cinetica, altezza di volo in ogni punto della traiettoria sono quindi i parametri di output ottenibili per ogni blocco. Nell'ambito di un'analisi probabilistica, dove i parametri di input (come le caratteristiche topografiche e/o geomeccaniche del terreno, la posizione e i parametri cinematici iniziali di caduta) sono assegnati mediante una distribuzione probabilistica e non con un valore deterministico, per ogni blocco possono verificarsi differenti traiettorie con differenti parametri cinematici. Per ogni punto del pendio interessato dal potenziale passaggio del blocco è possibile quindi individuare una distribuzione delle possibili velocità e altezze di passaggio di un blocco in caduta.

Nell'ipotesi quindi che dalle analisi si evidenzia la necessità di porre interventi di mitigazione del rischio di tipo passivi, e.g. barriere paramassi, l'energia cinetica del blocco (e quindi massa e velocità) e la sua altezza di passaggio rappresentano quindi le azioni in gioco. In fase progettuale, degli interventi, non esistendo una specifica norma cogente, ci si riferisce usualmente al metodo promosso dall'Eurocodice 7 (EN 1997:2004 – Progettazione geotecnica), ossia un metodo semi-probabilistico agli stati limite, per il quale le azioni e le resistenze di progetto sono ottenute moltiplicando o dividendo un fattore parziale di sicurezza ad un valore rappresentativo (ossia caratteristico) della distribuzione di possibili valori di ciascuna grandezza (azione o resistenza). I valori di calcolo delle azioni di interesse, ossia altezza, massa, velocità, o direttamente energia cinetica, del blocco impattante, i.e. h_d, m_d, v_d, E_d rispettivamente, sono ottenuti dal prodotto dei valori caratteristici h_k, m_k, v_k, E_k , per coefficienti parziali di sicurezza $\gamma_h, \gamma_m, \gamma_v, \gamma_E$, rispettivamente. Le UNI 11211-1 (2018) e UNI 11211-4 (2018), standard italiani che, pur non essendo cogenti, sono universalmente riconosciute per la progettazione degli interventi di caduta massi, assumono come valori caratteristici di riferimento i percentili pari al **95%** della distribuzione della grandezza osservata nel punto di installazione dell'opera¹. Si definiscono k_h e k_E i percentili corrispondenti ai valori caratteristici di altezza ed energia, rispettivamente. I valori dei fattori parziali di sicurezza devono essere tali da includere le incertezze del modello e dei dati di input. Come per le azioni, l'approccio progettuale prevede che anche alla capacità dell'opera di intercettare e arrestare il blocco, intese come resistenze, siano applicati coefficienti parziali di sicurezza. Nel caso delle barriere paramassi i termini di resistenza sono relativi alla capacità di assorbimento energetico ed all'altezza di intercettazione, definite anche come prestazioni del prodotto. In particolare, il valore di energia $E_{b,k}$ ottenuto con una prova MEL o SEL, ai sensi dell' EAD 340059 00 0106 (2016), considerato come valore caratteristico, è diviso per il coefficiente parziali di sicurezza $\gamma_{E,b}$, ottenendo un valore di calcolo $E_{b,d}$ mentre all'altezza nominale $h_{b,k}$ è applicato un coefficiente $\gamma_{h,b}$, ottenendo un valore di calcolo $h_{b,d}$. Il pedice \cdot_b indica che la quantità è riferita alla barriera. L'UNI considera il termine $\gamma_{h,b}$ come unitario nell'ipotesi che la misura dell'altezza sia affetta da un'incertezza trascurabile, a fronte della determinazione della capacità di assorbimento energetico mediante procedure codificate che, necessariamente, prevedono forti

¹ A solo titolo informativo lo standard austriaco ONR 24810 (2021) relativo alla caduta massi considera un percentile pari al 99% per quanto concerne l'energia caratteristica, mentre il percentile relativo all'altezza è pari al 95%. Questa norma suggerisce, in presenza di una distribuzione volumetrica di blocchi in prossimità dell'opera da realizzare, di considerare come caratteristico un percentile superiore al 95-simo e variabile in funzione della frequenza dell'evento e della classe di conseguenza dell'opera da proteggere.

assunzioni sulle modalità di impatto. Tabella 1 dettaglia i valori caratteristici e i coefficienti parziali proposti sia dagli standard italiani (UNI 11211-4:2018) che austriaci (ONR 24810:2021)

Ne consegue quindi che, affinché un intervento sia efficiente, occorre che:

$$E_d \leq E_{b,d} \quad (1)$$

$$h_d \leq h_{b,d} \quad (2)$$

Ai fini del soddisfacimento della verifica relativa all'altezza della barriera, come meglio esplicitato nella Tabella 2 riassuntiva, il termine h_d deve prendere in considerazione anche la dimensione caratteristica del blocco di progetto. In breve, in accordo con la norma UNI 11211-4, dal momento che le analisi traiettografiche da cui viene ricavato h_k riportano il valore di altezza corrispondente al baricentro del blocco, è necessario trasformare la quota di transito del baricentro nella quota dell'estremo superiore del blocco, ossia sommare al valore h_d la metà della dimensione caratteristica del blocco t (non inferiore a 50 cm), ossia:

$$h_d + t \leq h_{b,d} \quad (3)$$

Infine, dato che la barriera paramassi a rete è altamente deformabile, un'ulteriore verifica da effettuarsi è quella che impone una distanza minima tra la barriera e l'opera da proteggere D_k pari alla distanza di arresto $D_{b,k}$ misurata nella prova di certificazione al livello energetico MEL cui è applicato un coefficiente parziale di sicurezza γ_D per ottenere il valore di calcolo $D_{b,d}$, ossia che:

$$D_k \geq D_{b,d} \quad (4)$$

Tralasciando i fattori di sicurezza parziali e prendendo come rappresentativi i valori suggeriti dalla UNI 11211-4 (2018), valutando le Eq. (1) e (3), le **prestazioni minime richieste** sono quindi quelle per le quali **$k_{min} \equiv k_h k_E = 95\% \cdot 95\% \approx 90\%$ dei blocchi in caduta simulati** (da ora in poi "simulazioni") **viene intercettato e fermato**. Il valore di k_{min} nella pratica risulta maggiore, in quanto pur non essendo possibile individuare una tendenza generale, è quasi quasi improbabile che nessuno dei blocchi $(1 - k_h)$ non intercettati appartenga ai blocchi $(1 - k_E)$ non intercettati. Possiamo quindi, a favore di sicurezza, assumere un **$k_{min} = 95\%$**

La filosofia progettuale del metodo proposto considera il **doppio stendimento di barriere paramassi come un sistema univoco**. Pertanto occorre che le prestazioni (resistenze) dell'intero sistema siano almeno pari o superiori agli effetti delle azioni. In pratica, **la somma dello stendimento superiore e inferiore dovrebbe intercettare e fermare almeno il 95% dei blocchi in caduta simulati**.

Parametro	UNI 11211 (2018)	ONR 24810 (2021)	
	(ITALIA)	(AUSTRIA)	
$m_k = V_b \cdot \rho g$ ρg = peso specifico del blocco	$V_b \geq 95^\circ$ percentile (della distribuzione dei blocchi che potenzialmente potrebbero impattare l'opera)	Frequenza di accadimento molto alta (≥ 10 eventi/anno)	$V_b = 98^\circ$ percentile
		Frequenza di accadimento alta (≥ 1 eventi/anno e <10)	$V_b = 97^\circ$ percentile
		Frequenza di accadimento bassa (≥ 0.03 eventi/anno e <1)	$V_b = 96^\circ$ percentile

Parametro	UNI 11211 (2018) (ITALIA)	ONR 24810 (2021) (AUSTRIA)				
		<table border="1"> <tr> <td>Frequenza di accadimento rara (< 0.03 eventi/anno)</td> <td>$V_b = 95^\circ$ percentile</td> </tr> <tr> <td>Classe di conseguenza C1 e <1 evento/anno</td> <td>$V_b =$ scelto cautelativamente dal progettista</td> </tr> </table>	Frequenza di accadimento rara (< 0.03 eventi/anno)	$V_b = 95^\circ$ percentile	Classe di conseguenza C1 e <1 evento/anno	$V_b =$ scelto cautelativamente dal progettista
Frequenza di accadimento rara (< 0.03 eventi/anno)	$V_b = 95^\circ$ percentile					
Classe di conseguenza C1 e <1 evento/anno	$V_b =$ scelto cautelativamente dal progettista					
γ_m	$\gamma_m = \gamma_\psi \cdot \gamma_{VolF1}$ <p>$\gamma_\psi = f(\text{accuratezza nella scelta del peso specifico, solitamente } 1)$</p> <p>$\gamma_{VolF1} = f(\text{accuratezza nel rilievo per la determinazione del volume di progetto, variabile da } 1.02 \text{ e } 1.1)$</p>	Nessun coefficiente				
v_k	95° percentile (dalla distribuzione ottenuta dalle analisi traiettografiche)	Non presente				
γ_v	$\gamma_v = \gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp}$ <p>$\gamma_{Tr} = f(\text{affidabilità dei parametri di input dell'analisi traiettografica, variabile da } 1.02 \text{ a } 1.1)$</p> <p>$\gamma_{Dp} = f(\text{accuratezza nella discretizzazione topografica del pendio, variabile da } 1.02 \text{ a } 1.1)$</p>	Non presente				
h_k	95° percentile (dalla distribuzione ottenuta dalle analisi traiettografiche)	95° percentile (dalla distribuzione ottenuta dalle analisi traiettografiche) + 1/2 dimensione massima di V_b				
γ_h	$\gamma_h = \gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp}$ <p>$\gamma_{Tr} = f(\text{affidabilità dei parametri di input dell'analisi traiettografica, variabile da } 1.02 \text{ a } 1.1)$</p> <p>$\gamma_{Dp} = f(\text{accuratezza nella discretizzazione topografica del pendio, variabile da } 1.02 \text{ a } 1.1)$</p>	$f(\text{classe di conseguenza})$, pari a 1.05 se CC1, 1.1 se CC2, e 1.3 se CC3				
E_k	Non presente	99° percentile (dalla distribuzione ottenuta dalle analisi traiettografiche)				
γ_E	Non presente	$f(\text{classe di conseguenza})$, pari a 1 se CC1, 1.05 se CC2, e 1.15 se CC3				
$E_{b,k}$	$f(\text{test codificati EAD 340059 00 0106 (2018)})$ valori MEL o SEL	$f(\text{test codificati EAD 340059 00 0106 (2018)})$ valori MEL				
$\gamma_{E,b}$	$f(\text{valori adottati per } E_b: \text{ se MEL } \gamma_{E,b}=1.2, \text{ se SEL } \gamma_{E,b}=1)$	$f(\text{classe di conseguenza})$, pari a 1 se CC1, 1.05 se CC2, e 1.15 se CC3				

Parametro	UNI 11211 (2018) (ITALIA)	ONR 24810 (2021) (AUSTRIA)
$h_{b,k}$	Altezza nominale	Altezza nominale
$\gamma_{h,b}$	Non presente	f (classe di conseguenza), pari a 1 se CC1, 1.05 se CC2, e 1.10 se CC3
t	$\max(0,5 m; \frac{1}{2}$ dimensione massima del blocco V_b	Inserito in h_k
D_k	Distanza minima tra la barriera e la zona protetta	Distanza minima tra la barriera e la zona protetta
$D_{b,k}$	Elongazione massima misurata durante la prova MEL	Elongazione massima misurata durante la prova MEL
γ_D	1.3	1.2

Tabella 1: parametri caratteristici e fattori parziali di sicurezza

Verifica effettuata	UNI 11211-4 (2018)
Verifica energetica $E_d \leq E_{b,d}$	$1/2 m_k \gamma_m v_k^2 \gamma_v^2 \leq \frac{E_{b,d}}{\gamma_{b,E}}$
Verifica di altezza di intercettazione $h_d \leq h_{b,d}$	$h_k \gamma_h + t \leq h_{b,k}$
Verifica di deformazione $D_k \geq D_{b,d}$	$D_k \geq D_{b,k} \cdot \gamma_D$ con $D_k - D_E \geq 1 m$

Tabella 2: formule di verifica per le barriere paramassi

3 DOPPIO STENDIMENTO

Nel presente paragrafo è descritta la metodologia progettuale per il doppio stendimento di barriere paramassi sviluppata presso il laboratorio RoPE del Politecnico di Torino. In uniformità con gli approcci progettuali previsti negli Eurocodici, unitamente a quanto prescritto nelle NTC 2018 in relazione alle opere civili, l'approccio proposto si basa sull'applicazione dei fattori parziali di sicurezza ai valori caratteristici dei parametri e al confronto tra gli effetti delle azioni di calcolo e le resistenze di calcolo. Il flowchart progettuale inizia, come già discusso nel Par. 2 con l'identificazione e la definizione del problema, individuando e caratterizzando le aree sorgenti e i volumi potenzialmente instabili. Si eseguono poi preliminari analisi di propagazione al fine di verificare la sussistenza del rischio per gli elementi individuati, cui seguono analisi traiettografiche specifiche. Qualora l'utilizzo di un solo stendimento sia impossibile in relazione alle traiettorie dei blocchi o al loro livello energetico, e qualora gli spazi operativi lo consentano, si può ricorrere ad un doppio stendimento.

Come esplicitato nel Par. 2, la metodologia proposta si basa sull'assunzione che il **doppio stendimento sia un sistema unico, per il quale gli effetti delle azioni e delle resistenze devono essere valutate nel loro insieme.**

In questa cornice, quindi, i valori caratteristici delle variabili, i coefficienti parziali (la cui scelta va demandata al progettista in accordo a quanto precedentemente descritto) e, conseguentemente, i valori di calcolo, devono intendersi del sistema doppio stendimento.

Lo stendimento superiore è concepito per intercettare la grande maggioranza dei blocchi, fermandoli o almeno diminuendo la velocità, mentre lo stendimento inferiore dovrebbe fermare la restante frazione di blocchi. Lo stendimento superiore è quindi l'elemento "fusibile" del sistema, mentre lo stendimento inferiore dovrebbe sia intercettare che arrestare i blocchi.

Come prima menzionato, tralasciando i fattori di sicurezza parziali e prendendo come rappresentativi i valori suggeriti dalla UNI 11211-4 (2018), le prestazioni minime richieste da un'opera di mitigazione sono quelle per le quali il k_{min} % dei blocchi in caduta simulati (da ora in poi "simulazioni") è intercettato e fermato. A favore di sicurezza si assume $k_{min} = 95\%$. Considerando il doppio stendimento come un sistema, volendo intercettare e fermare il 95 percento dei blocchi totali che raggiungono il sistema, si scopre che, dato che una percentuale delle simulazioni è arrestata dallo stendimento superiore, le azioni per le quali dovrebbe essere progettato lo stendimento inferiore dovrebbero essere riferite a un percentile inferiore al 95-esimo, i.e. a un q -esimo percentile.

Di seguito la metodologia proposta viene spiegata in una situazione più generale. A partire dall'area sorgente si effettuano le analisi traiettografiche considerando N simulazioni. A seconda delle configurazioni topografiche e geomeccaniche, un certo numero di blocchi si può fermare prima di raggiungere lo stendimento superiore, mentre i rimanenti N_1 blocchi arrivano alla posizione dello stendimento superiore. Per questo stendimento, si possono identificare due quantità: α_1 , ovvero la percentuale degli N_1 intercettati ma non arrestati e α_2 , ovvero la percentuale dei blocchi N_1 che superano l'altezza dello stendimento superiore.

Quindi, $(\alpha_1 + \alpha_2)N_1$ blocchi continua il moto lungo il pendio. Seguendo i principi sopra enunciati, lo stendimento superiore riduce così la velocità della frazione α_1 di blocchi intercettati. Alcuni blocchi possono fermarsi tra i due stendimenti, mentre altri arrivano allo stendimento inferiore. Considerando separatamente $\alpha_1 N_1$ e $\alpha_2 N_1$, una percentuale di ciascuno di essi può arrivare nella posizione dello stendimento inferiore, rispettivamente β e $\tilde{\beta}$. Allo stesso modo, lo stendimento inferiore può intercettare o meno i blocchi e si può definire il rapporto δ tra il numero di blocchi non intercettati e il numero di blocchi che raggiungono la barriera. Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. riporta i simboli utilizzati e il loro significato.

Per soddisfare il requisito di sicurezza, la somma dei blocchi totali non intercettati e di quelli non intercettati e non fermati dal sistema deve essere inferiore o uguale all' $(1 - k_{min})\%N_1$. Si può dimostrare che, per raggiungere l'obiettivo del sistema, la capacità dello stendimento inferiore deve essere selezionata in modo tale che il rapporto q tra i blocchi arrestati e quelli intercettati dallo stendimento inferiore sia:

$$q = \frac{\tilde{\beta}\alpha_2 + \beta\alpha_1(1 - \alpha_2) - 0.05}{[\tilde{\beta}\alpha_2 + \beta\alpha_1(1 - \alpha_2)](1 - \delta)} \quad (5)$$

Quindi, il valore caratteristico della velocità delle traiettorie, per computare l'energia di progetto che deve essere arrestata dallo stendimento inferiore, si ottiene prendendo il q -esimo percentile della distribuzione delle velocità $v_{q,l}$ tra quelle intercettate dalla barriera.

Ne consegue che se tutti i blocchi sono intercettati, ma non tutti fermati, dallo stendimento superiore, cioè $\alpha_2=0$, l'Eq. (5) si riduce a:

$$q = \frac{\beta\alpha_1 - 0.05}{\beta\alpha_1(1 - \delta)} \quad (6)$$

Al contrario, se tutti i blocchi sono intercettati dallo stendimento inferiore, cioè $\delta=0$, l'Eq. (5) diventa:

$$q = \frac{\tilde{\beta}\alpha_2 + \beta\alpha_1(1 - \alpha_2) - 0.05}{[\tilde{\beta}\alpha_2 + \beta\alpha_1(1 - \alpha_2)]} \quad (7)$$

Infine, nel caso di blocchi con altezza inferiore ad entrambi gli stendimenti, i.e. $\alpha_2 = 0$ e $\delta = 0$, l'Eq. (5) diventa:

$$q = \frac{\beta\alpha_1 - 0.05}{\beta\alpha_1} \quad (8)$$

3.1 Descrizione passo-passo del calcolo

Nella pratica attuale, i codici traiettografici, pur consentendo l'inserimento di una barriera fisica con le sue specifiche prestazioni, non considerano una riduzione della velocità dei blocchi di velocità per quei blocchi che impattano la barriera con un'energia superiore alla capacità della barriera stessa. Per affrontare questo problema, una soluzione adeguata consiste nel **decomporre il problema in analisi separate delle traiettorie**.

Nel seguito si indicherà con pedice **u** (upper line) lo stendimento superiore, e con pedice **l** (lower line) lo stendimento inferiore.

1. Si esegue un'analisi **traiettografica preliminare** della traiettoria in assenza di misure di mitigazione (**TA0**), Figura 1.a). Questa analisi è fondamentale per capire se un singolo stendimento può soddisfare il requisito di sicurezza. Se una barriera per cui entrambe Eq.(1) e (2) sono verificate è installabile, non è quindi necessario un sistema a doppio stendimento.
2. Si esegue un'analisi traiettografica (**TA1**), Figura 1 b), inserendo sull'allineamento una barriera di altezza $h_{b,max,u}$, definita come:

$$h_{b,max,u} = \frac{h_{b,u}}{\gamma_h} - t \quad (9)$$

essendo t la tolleranza (raggio del blocco, non inferiore comunque a 50 cm), e assorbimento energetico infinito. Considerando la reale zona sorgente (cima del pendio), in questo caso, i blocchi non intercettati dalla barriera, cioè $\alpha_2 N_1$, continuano il loro moto lungo il pendio. Conoscendo la capacità nominale reale del prodotto scelto come barriera superiore, cioè $E_{b,u}$, la velocità massima del blocco che può essere arrestata è:

$$v_{b,u,max} = \sqrt{\frac{2E_{b,u}}{m_k \gamma_{E,b} \gamma_m \gamma_v^2}} \quad (10)$$

con m_k il valore caratteristico della massa del blocco, mentre γ_m , γ_v , e $\gamma_{E,b}$ sono i fattori di sicurezza parziali relativi rispettivamente alla massa del blocco, alla sua velocità e alla capacità della barriera.

3. Se $\alpha_1 \neq 0$, si esegue un'ulteriore analisi traiettografica (**TA2**), Figura 1 c). L'analisi ha un'area sorgente posta in corrispondenza dello stendimento superiore, con una velocità iniziale pari a

$$v_{in} = \gamma_v \sqrt{v_{k,i,u}^2 - v_{b,u,max}^2} \quad (11)$$

essendo $v_{k,i,u}$ il 95°-esimo percentile della distribuzione delle velocità dei solli blocchi che impattano sulla linea superiore. L'altezza iniziale dei blocchi può essere calcolata, precauzionalmente, come:

$$h_{in} = \gamma_h h_{k,i,u} \quad (12)$$

essendo $h_{k,i,u}$ il 95°-esimo percentile della distribuzione di altezza dei solli blocchi che impattano con lo stendimento superiore. Si suggerisce di considerare una direzione di moto parallela a quella del pendio, in accordo con quanto osservato dai test reali in vera grandezza, in cui la deformazione della barriera tende a guidare il blocco in tale direzione.

Il numero di blocchi di partenza deve essere consistente, cioè si suggerisce di effettuare almeno un numero N^* di lanci superiore a 1000.

Se $\alpha_1 \neq 0$ e $\alpha_2 \neq 0$, i risultati di TA1 e TA2 devono essere combinati, mentre se $\alpha_1 = 0$ o $\alpha_2 = 0$, si devono considerare i risultati della sola TA1 o della sola TA2. Nel primo caso, si noti che, per ottenere risultati coerenti, il numero N^* di simulazioni in TA2 si differenzia dai blocchi non fermati dallo stendimento superiore, ossia $\alpha_1 N_1$ e, quindi il numero di blocchi arrivati in corrispondenza della posizione dello stendimento inferiore, quando uniti a quelli di TA1, dovrebbe essere ridotto per essere coerente con il numero effettivo di simulazioni che non sono state fermate dallo stendimento superiore. Di conseguenza, un sottoinsieme di n^* di valori di l'altezza e velocità dei blocchi deve essere individuato, dove n^* è calcolato come:

$$n^* = \hat{\beta} \alpha_1 (1 - \alpha_2) N_1 \quad (13)$$

essendo $\hat{\beta}$ la % di blocchi arrivati in corrispondenza dello stendimento inferiore in TA2.

Prendendo in esame il parametro cinematico x , cioè l'altezza o la velocità, e considerando la distribuzione empirica di probabilità cumulata di x ottenuta in TA2, gli n^* valori possono essere ottenuti, dividendo la frequenza cumulata in n^* intervalli equidistanti ed estraendo per ciascun intervallo il corrispondente valore di x , preso nel suo centro.

4. Una volta calcolato il rapporto tra il numero di blocchi non intercettati e il numero di blocchi non intercettati δ (da TA1+TA2 o solo da TA1 o TA2, a seconda del caso), considerando l'altezza massima di intercettazione $h_{b,max,l} = \frac{h_{b,l}}{\gamma_h} - t$, come in Eq. (9), il q -esimo percentile della distribuzione delle velocità, per le sole traiettorie intercettate dallo stendimento inferiore, può essere calcolato dall'Eq. (5), ottenendo così la capacità di assorbimento minima richiesta dallo stendimento inferiore.

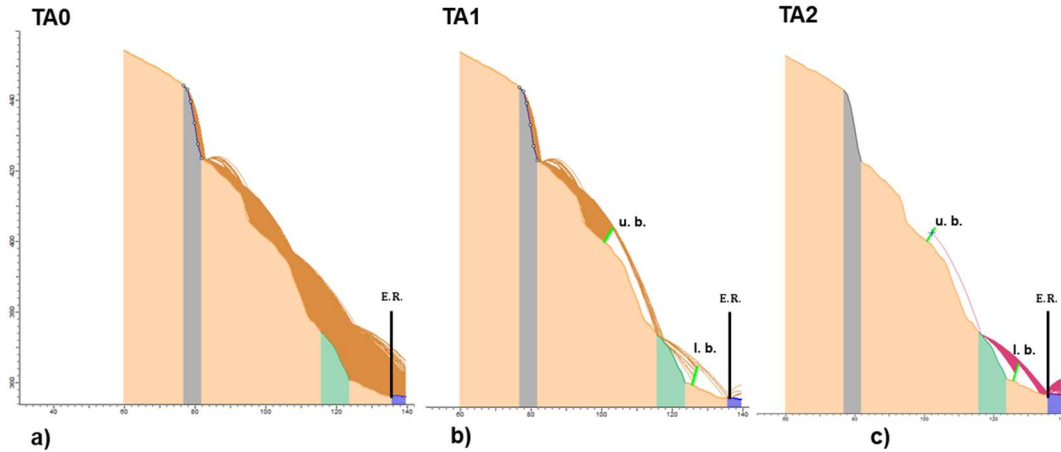


Figura 1: rappresentazione delle analisi traiettografiche: u.b. =upper barrier, stendimento superiore, l.b.=lower barrier, stendimento inferiore, E.R.=elemento a rischio

3.2 Ipotesi semplificativa

Ai fini della **progettazione preliminare**, è possibile effettuare una **semplificazione** del metodo proposto. Questa può essere effettuata (i) analizzando separatamente i risultati di TA1 e TA2 e (ii) considerando disaccoppiate l'altezza e la velocità dei blocchi. In questo caso, i parametri di progetto dello **stendimento inferiore** dovrebbero soddisfare i requisiti di sicurezza di ciascuna analisi e delle Eq. (1) e (2), separatamente. Per ogni analisi, le distribuzioni di frequenza cumulata degli output devono essere assunte come inizianti da $(1 - \alpha_2)$ e da $(1 - \alpha_1)$ per TA1 e TA2 rispettivamente, per considerare che alcuni blocchi sono fermati dallo stendimento superiore. Per raggiungere questo obiettivo, per ogni output, la distribuzione viene semplificata con un andamento lineare che parte da $(1 - \alpha_2)$ o $(1 - \alpha_1)$ e che termina con il valore massimo. Questa è generalmente un'ipotesi conservativa per α_1 o α_2 , purché tali valori siano limitati al 20%. Il k -esimo percentile di queste distribuzioni cumulative lineari è un percentile della distribuzione reale ottenuta per TA1 o TA2. Questo valore può essere implicitamente utilizzato per una progettazione preliminare, secondo le seguenti equazioni:

$$h_{d,l} = \max \left[\frac{\alpha_2 - 0.05}{0.95\alpha_2} h_{k,l,TA1}\gamma_h; \frac{\alpha_1 - 0.05}{0.95\alpha_1} h_{k,l,TA2}\gamma_h \right] \quad (14)$$

$$E_{d,l} = \max \left[\frac{\alpha_2 - 0.05}{0.95\alpha_2} E_{k,l,TA1}\gamma_E; \frac{\alpha_1 - 0.05}{0.95\alpha_1} E_{k,l,TA2}\gamma_E \right] \quad (15)$$

con $h_{k,l,TA1}$, $E_{k,l,TA1}$, $h_{k,l,TA2}$, $E_{k,l,TA2}$ i valori caratteristici di altezza e energia in TA1 e TA2, rispettivamente. Si evince che α_1 e α_2 dovrebbero essere maggiori del 5%. Per valori più bassi, i blocchi di TA1 o TA2 che arrivano allo stendimento inferiore potrebbero non essere considerati. Si deve notare che i valori ottenuti dalle Eq. (14) e (15) sono relativi alla distribuzione dei parametri cinematici di tutti i blocchi che arrivano nella posizione dello stendimento inferiore, mentre il q -esimo percentile del metodo rigoroso si riferisce ai soli blocchi intercettati.



4 BIBLIOGRAFIA

Marchelli, M. (2022). A DESIGN METHOD FOR DOUBLE LINE OF ROCKFALL NET FENCES IN THE FRAMEWORK OF PRABILISTIC TRAJECTORY ANALYSES. *GEAM Geingegneria Ambientale e Mineraria*. (accepted)

Marchelli, M. (2022). *Multiple Lines of Rockfall Net Fences: A Design Proposal of the System*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (accepted)

TABELLA DEI SIMBOLI

Simbolo	Significato
Generale	
h_b	Altezza della barriera fornita dal produttore: i pedici u e l stanno per superiore e inferiore, i.e. $h_{b,u}$ and $h_{b,l}$
E_b	Capacità di assorbimento energetico della barriera così come fornita dal produttore: i pedici u e l stanno per superiore e inferiore, i.e. $E_{b,u}$ e $E_{b,l}$. Generalmente $E_b = E_{MEL}$
$\gamma_{E,b}$	Fattore di sicurezza parziale relativo alla capacità di assorbimento energetico della barriera. Generalmente $\gamma_{E,b} = \gamma_{MEL}$
$v_{b,max}$	Massima velocità dei blocchi trattenuta dalla barriera, assunto m_k come valore caratteristico della massa dei blocchi impattanti: i pedici u e l stanno per superiore e inferiore, i.e. $v_{b,u,max}$ e $v_{b,l,max}$
h_k	Valore caratteristico dell'altezza delle traiettorie, come utilizzato per la progettazione di un singolo stendimento, indipendentemente dall'area di provenienza. (TA1, TA2, o la loro combinazione). Considerando l'UNI 11211-4:2018, $k=95$. I pedici u e l indicano le quantità registrate nella posizione dello stendimento superiore e inferiore, rispettivamente, i.e. $h_{k,u}$ e $h_{k,l}$
v_k	Valore caratteristico della velocità delle traiettorie, come utilizzato per la progettazione di un singolo stendimento, indipendentemente dall'area di provenienza. (TA1, TA2, o la loro combinazione). Considerando l'UNI 11211-4:2018, $k=95$. I pedici u e l indicano le quantità registrate nella posizione dello stendimento superiore e inferiore, rispettivamente, i.e. $v_{k,u}$ e $v_{k,l}$
$h_{k,i}$	Valore caratteristico dell'altezza delle sole traiettorie intercettate, indipendentemente dall'area di provenienza. (TA1, TA2, o la loro combinazione). Considerando l'UNI 11211-4:2018, $k=95$. I pedici u e l indicano le quantità registrate nella posizione dello stendimento superiore e inferiore, rispettivamente, i.e. $h_{k,i,u}$ e $h_{k,i,l}$
$v_{k,i}$	Valore caratteristico dell'altezza delle sole traiettorie intercettate, indipendentemente dall'area di provenienza. (TA1, TA2, o la loro combinazione). Considerando l'UNI 11211-4:2018, $k=95$. I pedici u e l indicano le quantità registrate nella posizione dello stendimento superiore e inferiore, rispettivamente, i.e. $v_{k,i,u}$ and $v_{k,i,l}$
m_k	Valore caratteristico della massa dei blocchi
γ_h	Fattore di sicurezza parziale relativo all'altezza delle traiettorie
γ_v	Fattore di sicurezza parziale relativo alla velocità delle traiettorie
γ_m	Fattore di sicurezza parziale relativo alla massa dei blocchi
Analisi traiettografica TA1	
N	Numero di simulazioni nell'analisi iniziale TA1
N_1	Numero di simulazioni che arrivano nella posizione dello stendimento superiore
α_1	% di blocchi, tra quelli arrivati, intercettati ma non arrestati dallo stendimento superiore
α_2	% di blocchi, tra quelli arrivati, non intercettati dallo stendimento superiore
β	% dei blocchi, tra quelli intercettati ma non arrestati dallo stendimento superiore, arrivati nella posizione dello stendimento inferiore. Questo valore può essere stimato nell'analisi TA2, i.e. $\hat{\beta}$.



Simbolo	Significato
$\tilde{\beta}$	% dei blocchi, non intercettati dallo stendimento superiore, arrivati nella posizione dello stendimento inferiore
Analisi traiettografica TA2	
N^*	Numero di simulazioni
v_{in}	Velocità iniziale delle simulazioni
h_i	Altezza iniziale delle simulazioni
$\hat{\beta}$	% di blocchi arrivati nella posizione inferiore per quanto riguarda TA2
Analisi traiettografica TA1 + TA2	
n^*	Numero di simulazioni intercettate e non intercettate dallo stendimento inferiore, rispettivamente, relative al TA2 ma scalate per considerare che $N^* \neq \alpha_1 N_1$
δ	% di blocchi, tra quelli arrivati, non intercettati dallo stendimento inferiore
q	Percentile da considerare per calcolare il valore caratteristico della velocità nello stendimento inferiore
$v_{q,l}$	Valore caratteristico della velocità delle traiettorie, per la progettazione dello stendimento inferiore nel caso di doppio stendimento