

Rockfall protective measures - Part 2: Preliminary protective programme

La norma si applica:

- a) all'analisi del territorio interessato, del rischio di caduta massi, delle soluzioni alternative impiegabili per la riduzione dello stesso;
- b) ai criteri di definizione del rischio, pericolosità, vulnerabilità, esposizione e danno atteso nell'ambito della caduta massi;
- c) ai criteri da adottare per le scelte delle priorità di indagine e di intervento e per la scelta della miglior soluzione progettuale da parte del committente o dalle autorità territoriali.

La norma si applica a fenomeni di caduta massi che coinvolgono blocchi isolati oppure crolli di piccole masse (con un volume complessivo delle porzioni in frana comunque minore di 100 000 m³), in cui si possa quindi ritenere che non vi sia nessuna interazione fra i blocchi in caduta oppure che tale interazione sia trascurabile.

TESTO ITALIANO

La presente norma sostituisce la UNI 11211-2:2007.

ICS 93.010

PREMESSA

La presente norma è stata elaborata sotto la competenza della Commissione Tecnica UNI

Costruzioni stradali ed opere civili delle infrastrutture

La Commissione Centrale Tecnica dell'UNI ha dato la sua approvazione il 17 maggio 2021.

La presente norma è stata ratificata dal Presidente dell'UNI ed è entrata a far parte del corpo normativo nazionale l'8 luglio 2021.

Le norme UNI sono elaborate cercando di tenere conto dei punti di vista di tutte le parti interessate e di conciliare ogni aspetto conflittuale, per rappresentare il reale stato dell'arte della materia ed il necessario grado di consenso.

Chiunque ritenesse, a seguito dell'applicazione di questa norma, di poter fornire suggerimenti per un suo miglioramento o per un suo adeguamento ad uno stato dell'arte in evoluzione è pregato di inviare i propri contributi all'UNI, Ente Italiano di Normazione, che li terrà in considerazione per l'eventuale revisione della norma stessa.

Si richiama l'attenzione sulla possibilità che alcuni degli elementi del presente documento possono essere oggetto di brevetti. UNI non deve essere ritenuto responsabile di aver citato tali brevetti.

Le norme UNI sono revisionate, quando necessario, con la pubblicazione di nuove edizioni o di aggiornamenti.

È importante pertanto che gli utilizzatori delle stesse si accertino di essere in possesso dell'ultima edizione e degli eventuali aggiornamenti.

Si invitano inoltre gli utilizzatori a verificare l'esistenza di norme UNI corrispondenti alle norme EN o ISO ove citate nei riferimenti normativi.

INDICE

		INTRODUZIONE	1
1		SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE	1
2		RIFERIMENTI NORMATIVI	1
3		TERMINI E DEFINIZIONI	1
4		VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA CADUTA MASSI	2
4.1		Valutazione della pericolosità (H)	3
4.2		Valutazione del danno (d)	5
5		PRIORITÀ D'INTERVENTO	6
6		ESAME DELLE POSSIBILI SOLUZIONI PROGETTUALI	6
	figura 1	Andamento delle curve costi di mitigazione, danni attesi e costo totale	7
6.1		Valutazione della riduzione della pericolosità e/o del rischio	7
6.2		Analisi costi -benefici	8
6.3		Gestione del rischio residuo	8
	figura 2	Andamento delle soglie di rischio	9
APPENDICE A		VALUTAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO	11
(informativa)			
A.1		Generalità	11
A.2		Il concetto di rischio nella normativa tecnica e nell'ambito del rischio idrogeologico	11
A.3		Valutazione, mitigazione e gestione del rischio	11
	prospetto A.1	Caratteristiche dei principali metodi di analisi a scala locale	12
A.4		Esempio di valutazione del rischio da caduta massi su un ambito territoriale urbanizzato	12
	figura A.1	Esempio di carta della probabilità Pa relativo ad un sito industriale in caso di crollo [10] [11]	13
	figura A.2	Carta della pericolosità Pa per caduta di volumi lapidei pari a quello del volume di progetto con tempo di ritorno Tr=30 anni	14
	figura A.3	Carte di pericolosità prima (a) e dopo l'intervento (b) di mitigazione del rischio da caduta di massi, realizzato mediante installazione di barriera paramassi da 8000 kJ	15
	figura A.4	Carta della pericolosità per caduta di volumi lapidei pari al blocco di progetto, e tempo di ritorno Tr=30 anni ad opere realizzate	17
	figura A.5	Grafico F-N indicante i livelli di rischio (vedere punto 6 nel quale sono indicati i valori di rischio ai quali si trova esposto un elemento a rischio, ad esempio un addetto all'insediamento, che si colloca nel punto 1 di figura A.4)	18
	figura A.6	Diagramma di flusso che visualizza la concatenazione di eventi che produce la situazione di rischio per caduta massi nel punto 1 di figura 4 in presenza di opere di difesa	19
APPENDICE B		DEFINIZIONE DELLA VULNERABILITÀ E VALUTAZIONE DEL RISCHIO SUGLI EDIFICI	20
(informativa)			
B.1		Generalità	20
B.2		Vulnerabilità degli edifici	20
	prospetto B.1	Valore del parametro di vulnerabilità su edifici in funzione del danno atteso	21
	figura B.1	Approccio per lo studio della risposta strutturale a seguito dell'impatto	22
B.3		Esempio di metodologia di valutazione del rischio	22
	figura B.2	Schema per la valutazione del rischio nelle costruzioni	25
	prospetto B.2	Probabilità associate a ciascuno scenario dell'albero degli eventi	26
B.4		Valutazione del rischio	26

APPENDICE (informativa)	C	APPROCCI DI VALUTAZIONE DEL DANNO ATTESO SU UN'INFRASTRUTTURA LINEARE (ESEMPIO: STRADA, FERROVIA)	28
C.1		Criteri generali per la valutazione del danno atteso su un'infrastruttura lineare	28
C.2		Valutazione della probabilità di lesioni o perdita della vita umana	28
	figura C.1	Lunghezza della tratta potenzialmente investita	29
C.3		Esempio di definizione di un coefficiente di danno atteso su una rete di infrastrutture di trasporto [16]	30
	figura C.2	Diagramma per la valutazione del danno atteso	30
	figura C.3	Esempio di determinazione della lunghezza di deviazione	32
BIBLIOGRAFIA			33

INTRODUZIONE

La presente norma costituisce la seconda parte di una serie di norme aventi come oggetto le opere di difesa dalla caduta massi.

1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

La presente norma si applica all'analisi del territorio con riferimento al rischio da caduta massi.

La norma definisce il concetto di rischio da caduta massi e stabilisce i principi generali per la valutazione dei parametri dei quali è funzione: la pericolosità e il danno atteso.

Fornisce dei criteri guida per stabilire le priorità di intervento e per scegliere l'intervento o la combinazione di interventi ottimale per la mitigazione del rischio da caduta massi in una data area.

La presente norma si applica a eventi di caduta massi con volumi massimi di 10^3 m^3 . Per eventi attesi con volumi superiori al limite di cui sopra sono necessari altri tipi di valutazioni che non rientrano nel campo di applicazione della presente norma.

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

La presente norma rimanda, mediante riferimenti datati e non, a disposizioni contenute in altre pubblicazioni. Tali riferimenti normativi sono citati nei punti appropriati del testo e sono di seguito elencati. Per quanto riguarda i riferimenti datati, successive modifiche o revisioni apportate a dette pubblicazioni valgono unicamente se introdotte nella presente norma come aggiornamento o revisione. Per i riferimenti non datati vale l'ultima edizione della pubblicazione alla quale si fa riferimento (compresi gli aggiornamenti).

UNI 11211-1 Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 1: Termini e definizioni

UNI 11211-3 Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 3: Progetto preliminare;

3 TERMINI E DEFINIZIONI

Ai fini della presente norma si applicano i termini e le definizioni di cui alla UNI 11211-1:2018 e alla UNI ISO 31000:2018 e i termini e le definizioni seguenti.

3.1 danno: Insieme delle ripercussioni negative sugli individui, sui beni e sulle attività economiche prodotte dal fenomeno di caduta di massi.

3.2 elemento esposto: Qualsiasi bene esposto al rischio da caduta massi: vite umane, animali, mezzi di trasporto, infrastrutture, edifici, coltivazioni agricole e coltivazioni forestali, beni culturali ed ambientali.

3.3 pianificazione degli interventi: Attività decisionale che permette in base ad un'indicazione di pericolo o di rischio di definire le necessità d'intervento e le priorità di intervento su un sito rispetto ad un altro.

3.4 pianificazione territoriale: Identificazione del pericolo e del rischio idrogeologico a supporto dei piani urbanistici a livello locale (regionale, provinciale, comunale) ai sensi della legislazione vigente¹⁾.

3.5 probabilità di accadimento (Pa): Probabilità di raggiungimento dell'elemento esposto. È un tipo di probabilità subordinata al verificarsi dell'evento di innesco, che a sua volta possiede una propria probabilità di accadimento.

1) Alla data di pubblicazione della presente norma è in vigore la Legge 3 agosto 1998, n. 267 "Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 11 giugno 1998, n.180, recante misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania".

- 3.6** **probabilità di innesco (Pc):** Probabilità teorica che uno o più blocchi di date dimensioni si stacchi da una porzione di parete rocciosa (pericolosità da distacco in parete) o da un versante detritico (pericolosità da mobilitazione su un versante).
- 3.7** **probabilità di transito (Pr):** Probabilità che, una volta innescato l'evento, uno o più blocchi dotati di sufficiente energia cinetica, transitino o si arrestino in una data area. È detta anche probabilità di propagazione.
- 3.8** **probabilità empirica:** Frequenza relativa (osservata) con cui si verifica un caso durante le N prove di un esperimento. È determinata dal rapporto tra il numero dei casi favorevoli osservati e il numero complessivo delle prove eseguite. Al crescere del numero delle prove empiriche la probabilità empirica tende ad avvicinarsi alla probabilità teorica (rapporto tra il numero di casi favorevoli e il numero di casi possibili).
- 3.9** **rischio accettabile:** Soglia limite al di sotto della quale la società nel suo insieme è disposta ad accettare il rischio e non ritiene giustificabile una spesa ulteriore per ridurlo alla luce dei benefici in termini economici e sociali che derivano dalla sua accettazione.
- 3.10** **rischio collettivo:** Somma dei danni previsti per la collettività causati, in un determinato lasso di tempo, da determinati scenari. In generale corrisponde al danno previsto in un anno.
- 3.11** **rischio individuale:** Rischio per una singola persona, corrisponde generalmente alla probabilità individuale di decesso in un anno [1].
- 3.12** **rischio naturale:** Rischio a cui ogni individuo è esposto per il solo fatto di vivere a contatto con il mondo naturale. È il livello di riferimento (cosiddetto "rumore di fondo") per valutare l'alterazione delle condizioni di sicurezza.
- 3.13** **rischio residuo:** Livello di rischio rimanente una volta applicata la soluzione progettuale.
- 3.14** **scenario di rischio:** Valutazione preventiva degli effetti sul territorio, sulle persone, sulle cose e sui servizi essenziali generati da un evento pericoloso.

4 VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA CADUTA MASSI

La valutazione del rischio da caduta massi deve essere eseguita per stabilire le priorità di intervento e per valutare l'efficacia degli interventi. Tale valutazione può essere effettuata sia con metodi speditivi (da utilizzare per esempio in una fase preliminare) che con metodi più complessi (da utilizzare per esempio per valutare l'efficacia dell'intervento ipotizzato) e deve essere confermata in base ad osservazioni in sito.

Il rischio da caduta massi è da intendersi come la probabilità che si verifichino perdite di vita umane, lesioni alle persone, danni ai beni e perturbazioni delle attività economiche e sociali a seguito del verificarsi di un determinato scenario di evento di una data intensità. Può essere "specifico" (Rs) o "totale" (Rt) quando è possibile determinare il valore dell'elemento esposto W.

Il rischio specifico Rs è definito come:

$$R_s = H \times E \times V \quad (1)$$

dove:

H è la pericolosità ovvero la probabilità che un evento di una determinata intensità I si verifichi in un determinato arco temporale in una data area (dalla valutazione della pericolosità in termini probabilistici scaturisce lo scenario di evento);

E è il livello di esposizione ad un evento di una determinata intensità I;

V è la vulnerabilità ovvero la propensione dell'elemento esposto a subire un danno di un determinato livello, a fronte di un evento di una determinata intensità I.

A fronte di eventi attesi di diversa intensità I si hanno differenti valutazioni sia del rischio specifico che della vulnerabilità dell'elemento esposto.

Il rischio specifico solitamente è valutato tramite l'assegnazione dell'elemento esposto ad una classe di rischio definita da uno strumento di pianificazione esistente come quelli previsti dalla legislazione vigente²⁾.

Il rischio totale, noto il valore W dell'elemento esposto, si può stimare con la formula:

$$R_t = R_s \times W$$

R_s è il rischio specifico;

W è il valore in termini economici dell'elemento esposto.

Il rischio da caduta massi può anche essere definito in modo generico come la probabilità che un determinato danno d si verifichi su un elemento esposto a seguito di un dato scenario di evento di pericolosità H :

$$R = f(H; d) \quad (2)$$

Il livello di danno d può essere espresso o da un valore assoluto in termini economici (vedere esempio illustrato nel punto B.3) o da un coefficiente di danno atteso (vedere esempio illustrato nel punto C.3).

Nella presente norma per la valutazione del rischio si fa riferimento ai parametri riportati nella formula (2) la cui valutazione è illustrata nei punti 4.1 e 4.2.

4.1 Valutazione della pericolosità (H)

La valutazione della pericolosità H è generalmente complessa e richiede la quantificazione, sia a livello spaziale che temporale, delle probabilità di accadimento e dell'intensità di uno o più eventi attesi. La valutazione può essere fatta in modo speditivo - empirico, nella fase di pianificazione degli interventi, o in modo approfondito, durante la progettazione e dopo la realizzazione degli interventi utilizzando i dati di progetto.

La pericolosità, così come il rischio, può essere valutata tramite l'assegnazione dell'area in esame ad una classe di pericolosità (vedere legislazione vigente) definita da uno strumento di pianificazione esistente su scala locale o da un coefficiente di pericolosità [2].

Gli aspetti essenziali che si devono considerare nella valutazione sono:

- 1) Analisi del(i) tipo(i) di evento atteso(i) nell'area in esame;
- 2) Valutazione dell'intensità dell'evento (I);
- 3) Valutazione della probabilità di accadimento (P_a);
- 4) Stima della probabilità di innesco (P_c);
- 5) Calcolo della probabilità di transito (P_r).

Tali aspetti sono illustrati dal punto 4.1.1 al punto 4.1.5.

4.1.1 Analisi dell'evento atteso

L'analisi del(i) tipo(i) di evento atteso(i) che può(possano) interessare l'elemento esposto si basa su una serie di indagini mirate a definirne l'intensità. Questa analisi consiste nella valutazione dei seguenti elementi:

- 1) Condizioni di stabilità dell'area di innesco, caratteristiche geologiche e geomeccaniche, possibili sollecitazioni esterne antropiche (per esempio vibrazioni indotte dal passaggio di veicoli) o naturali (per esempio terremoti);
- 2) Volumi e forme dei blocchi singoli che si possono mobilizzare (rilevati con analisi geomeccaniche e/o con il rilievo dei volumi lapidei al piede del versante);
- 3) Volume totale che si può mobilizzare per singolo evento;
- 4) Caratteristiche dell'area dove è possibile la propagazione della caduta massi.

2) Alla data di pubblicazione della presente norma è in vigore la Legge 3 agosto 1998, n. 267 "Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 11 giugno 1998, n. 180, recante misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania".

4.1.2

Valutazione dell'intensità dell'evento (I)

L'intensità dell'evento deve essere stimata in termini di massa, velocità ed energia cinetica d'impatto sull'elemento esposto. Questa stima deve tenere conto dei seguenti fattori:

- Volumi e forme dei blocchi singoli che si possono mobilitare (rilevati con analisi geomeccaniche e/o con il rilievo dei volumi lapidei al piede del versante);
- Volume totale che si può mobilitare per singolo evento;
- Morfologia del versante (pendenza e variazioni della pendenza);
- Tipo di terreno interessato dalla propagazione;
- Tipo e stato della vegetazione;
- Presenza di strutture antropiche (strade, edifici, manufatti).

L'intensità può essere espressa tramite il valore dell'energia cinetica di impatto sull'elemento esposto oppure con un "coefficiente normalizzato rispetto al massimo valore atteso" [2].

4.1.3

Valutazione della probabilità di accadimento (Pa)

La probabilità di accadimento Pa dipende dalla probabilità di innesco Pc e dalla probabilità di transito Pr.

In base alla teoria del calcolo delle probabilità Pa è una probabilità condizionata e si esprime con la formula:

$$Pa = Pr|Pc$$

Dalla formula consegue che la probabilità di accadimento Pa è sempre minore o uguale alla probabilità di innesco Pc.

Nonostante rivesta una notevole importanza per le politiche di prevenzione non strutturale a scala regionale, l'analisi dei fenomeni storici per la valutazione di Pa si può utilizzare soltanto a condizione che sia disponibile una serie storica sufficientemente rappresentativa [3]. Inoltre l'analisi, per essere utilizzata, deve necessariamente riguardare un sito limitato e con condizioni geologiche, geomorfologiche e geomeccaniche omogenee e costanti nel tempo.

4.1.4

Probabilità di innesco (Pc)

La probabilità di innesco Pc può essere stimata tramite osservazioni fatte in sito e/o tramite analisi di serie storiche rappresentative.

La stima della probabilità di innesco, sulla base dei metodi ad oggi disponibili, fornisce solo un'indicazione basata su fattori osservazionali e sull'analisi delle serie storiche, quindi si tratta di un valore di probabilità empirica.

La stima della probabilità d'innesco deve essere eseguita tenendo conto dei seguenti fattori predisponenti ed innescanti:

- Fattori geologici (natura, omogeneità o eterogeneità, ecc.);
- Fattori geomeccanici (assetto strutturale, carattere della fratturazione, stato di alterazione, ecc.);
- Fattori idrogeologici (presenza di acqua);
- Fattori meteorologici: precipitazioni e ventosità (natura, andamento annuale, intensità e durata degli eventi meteorologici più significativi) e temperatura (massima, media, minima, andamento annuale, cicli gelo- disgelo);
- Altri fattori naturali: sollecitazioni sismiche (periodicità e magnitudo), presenza e tipo di vegetazione in parete, incendi;
- Fattori antropici: presenza di sovraccarichi o di scavi, sollecitazioni cicliche ad alta frequenza (per esempio esplosioni, traffico stradale o ferroviario, macchine vibranti).

La stima di Pc può variare nel tempo poichè, per effetto dei fattori sopra menzionati, l'ammasso roccioso è soggetto ad un processo di continua variazione delle proprie caratteristiche geomeccaniche.

La stima della probabilità di innesco permette di valutare preliminarmente la propensione al dissesto e di suddividere un versante o una parete in porzioni omogenee dal punto di vista della P_c (vedere appendice A.4).

In mancanza di dati significativi la probabilità di innesco si può assumere pari al 100%, ovvero pari a 1.

4.1.5

Probabilità di transito (P_r)

Per calcolare la probabilità di transito P_r si devono utilizzare modelli di calcolo bidimensionali o tridimensionali che permettano di definire in percentuale le zone di arresto dei blocchi.

In generale, al fine di individuare le traiettorie di propagazione statisticamente significative, si deve utilizzare un modello di calcolo tridimensionale. L'utilizzo di un modello di calcolo bidimensionale deve essere giustificato da una conoscenza approfondita delle aree di distacco, delle zone di propagazione e delle linee preferenziali di caduta.

Le informazioni geologiche, geomeccaniche e topografiche utilizzate e il modello di calcolo delle traiettorie devono essere compatibili tra loro e con la finalità dello studio.

Deve essere sempre eseguita una validazione dei modelli utilizzati sul terreno che deve includere anche l'analisi dei "testimoni muti" (massi inequivocabilmente ascrivibili a crolli pregressi arrestati sul versante o arrestati dalla vegetazione, tracce del passaggio dei massi sul terreno o sui tronchi degli alberi, ecc.).

In generale l'associazione dei due modelli di calcolo sopra riportati (modello di calcolo bidimensionale e tridimensionale) permette di innalzare il livello di affidabilità del risultato.

4.2

Valutazione del danno (d)

Il danno può includere danni diretti d_d (che riguardano esclusivamente l'elemento esposto) e danni indiretti d_i , come i danni individuali, sociali ed economici (per esempio la chiusura di strade, l'inagibilità di edifici, l'interruzione di servizi essenziali, ecc.). Danni diretti e danni indiretti possono anche coesistere (per esempio nel caso in cui il bersaglio colpito è un'infrastruttura viaria e il danno impedisce l'accesso ad un centro abitato o a una località turistica). Il danno può essere quindi espresso dalla formula seguente:

$$d = \sum_{ij} (d_{dij} ; d_{ij})$$

Il danno può verificarsi soltanto in presenza di elementi esposti nella zona di propagazione di un evento di crollo. Inoltre è funzione di intensità I , vulnerabilità V e valore dell'elemento esposto w . Può essere quindi espresso dalla formula seguente:

$$d = f(I; V; w)$$

dove:

I = Intensità del fenomeno;

V = vulnerabilità dell'elemento esposto;

w = valore dell'elemento esposto (in mancanza di dati, si assume pari a 1).

Il danno può essere stimato utilizzando:

- una scala di valori rapportati ad un'unica unità di misura (per esempio unità di misura monetaria), oppure
- una scala di valori rapportati al massimo danno atteso in una data area (vedere esempio in appendice C).

Il livello di danno è funzione dell'intensità dell'evento atteso e della vulnerabilità degli elementi esposti e deve essere definito tenendo conto anche dell'effetto di eventuali interventi di mitigazione presenti o in fase di progettazione.

PRIORITÀ D'INTERVENTO

Per pianificare le indagini, gli investimenti, la manutenzione o per suddividere un intervento in lotti di progettazione o di esecuzione (vedere esempio illustrato nel punto A.4) si devono stabilire delle priorità d'intervento (vedere esempi di cui ai punti A.4 e C.3). Queste devono essere stabilite compatibilmente con le risorse umane, tecniche e finanziarie disponibili.

Le priorità d'intervento devono essere individuate, a seconda delle esigenze di pianificazione, della vastità della zona indagata e della fase progettuale/gestionale in cui si trova l'elemento esposto, in funzione di:

- Probabilità di accadimento.
- Pericolosità.
- Rischio.
- Danno.

Il criterio di scelta delle priorità di intervento (investimenti, indagini, progettazione, esecuzione, manutenzione) deve essere giustificato in funzione di:

- Vastità dell'area indagata (scala regionale, comunale, locale, ecc.);
- Importanza e tipologia degli elementi a rischio (infrastrutture, nuclei urbani, abitazioni isolate).

Poiché la realizzazione delle opere di mitigazione del rischio da caduta di massi s'inquadra nelle attività di prevenzione strutturale a fini di protezione civile³⁾, le priorità d'intervento devono avere come obiettivo, nell'ordine:

- 1) Salvaguardia della vita umana.
- 2) Salvaguardia dell'integrità dei beni.
- 3) Salvaguardia della continuità dei servizi essenziali.
- 4) Salvaguardia dell'integrità dei beni culturali.

ESAME DELLE POSSIBILI SOLUZIONI PROGETTUALI

Le possibili soluzioni progettuali includono interventi di mitigazione di tipo tecnico, organizzativo e procedurale quali:

- Opere di protezione atte a mitigare la pericolosità (intensità e/o probabilità di accadimento) dell'evento (per esempio barriere paramassi, rilevati paramassi, rafforzamenti corticali);
- Soluzioni progettuali atte a mitigare il danno sull'elemento esposto (per esempio soluzioni progettuali che riducono la vulnerabilità dell'elemento esposto);
- Provvedimenti amministrativi (per esempio inserimento di vincoli urbanistici, ordinanze di chiusura strade, ecc.);
- Misure organizzative (per esempio attivazione di un piano di monitoraggio, attivazione di un protocollo di gestione e prevenzione dell'emergenza, ecc.);
- Soluzioni integrate che prevedono più di uno dei provvedimenti sopracitati.

Tra le possibili soluzioni progettuali c'è anche la cosiddetta "opzione zero", ovvero il non intervento.

L'esame delle possibili soluzioni progettuali può avere diversi gradi di dettaglio in funzione della vastità dell'area da proteggere e della valutazione del danno. In linea generale, deve tenere conto dei seguenti aspetti:

- 1) Valutazione della riduzione della pericolosità e/o del rischio;
- 2) Analisi costi-benefici delle soluzioni progettuali a breve e a lungo termine;
- 3) Possibilità di gestione del rischio residuo.

3) Alla data di pubblicazione della presente norma è in vigore il Decreto Legislativo 2 gennaio 2018, n. 1 "Codice della protezione civile".

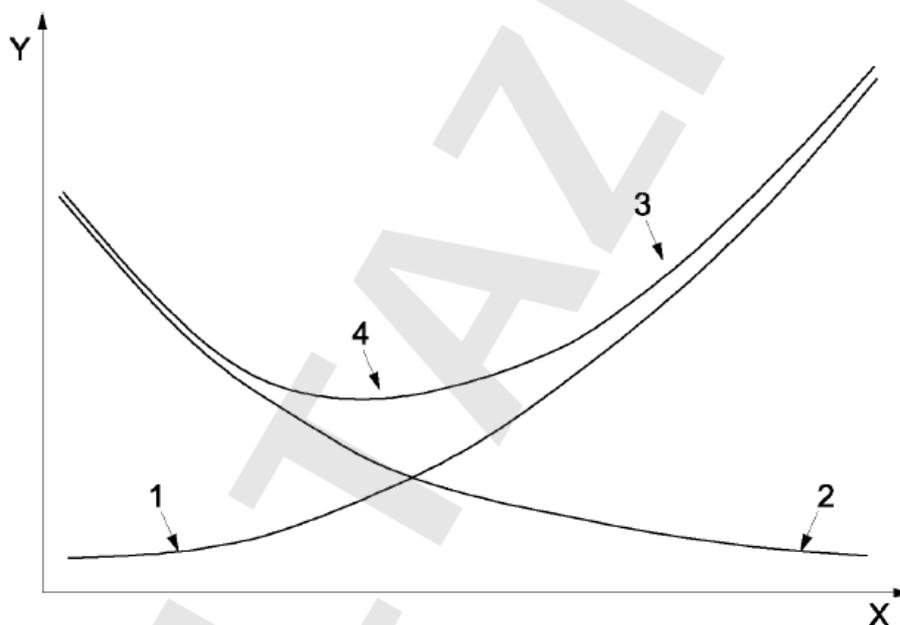
La soluzione progettuale adeguata è quella che, valutati i possibili scenari di rischio e le possibili soluzioni progettuali, permette l'ottimale bilanciamento tra la riduzione dei danni attesi (espressi in termini di costi) e i costi di mitigazione (vedere figura 1).

figura 1

Andamento delle curve costi di mitigazione, danni attesi e costo totale

Legenda

- X Costi delle misure di mitigazione
- Y Costi economici e sociali
- 1 Costi di mitigazione
- 2 Danni attesi
- 3 Costo totale
- 4 Optimum=Minimo



6.1

Valutazione della riduzione della pericolosità e/o del rischio

La valutazione della pericolosità e/o del rischio deve essere effettuata in fase di:

- Pianificazione territoriale;
- Pianificazione degli interventi (fase pre-progettuale);
- Fase di progettazione, utilizzando i dati di progetto.

La valutazione effettuata in fase di progettazione, poiché si avvale di dati più approfonditi, deve essere considerata prevalente sulle valutazioni eseguite nelle fasi preliminari sopracitate (fase di pianificazione territoriale e/o fase di pianificazione degli interventi). Infatti, le valutazioni di pericolosità e/o rischio da caduta massi condotte in fase di pianificazione territoriale si basano su metodi concepiti per grandi aree. Questi ultimi sono quindi metodi meno accurati e con un approccio conservativo (a favore di sicurezza). Pertanto, gli approfondimenti di dettaglio eseguiti in fase di progettazione ai sensi della presente parte di norma e della UNI 11211-3 possono portare a valori di rischio accettabile superiori a quelli che derivano dalle valutazioni eseguite sulla medesima area in fase di pianificazione territoriale.

La valutazione della riduzione della pericolosità e/o del rischio permette di valutare l'efficacia delle possibili soluzioni progettuali. Può essere eseguita valutando:

- Riduzione della pericolosità (riduzione dell'intensità dell'evento o riduzione della probabilità di accadimento) tramite diagrammi [4] o tramite coefficienti di pericolosità (per esempio il coefficiente di pericolosità RHRS [2]).
- Riduzione del danno atteso.

In fase di valutazione, si dovrebbero stimare anche i rischi legati alla realizzazione dell'intervento stesso.

6.2

Analisi costi-benefici

L'analisi costi-benefici può essere eseguita esprimendo costi e benefici in termini monetari oppure attribuendo ad ogni costo e ad ogni beneficio una classe di importanza (per esempio "elevata", "media", "bassa") o un peso.

In fase di analisi costi-benefici si devono considerare i seguenti aspetti:

- a) Costo di esecuzione della soluzione progettuale;
- b) Costi ambientali;
- c) Sostenibilità a lungo termine delle spese di gestione della soluzione progettuale;
- d) Vita utile della soluzione progettuale;
- e) Costi di ispezione e di manutenzione periodici e/o straordinari;
- f) Abbattimento, per singolo evento e nel tempo, del danno atteso (espresso in termini di costo);
- g) Riduzione della probabilità di accadimento dell'evento;
- h) Aumento del valore dell'elemento esposto desunto da valutazioni urbanistiche e dovuto al declassamento del livello di pericolo/rischio a cui è soggetto l'elemento esposto.

6.3

Gestione del rischio residuo

La gestione del rischio residuo dipende dai risultati della valutazione della riduzione della pericolosità e/o del rischio illustrata al punto 6.1. Si basa sul confronto del rischio residuo con le soglie di rischio individuate.

Il rischio residuo può essere espresso in termini di:

- danni (diretti e/o indiretti), oppure
- perdita di vite umane.

Contestualizzando i livelli di rischio alle opere di mitigazione dalla caduta di massi, il rischio residuo prima e dopo la realizzazione delle opere di difesa può ricadere in una delle regioni definite nel diagramma illustrato in figura 2.

L'efficacia di una misura di protezione può essere espressa in termini di differenza tra il rischio iniziale e quello residuo dopo la realizzazione della misura.

Una volta definite la tipologia, le caratteristiche tecniche-geometriche e l'ubicazione di ciascun intervento da realizzare sul versante oggetto di studio, si conduce nuovamente l'analisi di pericolosità determinando quindi la pericolosità residua (livello di pericolosità che persiste in una data area a seguito della realizzazione degli interventi di mitigazione).

Per il calcolo del rischio residuo (R_r), è necessario stabilire l'effetto esercitato dall'intervento di mitigazione attuato ($\Delta R_{\text{mitigazione}}$) sui diversi parametri che entrano in gioco nella formula (1). Di seguito si riporta la formulazione analitica del rischio residuo:

$$R_r = R_t - \Delta R_{\text{mitigazione}}$$

dove:

R_r = rischio residuo;

R_t = rischio totale;

$\Delta R_{\text{mitigazione}}$ = diminuzione del rischio a seguito degli interventi di mitigazione attuati.

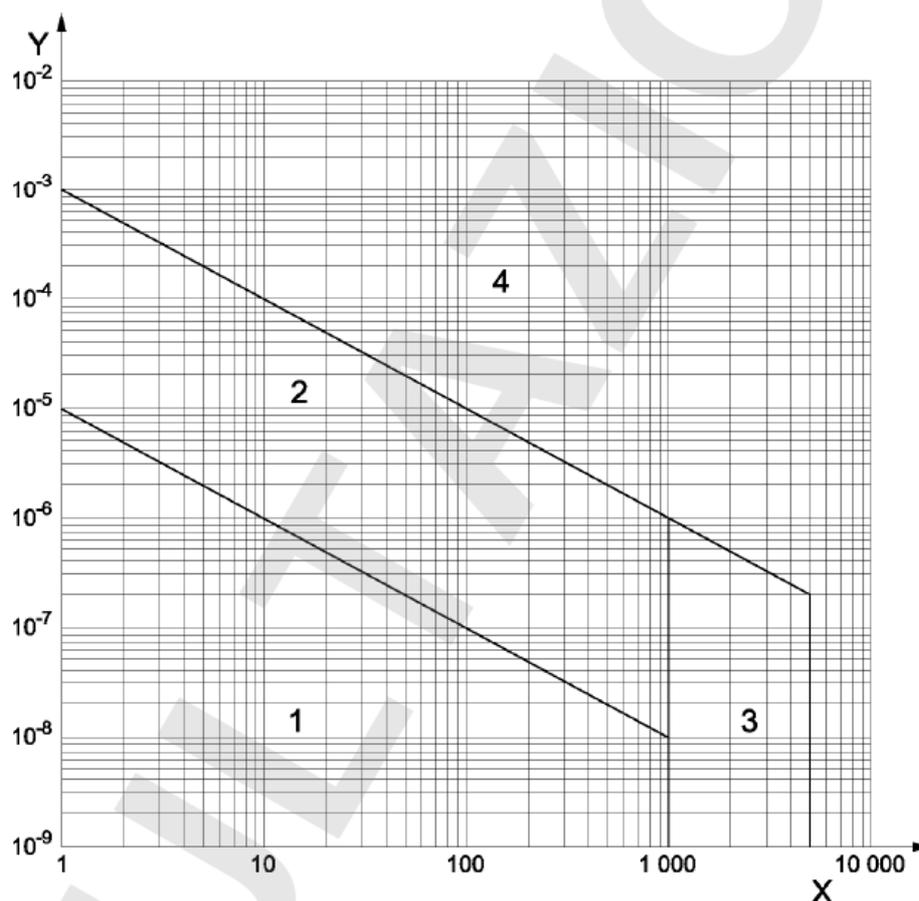
Il calcolo del valore di $\Delta R_{\text{mitigazione}}$ è importante quando si esegue l'analisi costi-benefici nell'ambito del metodo noto come Quantitative Risk Assessment o QRA [5], [6].

Il diagramma in figura 2 rappresenta l'andamento delle soglie di rischio in funzione della perdita di vite umane e della perdite di vite umane su base annua [7].

figura 2 **Andamento delle soglie di rischio**

Legenda

- X Perdita di vite umane
- Y Perdite di vite umane su base annua
- 1 Rischio accettabile
- 2 Regione "ALARP"
- 3 Regione del rischio associato a eventi catastrofici
- 4 Rischio non accettabile



Le soglie di rischio rappresentate nel diagramma in figura 2 delimitano le seguenti regioni di rischio in cui può ricadere il sito dopo l'intervento:

- Regione del rischio accettabile: il sito non necessita di ulteriori interventi di mitigazione.
- Regione "ALARP" "As Low As Reasonably Practicable": il rischio è stato ridotto al livello ottimale tenendo conto dell'analisi costi/benefici (vedere figura 1). Sono possibili ulteriori interventi di mitigazione strutturale (per esempio barriere paramassi, rilevati paramassi, ecc.) integrati eventualmente con interventi non strutturali (per esempio piani di gestione, sistemi di monitoraggio, ecc.) per ridurre ulteriormente il livello di rischio residuo.
- Regione del rischio Non Accettabile: il livello di rischio è troppo elevato per essere accettato. Si deve intervenire con interventi di mitigazione che riducono la pericolosità (e di conseguenza il rischio) facendo rientrare il rischio all'interno della regione "ALARP" o della regione del rischio accettabile.
- Regione del rischio associato a "eventi catastrofici" ovvero eventi con probabilità di accadimento molto bassa ma che al loro accadimento producono ingenti danni in termini di vite umane e in termini economici: si devono fare approfondimenti e valutazioni dettagliate. Tali "eventi catastrofici" non rientrano nel campo di applicazione della presente norma (che non si applica a eventi di caduta massi con volumi litoidi complessivi maggiori di 103 m^3).

Nella definizione della soglia di rischio si deve tenere conto del grado di affidabilità e di oggettività dei dati a disposizione. Inoltre devono essere considerati i seguenti aspetti:

- Per quanto riguarda gli edifici strategici e gli edifici ad uso collettivo devono essere accettati livelli di rischio più bassi che per quanto riguarda le attività ad elevato valore economico ma non essenziali (per esempio attività produttive o attività turistiche) e le attività destinate all'erogazione dei servizi essenziali per numero elevato di persone (mobilità, energia, ecc.). Il progettista deve valutare se i livelli di rischio individuale e sociale suggeriti dalla letteratura sono adeguati alla realtà socioeconomica dell'area in esame (per esempio insediamenti turistici, siti particolarmente sensibili come scuole o ospedali, infrastrutture strategiche, ecc.).
- Le soglie di rischio accettabile per i pendii artificiali devono essere in generale fissate più basse di quelle per i pendii naturali;
- Le soglie di rischio accettabile per nuove opere (in fase di progettazione) devono essere in generale fissate più basse di quelle per opere di protezione esistenti;
- Le valutazioni del rischio sono sito-specifiche e possono variare nello spazio e nel tempo (variazione delle condizioni geologiche, idrogeologiche, morfologiche e strutturali, delle condizioni di alterazione, della presenza di vegetazione, della vulnerabilità e dell'esposizione dell'elemento esposto). Condizioni geologiche, strutturali, di alterazione e degrado delle rocce in siti anche immediatamente adiacenti, possono portare a risultati significativamente diversi nella valutazione del rischio;
- Il rischio per eventi di frana è variabile a seconda del sito analizzato, ma è in generale compreso tra 10^{-6} perdite di vite umane/anno e 10^{-5} perdite di vite umane/anno. Infatti, secondo uno studio condotto da CNR-IRPI 2019 [8], riferito al periodo 1969-2018, considerando i valori medi sull'intero record temporale di 48 anni esaminato, in Italia si può calcolare un tasso medio di 0,08 perdite di vite umane per 100.000 abitanti, valore che corrisponde ad una media di 47 perdite di vite umane/anno per frana sull'intero territorio nazionale;
- Alcuni studi [9] hanno dimostrato che l'opinione pubblica tollera livelli di rischio compresi tra 10^{-2} perdite di vite umane/anno e 10^{-4} perdite di vite umane/anno, quando è esposta volontariamente (per esempio nel caso di incidenti stradali, incidenti sul lavoro, ecc.). Quando, invece, è esposta a rischi involontari (per esempio incendi, calamità naturali, crolli di opere d'ingegneria, ecc.) tollera livelli di rischio molto più bassi, tra 10^{-5} perdite di vite umane/anno e 10^{-6} perdite di vite umane/anno.

In figura 2, il rischio è espresso in termini di perdita di vite umane. Tuttavia nel processo decisionale della gestione del rischio residuo si dovrebbe tenere conto di tutti i tipi di danno, sia quelli diretti che quelli indiretti.

A.1 Generalità

La presente appendice fornisce indicazioni per la valutazione dei livelli di accettabilità del rischio da caduta massi fornendo, a titolo informativo, un esempio di applicazione dei concetti esposti nella norma (punto A.4).

A.2 Il concetto di rischio nella normativa tecnica e nell'ambito del rischio idrogeologico

Ad oggi, la natura specifica dei fenomeni di caduta massi, caratterizzati da sostanziale imprevedibilità spaziale e temporale in termini deterministici, non permette una gestione del rischio alternativa agli interventi di mitigazione strutturale di tipo attivo o passivo.

Nella maggior parte dei casi, infatti, il rischio da caduta di massi non è ancora gestibile tramite sistemi di allertamento (*early warning*), che permettano di ridurre o eliminare la presenza di elementi esposti nelle zone a rischio (come invece già avviene per altri rischi di natura idraulica o geologica, dove è possibile intervenire con provvedimenti quali l'evacuazione o l'interdizione del traffico). Le ragioni principali di tale limite sono le seguenti:

- 1) Non sono ancora stati individuati, a livello scientifico, parametri fisici che possano essere assunti come precursori di evento affidabili e, di conseguenza, essere monitorati con una sensoristica adeguata, tranne che per alcuni tipi di strumentazioni geotecniche o topografiche, che però presentano un campo di applicazione limitato a volumi singoli di grandi dimensioni;
- 2) Frequentemente le distanze tra la zona d'innescò dei crolli e i bersagli sono troppo ridotte perché il sistema di allertamento possa essere impiegato con efficacia. I tempi di traslazione dei volumi lapidei sono infatti minori dei tempi di latenza del sistema di monitoraggio (intesi come la sommatoria dei tempi di rilevazione e dei tempi di diramazione dell'allarme da parte del sistema);
- 3) Variazioni di sforzi anche di piccola entità possono indurre il cedimento dei ponti di roccia o lo scivolamento dei blocchi sui loro piani di appoggio. Nella maggior parte dei casi, quindi, i tempi che intercorrono tra i primi cedimenti rilevabili e la mobilitazione dell'intero volume sono troppo ridotti per poter essere efficace il sistema di allertamento.

A.3 Valutazione, mitigazione e gestione del rischio

In generale, la procedura di valutazione del rischio è composta dai seguenti passaggi:

- 1) valutazione dell'intensità del fenomeno;
- 2) valutazione della pericolosità;
- 3) individuazione degli elementi a rischio;
- 4) valutazione della vulnerabilità;
- 5) valutazione del rischio;
- 6) gestione del rischio.

Nel prospetto che segue si riportano le principali caratteristiche dei metodi di valutazione del rischio.

Metodo	Ambito di applicazione	Zonazione	Valutazione economica	Valutazione in termini di perdita di vite umane	Analisi Costi/Benefici
QRA - Corominas/Fell et al.	Generale - Scala locale	Quantitativa		X	
QRA - Agliardi et al.	Generale - Scala locale	Quantitativa	X	X	X
Risk Plan	Generale - Scala locale	Quantitativa	X		X
Ro.M.A. ¹⁾	Infrastrutture stradali - Scala locale e regionale	Quantitativa		X	
IMIRILAND	Generale - Scala locale e regionale	Semi-quantitativa			
Prina et al., 2004	Infrastrutture stradali - Scala locale e regionale	Semi-quantitativa			

Nota I metodi contrassegnati da (*) sono applicabili sia a scala locale che regionale.

Le semplificazioni a carattere conservativo che si possono fare nella valutazione del rischio da caduta massi sono le seguenti:

- 1) Per la valutazione del rischio si considera lo scenario di danno individuale più grave (perdita di vita umana), assumendo che l'evento abbia un'altissima probabilità di causare la perdita di vita dell'individuo (definito nella letteratura scientifica come fatalità).
- 2) Il rischio di decesso è espresso come perdite di vite umane/anno per individuo esposto.

A.4 **Esempio di valutazione del rischio da caduta massi su un ambito territoriale urbanizzato**

Nel presente punto si riporta un esempio di valutazione del rischio su un ambito territoriale, eseguita nella realizzazione di opere di difesa da caduta di massi su un'area urbanizzata.

Sulla scorta di quanto esposto ai punti precedenti, il procedimento si articola nelle fasi riportate nei punti A.4.1 e A.4.2.

A.4.1 **Valutazione della pericolosità da caduta di massi prima della realizzazione delle opere di difesa**

La valutazione della pericolosità da caduta di massi prima della realizzazione delle opere di difesa comprende i seguenti passaggi:

- 1) **Studio della dinamica di caduta**, mediante software di analisi traiettografica. Tale studio permette di valutare la probabilità che un blocco delle dimensioni del blocco di progetto possa raggiungere un determinato ambito territoriale. Il valore ottenuto indica solamente la probabilità che un masso delle dimensioni del blocco di progetto raggiunga un determinato punto dell'area indagata, ma nulla dice in merito alla frequenza (o, in termini assoluti, alla probabilità) che si verifichi l'evento di crollo a seguito del quale il blocco raggiunge quel punto (vedere figura A.1);
- 2) **Stima della probabilità d'innescò** del crollo del blocco di progetto. Si può ad esempio ricorrere al metodo dei tempi di ritorno [3]. Questo metodo può essere impiegato in fase di progettazione anche per il calcolo del blocco di progetto delle opere di difesa. La probabilità di innescò del crollo di progetto (P_c), definita al punto 4.1.4 della presente norma è quindi pari a:

$$P_c = n \cdot 10^y \text{ (eventi di crollo/anno)}$$

Il valore di P_c ottenuto rappresenta quindi la probabilità che si verifichi un fenomeno di crollo (crollo di progetto) tale da produrre un blocco di volume pari al blocco di progetto che, come detto, è il volume di riferimento impiegato per il dimensionamento delle opere di difesa.

- 3) **Calcolo della probabilità P_a nell'area relativa agli elementi esposti a seguito del crollo di progetto.** Non è detto che tutti i blocchi prodotti dal crollo di progetto raggiungano l'elemento esposto. Infatti, alcuni potrebbero arrestarsi sul versante a monte, altri potrebbero percorrere una traiettoria che non interseca il sito, ecc.

La probabilità P_a che un blocco lapideo del volume del blocco di progetto raggiunga un qualsiasi punto dell'area bersaglio è in genere inferiore alla probabilità di innesco P_c , se si escludono fenomeni di propagazione secondaria di blocchi instabili presenti sul pendio e mobilizzati dall'impatto di blocchi provenienti dalla zona d'innesco, ed è data dalla formula:

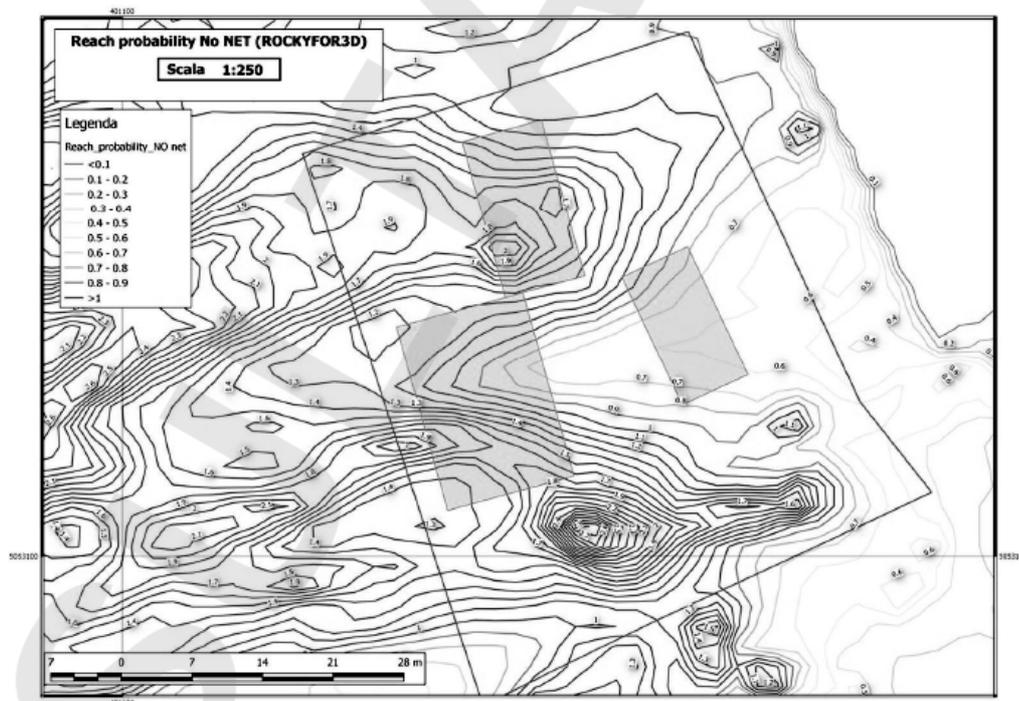
$$P_a = (P_r | P_c) \quad (A.1)$$

dove $P_a \leq P_c$

Secondo il punto 4.1.5, il valore della probabilità di transito P_r , è calcolato sulla base di simulazioni di traiettorie di caduta. Il valore di P_a è quindi variabile in funzione dello spazio.

La distribuzione spaziale di P_a si può rappresentare per tramite di una carta in cui sono calcolate le curve di isoprobabilità (vedere figura A.1). La probabilità è espressa in notazione esponenziale negativa o in valori percentuali.

figura A.1 Esempio di carta della probabilità P_a relativo ad un sito industriale in caso di crollo [10] [11]



Impiegando le comuni funzioni dei software GIS è poi possibile eseguire il passaggio successivo, cioè ottenere la probabilità $P_a = (P_r | P_c)$. A tal fine è sufficiente inserire nel software GIS la formula per il calcolo della probabilità condizionata di cui alla formula (A.1).

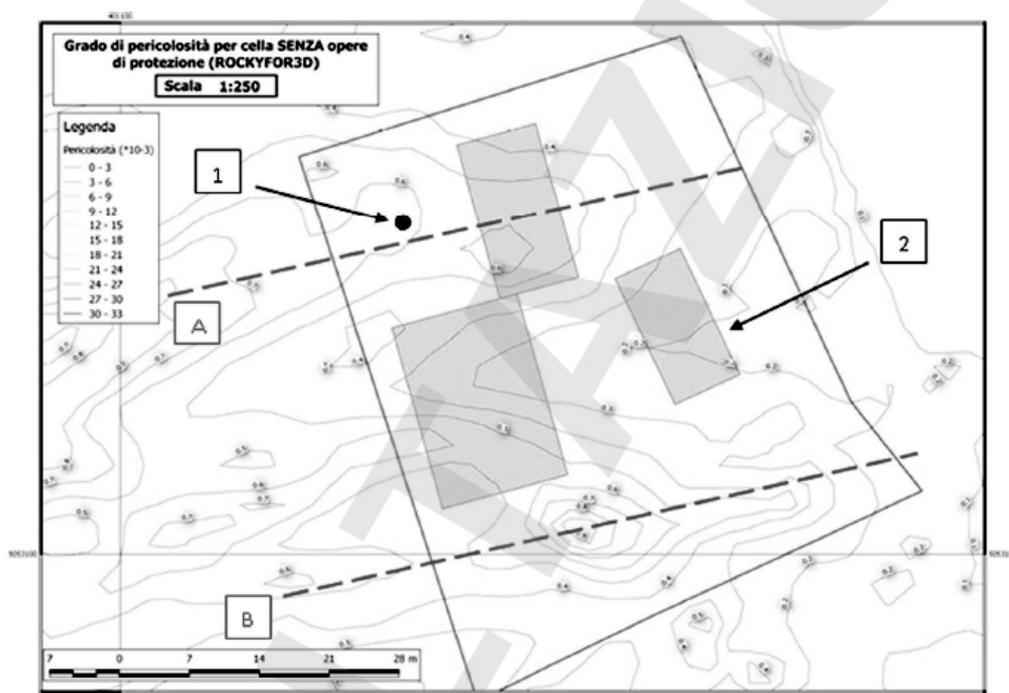
Si ottiene così una carta di pericolosità da caduta di massi relativa al sito analizzato.

Un esempio di tale risultato è mostrato nella figura A.2, che mostra la distribuzione spaziale della pericolosità da caduta massi su un sito urbanizzato ad uso industriale per un determinato volume, relativa al caso di crollo di progetto e in assenza di opere di protezione.

figura A.2 **Carta della pericolosità Pa per caduta di volumi lapidei pari a quello del volume di progetto con tempo di ritorno $T_r=30$ anni⁴⁾**

Legenda

- A Direttrice che insieme alla direttrice B indica le zone a maggiore pericolosità in caso di evento per il tempo di ritorno considerato
- B Direttrice che insieme alla direttrice A indica le zone a maggiore pericolosità in caso di evento per il tempo di ritorno considerato
- 1 Punto a maggior pericolosità dell'area
- 2 Punto a pericolosità minore dell'area



A.4.2 **Valutazione della riduzione della pericolosità da caduta di massi a seguito della realizzazione delle opere di difesa e calcolo del rischio residuo**

Numerosi software commerciali permettono di simulare gli effetti sulle traiettorie e sulle energie dei fenomeni di caduta di massi a valle di una barriera o di un rilevato paramassi in grado di assorbire e dissipare un determinato livello energetico.

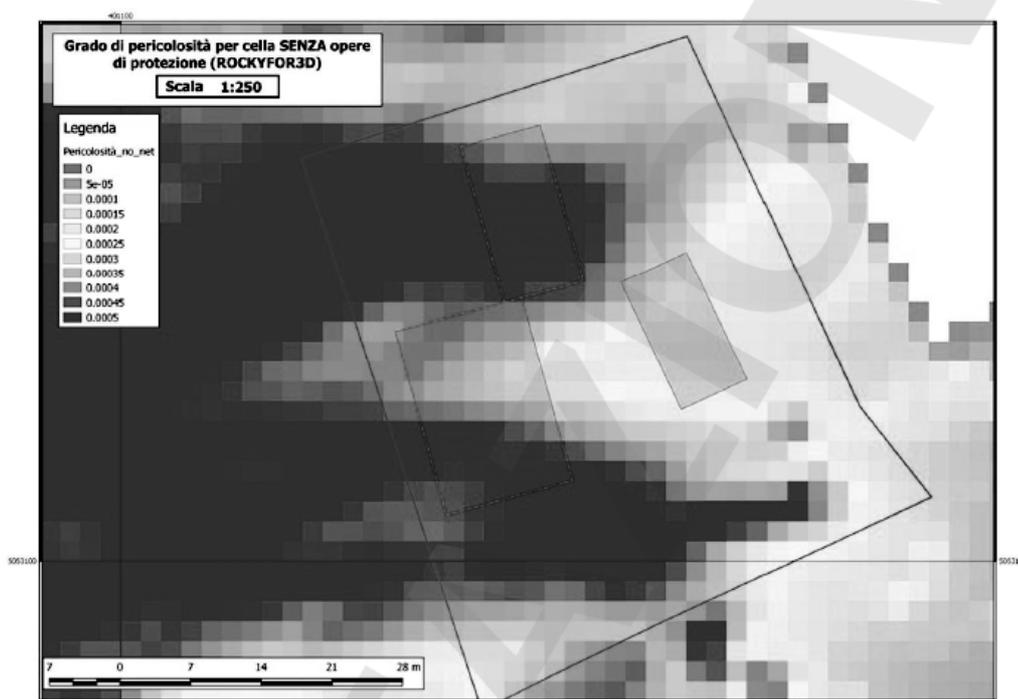
Questa funzionalità, molto utile al fine di valutare l'efficacia degli interventi di mitigazione strutturale, permette anche di calcolare il livello di rischio residuo e la fattibilità degli stessi in termini di analisi costi/benefici.

Il risultato è esposto nella figura A.4, dalla quale si evince che, nel caso di esempio, l'intervento strutturale ha ottenuto un livello di riduzione della pericolosità rispetto alla situazione senza opere di mitigazione del rischio, con la riduzione della probabilità di Pr, in caso di evento, da $P=10^{-4}$ a $P=10^{-5}$.

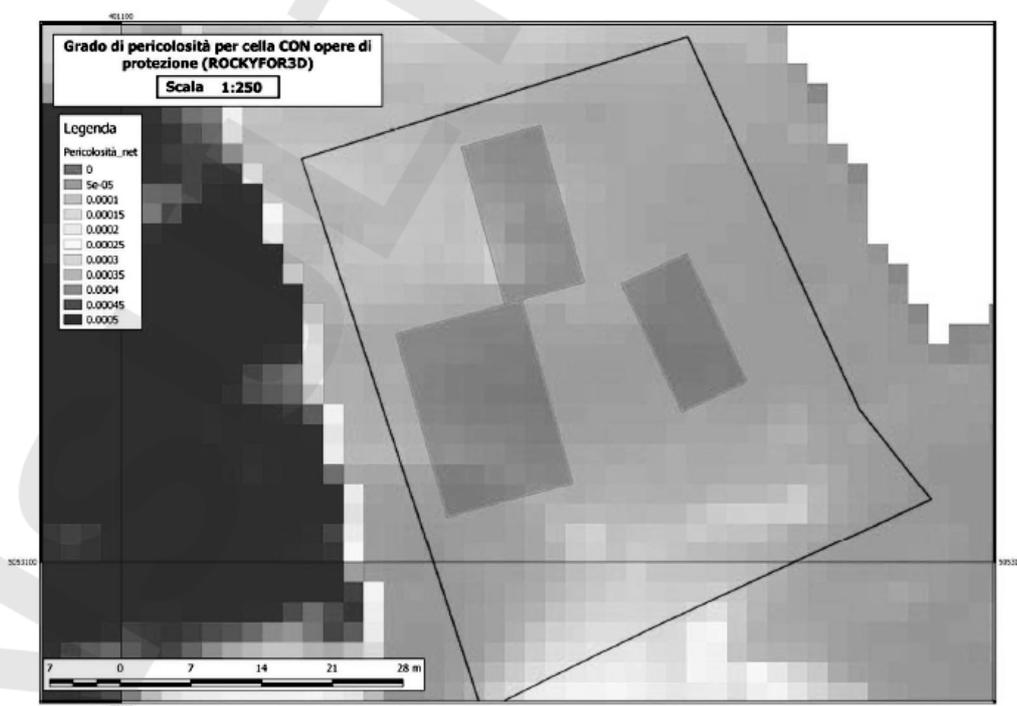
Il risultato è meglio apprezzabile con la tipologia di *rendering* adottata e mettendo a confronto la situazione ante-intervento con la situazione post-intervento (vedere figura A.3).

4) In sede di progettazione, nel caso di barriere paramassi, per l'individuazione del volume del blocco di progetto si può decidere di inserire un tempo di ritorno pari a 25 anni, periodo che coincide con la vita tecnica di una barriera paramassi. Nel caso specifico, i progettisti hanno deciso, in un'ottica conservativa, di scegliere un tempo di ritorno pari a 30 anni, sulla base di quanto indicato per le Alpi Pennine nella metodologia MATTEROCK [22], poiché questo valore corrisponde al limite superiore della zona ad elevata pericolosità, caratterizzata da tempi di ritorno tra 0 e 30 anni. In questo caso, quindi, il volume del blocco di progetto risulta superiore a quello che si avrebbe con $T_r=25$ anni (4 m^3 contro 2.8 m^3).

figura A.3 Carte di pericolosità prima (a) e dopo l'intervento (b) di mitigazione del rischio da caduta di massi, realizzato mediante installazione di barriera paramassi da 8000 kJ



(a)



(b)

Il calcolo del rischio residuo si esegue inserendo gli elementi esposti nelle varie zone della carta di pericolosità residua tenendo conto, in questo caso, che, con riferimento alla formula (1) esposta al punto 4, la vulnerabilità (V) dei soggetti esposti a rischio e delle strutture e degli altri beni materiali viene conservativamente assunta pari al massimo valore $V=1$. La formula (1) diventa quindi la formula (A.2)

$$R_s = H \times E \quad (A.2)$$

Con E = tempo di esposizione al pericolo, che assume valore pari a 1 per individui che si trovano all'aperto e può essere inferiore a 1 per individui esposti occasionalmente al pericolo come, ad esempio, individui che si trovano all'interno di fabbricati o, ad esempio, automezzi in transito su strade, ecc.

Anche il valore della vulnerabilità può essere ridotto mediante studi specifici, al fine di ridurre il rischio residuo.

Si ottiene quindi una carta del rischio come quella di figura A.4. In tale carta, la zona con campitura a tratteggio orizzontale rappresenta tutta l'area in cui il rischio da caduta di massi è pari o minore di 10^{-4} . Con tale rappresentazione, si possono immediatamente individuare le zone a maggior pericolosità del sito, e definire le priorità d'intervento per la mitigazione del rischio residuo con misure integrative alla realizzazione delle opere di difesa.

Nel caso specifico, nelle zone a maggior pericolosità (per esempio il punto 1 di figura A.2), si può ridurre la presenza giornaliera degli individui all'aperto e procedere ad interventi di rinforzo strutturale del lato Ovest del fabbricato posto nel settore a Nord del sito.

Infine, l'impiego del diagramma di figura A.5 permette di valutare l'efficacia delle misure adottate sulla riduzione del rischio.

Il diagramma F-N di figura A.5, illustra, infatti, come varia il rischio al quale è esposto un elemento (come, ad esempio, un addetto all'insediamento) che si trovi nel punto 1 della cartina indicata in figura A.2. In questo caso, nel predetto punto (1) il rischio senza opere (R_{no_opere}) è pari a:

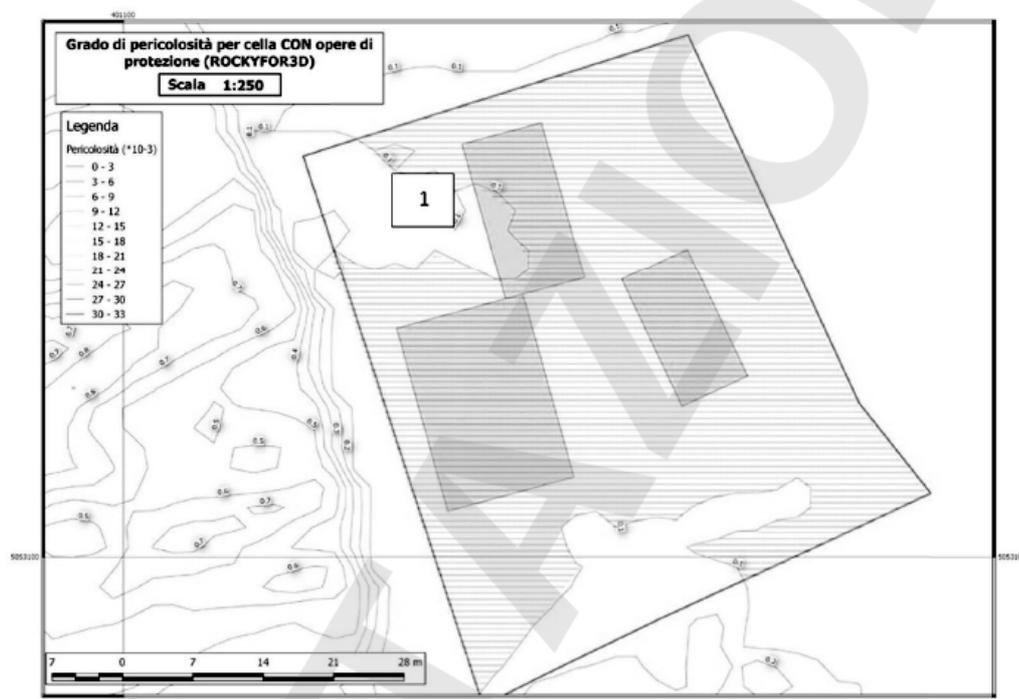
$$R_{s_{no_opere}(1)} = P \cdot V \cdot E = 6,27 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 1 = 6,27 \cdot 10^{-4} \text{ perdite di vite umane/anno} \quad (A.3)$$

Con la realizzazione delle opere strutturali si ottiene che la pericolosità nel punto 1 diminuisce da 5 a 6 volte mentre nel resto dell'area diminuisce in media di quasi un ordine di grandezza.

figura A.4 **Carta della pericolosità per caduta di volumi lapidei pari al blocco di progetto, e tempo di ritorno $T_r=30$ anni ad opere realizzate**

Legenda

-  Rappresenta zone con pericolosità nel range dell'ordine di grandezza 10^{-4} o inferiore
-  Rappresenta aree a maggiore pericolosità, con valori compresi tra $R_s=1 \cdot 10^{-4}$ e $R_s=2 \cdot 10^{-4}$



Assumendo il valore $P_{opere_sito} = 1,29 \cdot 10^{-4}$, nel punto 1 della figura A.4 la formula A.3 diviene:

$$R_{s_opere(1)} = P_{opere(punto\ 1)} \cdot V \cdot E = 1,29 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 1 = 1,29 \cdot 10^{-4} \text{ perdite di vite umane/anno} \quad (A.4)$$

E, negli altri punti nella zona Est del sito, indicata con un tratteggio nella figura A.4:

$$R_{s_opere(sito)} = P_{opere(sito)} \cdot V \cdot E = 1,0 \div 9,9 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 1 = 1,0 \div 9,9 \cdot 10^{-5} \text{ perdite di vite umane/anno} \quad (A.5)$$

Quindi, malgrado la realizzazione delle opere di difesa, la riduzione del rischio residuo è consistente ma non è ancora sufficiente a far rientrare nel campo del rischio accettabile tutta la zona esposta.

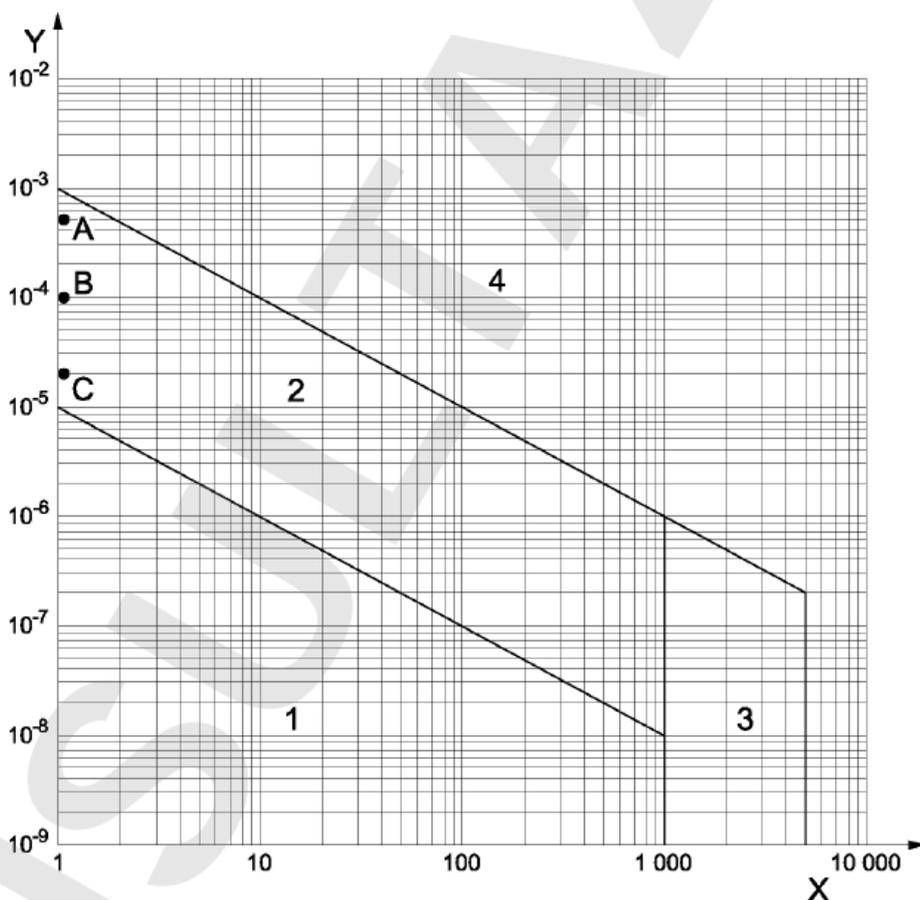
Si decide, quindi, d'intervenire con misure gestionali per un'ulteriore riduzione del rischio, ad esempio con il rinforzo strutturale del fabbricato nel settore più a rischio, combinato con misure organizzative per la riduzione dei tempi di presenza degli individui nella zona.

Il diagramma di figura A.5 fornisce, quindi, ulteriori indicazioni in merito al numero massimo di individui (addetti) che possono essere contemporaneamente presenti in un determinato punto dell'area esaminata, senza che il loro rischio collettivo ecceda il limite di rischio accettabile.

Grafico F-N indicante i livelli di rischio (vedere punto 6 nel quale sono indicati i valori di rischio ai quali si trova esposto un elemento a rischio, ad esempio un addetto all'insediamento, che si colloca nel punto 1 di figura A.4)

Legenda

- X Numero di decessi (N); o "numero di vittime" preferirei decessi perchè la vittima potrebbe anche essere un ferito grave che non è il nostro caso
- Y Frequenza di N o più decessi per anno
- 1 Regione (o campo, o zona) del rischio accettabile
- 2 Regione "ALARP" "As Low As Reasonably Practicable cioè tradotto regione del rischio più basso ragionevolmente ottenibile
- 3 Regione del rischio associato ad eventi catastrofici
- 4 Regione del rischio Non Accettabile
- A Livello di rischio nel punto 1 di figura A.4 in assenza di opere di difesa
- B Livello di rischio nel punto 1 di figura A.4 in presenza di opere di difesa ma con permanenza costante
- C Livello di rischio nel punto 1 di figura A.4 in presenza di opere di difesa ma con esposizione al pericolo di 6 ore al giorno per 6 gg./settimana



Se poi si inserisce nel calcolo l'effettivo tempo di esposizione al rischio, si calcola il numero di ore annue cui è esposto l'individuo. Ad esempio, per un'esposizione pari a 6 ore al giorno per 6 giorni settimanali su 52 settimane/anno, si ha per risultato un'esposizione effettiva al rischio calcolata in ore/anno pari a:

$$E_{\text{eff}} = 1872/8760 = 2,14 \cdot 10^{-1} \tag{A.6}$$

Introducendo quindi l'esposizione effettiva di un individuo (A.6) nella formula (A.4) si ottiene:

$$R_{\text{eff}(1)} = P_{\text{opere}(1)} \cdot V \cdot E_{\text{eff}} = 1,29 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 2,14 \cdot 10^{-1} = 2,76 \cdot 10^{-5} \tag{A.7}$$

Mentre per le zone ad Est si sostituisce il valore ottenuto nella formula A.5, ottenendo:

$$R_{\text{eff(sito)}} = P_{\text{opere(sito)}} * V * E_{\text{eff}} = [(6,75) * 10^{-5} \div (1,29) * 10^{-4}] * 1 * 2,14 * 10^{-1} = 1,44 \div 2,76 * 10^{-5} \quad (\text{A.8})$$

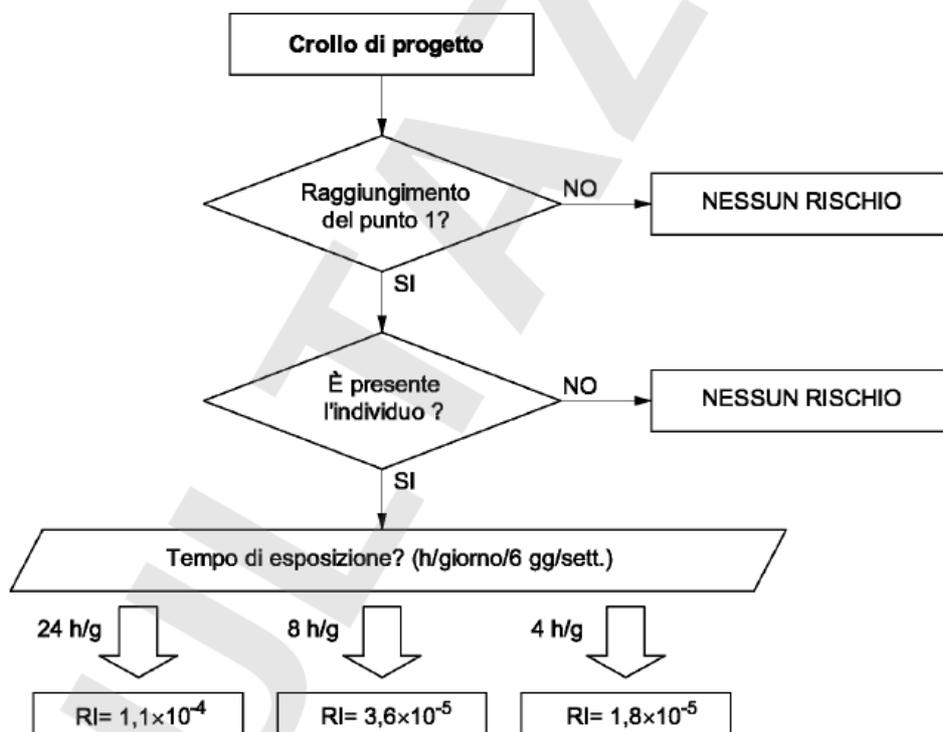
Risulta, quindi, che il rischio viene ridotto se i tempi di esposizione al rischio (vale a dire gli orari di lavoro o di frequentazione) nelle diverse zone del sito sono opportunamente modulati oppure integrati con altre misure.

Per quanto invece riguarda l'esposizione al pericolo dei beni materiali (immobili), si eseguono calcoli di natura economica.

Lo schema di figura A.6 indica alcune possibilità di riduzione del rischio per diversi tempi di esposizione. Sempre con l'impiego di strumenti GIS è possibile produrre carte di rischio in funzione del tempo di esposizione. Analoghe valutazioni possono essere fatte per il traffico stradale o altre tipologie di attività umane esposte al rischio di caduta di massi.

figura A.6

Diagramma di flusso che visualizza la concatenazione di eventi che produce la situazione di rischio per caduta massi nel punto 1 di figura 4 in presenza di opere di difesa



Nota Sono riportati a titolo esemplificativo 3 output di rischio, secondo il tempo di esposizione al rischio di un individuo che staziona nel punto 1 dell'area indagata.

B.1

Generalità

La presente appendice approfondisce il concetto di vulnerabilità nell'ambito del rischio idrogeologico, proponendo al contempo un esempio di metodologia per la valutazione del rischio correlato a fenomeni di caduta massi che interessano gli edifici e le persone al loro interno.

La vulnerabilità si intende come la propensione dell'elemento esposto a subire un danno di un determinato livello, a fronte di un determinato evento.

La vulnerabilità è una funzione dell'intensità del fenomeno, del tipo di elemento a rischio, della sua collocazione rispetto al fenomeno e della presenza di eventuali opere di protezione.

Nel caso di manufatti, quali edifici e infrastrutture, la vulnerabilità corrisponde all'entità economica del danno rapportata al valore di costruzione o di mercato, mentre nel caso della popolazione, la vulnerabilità coincide con la probabilità che una persona perda la vita a seguito del danneggiamento dell'edificio coinvolto dal fenomeno franoso.

Nello specifico, il danno costituisce la valutazione delle lesioni o perdite conseguenti al verificarsi di un determinato evento, mentre la vulnerabilità esprime una propensione dell'elemento esposto a subire un danno legato ad un evento non ancora verificatosi.

B.2

Vulnerabilità degli edifici

L'identificazione e la mappatura degli edifici esposti a fenomeni franosi sono attività fondamentali che forniscono uno dei principali dati spaziali richiesti per la valutazione del rischio, che rappresenta lo strumento per una corretta pianificazione delle priorità di intervento, come illustrato nel punto 5 della norma.

La valutazione della vulnerabilità degli edifici richiede infatti un approccio multi-disciplinare in virtù delle numerose variabili che concorrono alla sua quantificazione quali ad esempio la definizione delle caratteristiche intrinseche degli elementi a rischio e la loro esposizione spaziale e temporale, la definizione della risposta strutturale di ciascun elemento che costituisce la struttura, l'affidabilità e la disponibilità delle informazioni a disposizione.

I metodi di valutazione della vulnerabilità e dei possibili danni possono essere di tipo deterministico o probabilistico in funzione dell'accuratezza e del formato dei dati di ingresso.

Nel caso degli edifici, il danno atteso può essere ridotto mediante soluzioni progettuali che determinino una riduzione della vulnerabilità oppure attraverso la realizzazione di interventi strutturali di tipo passivo che riducano sia l'esposizione che la pericolosità.

La valutazione della vulnerabilità degli edifici rispetto a fenomeni franosi, indipendentemente dall'intensità del fenomeno, dovrebbe essere condotta specificamente per ogni singolo edificio esposto al rischio, in quanto non risulta possibile prevedere regole specifiche per tutte le tipologie costruttive esistenti.

Ai fini della suddetta valutazione, si dovrebbe quindi definire un modello di riferimento che analizzi il comportamento strutturale atteso dell'edificio, anche in relazione ai seguenti aspetti:

- Analisi storico-critica che ricostruisce il processo di realizzazione dell'edificio a partire dall'anno di costruzione e dai criteri di progettazione adottati, nonché lo stato di conservazione e le attività di manutenzione eseguite nel corso del tempo.
- Tecnologia costruttiva: per esempio costruzioni in muratura, in cemento armato o in acciaio, costruzioni miste.
- Caratteristiche dei materiali impiegati.

Le conseguenze su un edificio possono essere valutate combinando:

- la probabilità annuale di accadimento dell'evento di una determinata intensità;
- la probabilità di caduta massi in una posizione specifica (distanza di arresto e altezze di rimbalzo);
- la probabilità di collisione con elementi strutturali e/o elementi non strutturali dell'edificio, mediante considerazioni geometriche;
- la risposta locale dei componenti interessati con possibilità di propagazione del danno con conseguente collasso globale;
- il numero di persone coinvolte;
- la destinazione d'uso dell'edificio.

B.2.1 Conseguenze sulle persone

Per quanto attiene alle conseguenze sulle persone, occorre fare riferimento alla probabilità che una o più persone all'interno di un edificio possano essere coinvolte da un evento di caduta massi.

Al fine di quantificare il rischio, dovrebbero essere valutati i seguenti parametri:

- frequenza di accadimento del fenomeno franoso;
- probabilità di raggiungimento dell'elemento a rischio;
- caratteristiche geometriche dell'edificio (numero di piani, area totale dell'edificio, distribuzione interna degli spazi, dimensioni delle camere);
- vulnerabilità della persona;
- probabilità temporale di esposizione al rischio delle persone, espresso come il numero medio di ore al giorno che una persona trascorre all'interno dell'edificio moltiplicato per il numero di giorni all'anno che lo stesso viene occupato;
- probabilità spaziale di esposizione al rischio delle persone, espresso come la probabilità che una persona all'interno dell'edificio possa essere colpita e uccisa per l'impatto diretto con il masso o a seguito di un collasso (parziale o totale) dell'edificio provocato dall'impatto.

B.2.2 Conseguenze economiche

La quantificazione delle conseguenze economiche è condotta con le comuni procedure di estimo.

B.2.3 Valutazioni sull'impatto locale e globale

Per quanto riguarda gli edifici, la vulnerabilità può assumere diversi valori in funzione del danno atteso [12].

Nel prospetto B.1 sono riportati in via indicativa alcuni intervalli di valori per diverse tipologie di danno atteso.

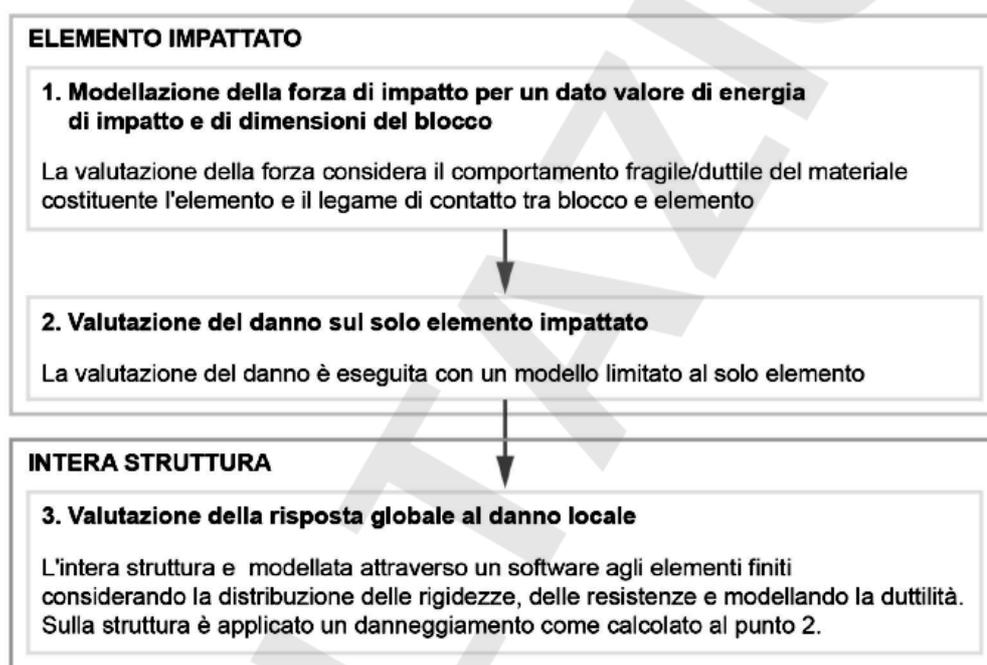
prospetto B.1 Valore del parametro di vulnerabilità su edifici in funzione del danno atteso

Tipo danno atteso	Vulnerabilità
Danno lieve su elementi non strutturali. Nessun problema alla stabilità della costruzione. Vi è la possibilità di avere dell'arredamento interessato da scaglie di blocco.	V = 0.01 - 0.1
Fessurazioni dei muri, le quali non compromettono, però, la stabilità della costruzione. Riparazioni necessarie ma non urgenti.	V = 0.2 - 0.3
Deformazioni dovute ad uno stato fessurativo diffuso. La stabilità è compromessa. Le porte e le finestre non sono utilizzabili e l'evacuazione dello stabile è necessaria.	V = 0.4 - 0.6
Stato fessurativo esteso, comportante il distacco di parti di struttura. Crolli dei solai di piano e bracce nelle murature. Evacuazione immediata. La possibilità di recupero (senza demolizione) risulta difficile.	V = 0.7 - 0.8
Collasso da parziale a totale che necessita una totale ricostruzione.	V = 0.9 - 1.0

L'impatto su un componente strutturale può provocare un danno locale, che può propagarsi e causare il collasso globale della struttura, mentre un impatto su un componente non strutturale può indurre un danno locale, che non può propagarsi.

La possibilità che si verifichi il collasso parziale o globale della struttura è quindi funzione, ad esempio dell'organizzazione strutturale e della forma dell'edificio, in particolare della tipologia e disposizione degli elementi resistenti (materiali, caratteristiche meccaniche e geometriche), della tipologia e dell'orditura dei solai e della possibilità di trasferire i carichi, della presenza di accorgimenti che conferiscano un'adeguata duttilità alla struttura, come riportato nella figura B.1.

figura B.1 **Approccio per lo studio della risposta strutturale a seguito dell'impatto**



La forza di impatto trasmessa dal corpo impattante (ossia il blocco lapideo) al corpo impattato (ossia l'elemento della costruzione) durante l'urto dipende fortemente dalle caratteristiche dei materiali e dalla rigidità del corpo impattato.

L'effetto sull'elemento strutturale direttamente impattato può essere valutato sia in maniera analitica, sia in maniera numerica.

Il modello analitico fornisce la risposta precisa della struttura al danno locale.

I modelli numerici sono invece necessari quando la geometria dell'elemento non è facilmente riconducibile a schemi "classici" e quando i materiali in opera hanno particolari proprietà meccaniche.

B.3 **Esempio di metodologia di valutazione del rischio**

Nell'ambito degli approcci probabilistici per la valutazione del rischio di caduta massi sugli edifici si suggerisce l'applicazione di metodi basati sull'albero degli eventi [13] che consistono nel definire e valutare tutte le possibili evoluzioni di un dato fenomeno a partire da un singolo evento iniziatore. Nel caso in esame, si analizza l'effetto locale dell'urto di un blocco che impatta sulla superficie esterna dell'edificio e la propagazione di danni con conseguente crollo locale/globale.

Partendo dall'accadimento dell'evento iniziatore (impatto sulla superficie esterna), sono analizzati tutti i possibili scenari (detti percorsi), mappati come rami di un albero connessi mediante nodi. I singoli rami permettono la transizione da un nodo all'altro lungo il percorso, definendo alternative a cui è associata una probabilità di accadimento, fino al raggiungimento dello stato o effetto finale. I percorsi costruiti, mutuamente esclusivi, sono causati dal contemporaneo verificarsi di tutti gli eventi appartenenti ai rami dell'albero che

li definiscono. Pertanto, considerando quindi un unico percorso, che conduce quindi ad un unico esito (scenario), la sua probabilità di accadimento è data dal prodotto delle probabilità associate ad ogni ramo di tale percorso.

Si assume che un blocco in caduta possa colpire la parete (esposta a monte) o la copertura di un edificio situato alla base di un versante soggetto a fenomeni di caduta di massi.

A ciascuno scenario possono essere inoltre assegnate conseguenze economiche e/o sociali (vedere figura B. 2).

È dunque possibile calcolare il rischio totale quale prodotto tra la somma (pesata) delle suddette conseguenze e la probabilità spaziale e temporale di accadimento del fenomeno franoso.

Ai fini della valutazione del rischio in termini di conseguenze dell'impatto di un blocco lapideo su una costruzione, si procede all'esecuzione di un accurato studio della dinamica di caduta massi e alla definizione della probabilità associata a ciascun potenziale volume roccioso unitario in alternativa del valore del blocco di progetto scelto.

Al fine di una completa valutazione del rischio, è inoltre opportuno introdurre nell'analisi il dato temporale, ovvero la frequenza media annua di accadimento di un crollo di un dato volume.

Lo studio traiettografico ha lo scopo di fornire una valutazione delle possibili altezze di volo e dell'energia cinetica posseduta dai blocchi nel punto in cui è localizzata la costruzione.

In base all'ubicazione dell'edificio rispetto al fenomeno di caduta massi, alcune traiettorie possono intercettare il fabbricato. Le rimanenti, ossia quelle relative a blocchi arrestati a monte o aventi altezza di volo superiore non intercettano il fabbricato e sono una percentuale, indicata con p_{ni} , delle simulazioni traiettografiche totali.

In riferimento alle traiettorie che insistono sul fabbricato, viene indicata con p_v la percentuale dei blocchi che potenzialmente colpiscono la facciata di monte del fabbricato; in maniera analoga, viene indicata con p_t la percentuale dei blocchi che potenzialmente colpiscono la copertura del fabbricato. Risulta, quindi, che:

$$p_v + p_t + p_{ni} = 1$$

B.3.1

Effetti della collisione contro componenti strutturali e non strutturali

Per ciascuna componente di una struttura potenzialmente interessata dall'impatto di un blocco, la risposta strutturale è elastica, plastica o con rottura dell'elemento.

Gli effetti dell'interazione tra la componente e il blocco impattante dipendono da un grande numero di variabili.

La risposta dell'elemento al danno è valutata associando un valore di probabilità a ciascuna delle tre risposte strutturali (elastica, plastica, rottura) a seconda sia della dimensione del blocco e della sua energia cinetica all'impatto, sia delle caratteristiche meccaniche e geometriche dell'elemento impattato.

L'approccio probabilistico è quello più complesso, ma al contempo più completo, in quanto è possibile considerare, ad esempio, la posizione del punto di impatto in maniera statistica.

In generale, si può supporre che il danno possa propagarsi qualora l'elemento sia plasticizzato oppure rotto.

Pertanto, a una risposta plastica dell' i -esima componente strutturale è possibile associare una probabilità di collasso globale p_{ipc} . Analogamente, a una rottura dell' i -esimo componente è possibile associare una probabilità di collasso globale p_{ifc} . In caso di rottura (o plasticizzazione) di una componente non strutturale non è possibile che si generi un collasso globale.

B.3.2

Scenari di danno

I differenti scenari di danno sono indicati nel diagramma ad albero di figura B.2.

Per ciascuna componente strutturale, sono identificati cinque scenari di danno.

Questi sono indicati con le sigle e , p_c , p_c^- , f_c , f_c^- , a segnalare rispettivamente risposta elastica, risposta plastica a cui segue un collasso, risposta plastica a cui non segue un collasso, rottura a cui segue un collasso, rottura a cui non segue un collasso.

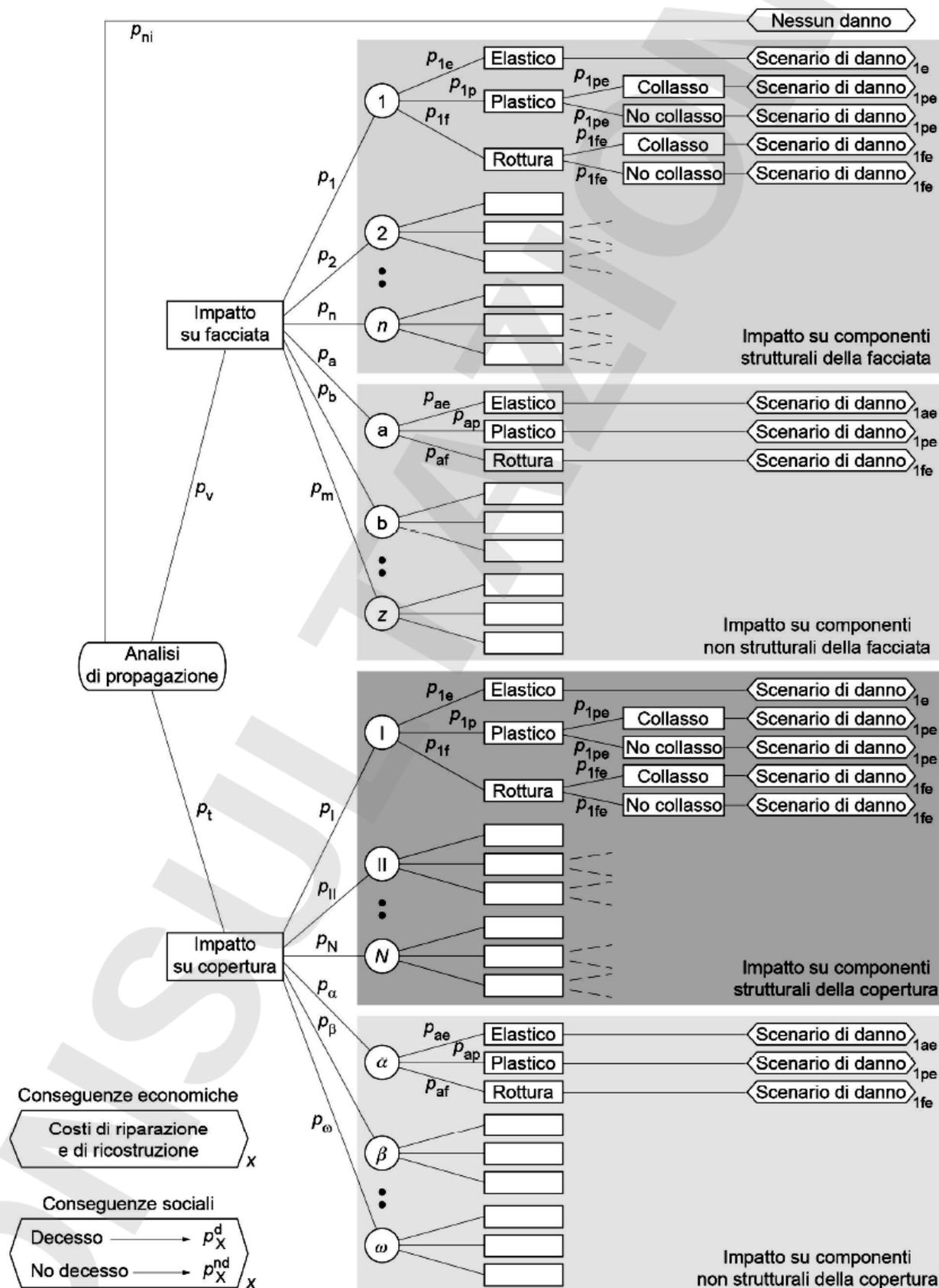
Per ciascuna componente non strutturale sono identificati solo tre scenari di danno.

Questi sono indicati con le sigle e , p e f , a segnalare rispettivamente risposta elastica, risposta plastica e rottura.

Analogamente si opera per la copertura (terzo e quarto riquadro di figura B.2).

La probabilità di accadimento di ciascuno scenario è ottenuta dal prodotto delle probabilità condizionate di ciascun evento lungo il diagramma ad albero (da sinistra verso destra in figura B.2).

figura B.2 Schema per la valutazione del rischio nelle costruzioni



Nota Nelle singole probabilità, i numeri (1, 2...n) e le lettere dell'alfabeto latino (a, b...z) si riferiscono rispettivamente alle componenti strutturali e non strutturali della facciata; le lettere maiuscole e le lettere dell'alfabeto greco si riferiscono rispettivamente alle componenti strutturali e non strutturali della copertura.

Il prospetto B.2 riporta le probabilità p_x associate a ciascuno scenario precedentemente identificato.

prospetto B.2 **Probabilità associate a ciascuno scenario dell'albero degli eventi**

Impatto sulla facciata

Scenario, X		Probabilità associata, p_x			
1e	p_v	p_1	p_{1e}	$p_v p_1 p_{1e}$	
1pc			p_{1p}	p_{1pc}	$p_v p_1 p_{1p} p_{1pc}$
$1\bar{p}\bar{c}$				$p_{1p\bar{c}}$	$p_v p_1 p_{1p} p_{1p\bar{c}}$
1fc			p_{1f}	p_{1fc}	$p_v p_1 p_{1f} p_{1fc}$
$1\bar{f}\bar{c}$				$p_{1f\bar{c}}$	$p_v p_1 p_{1f} p_{1f\bar{c}}$
Ae	p_a	p_{ae}	$p_v p_a p_{ae}$		
Ap		p_{ap}	$p_v p_a p_{ap}$		
Af		p_{af}	$p_v p_a p_{af}$		

Impatto sulla copertura

Scenario, X		Probabilità associata, p_x			
1e	p_t	p_1	p_{1e}	$p_t p_1 p_{1e}$	
1pc			p_{1p}	p_{1pc}	$p_t p_1 p_{1p} p_{1pc}$
$1\bar{p}\bar{c}$				$p_{1p\bar{c}}$	$p_t p_1 p_{1p} p_{1p\bar{c}}$
1fc			p_{1f}	p_{1fc}	$p_t p_1 p_{1f} p_{1fc}$
$1\bar{f}\bar{c}$				$p_{1f\bar{c}}$	$p_t p_1 p_{1f} p_{1f\bar{c}}$
αe	p_α	$p_{\alpha e}$	$p_t p_\alpha p_{\alpha e}$		
αp		$p_{\alpha p}$	$p_t p_\alpha p_{\alpha p}$		
αf		$p_{\alpha f}$	$p_t p_\alpha p_{\alpha f}$		

Dalle precedenti espressioni risulta che la sommatoria delle probabilità associate a tutti gli scenari p_x e di p_{ni} è pari a 1:

$$\sum_x p_x + p_{ni} = p_v + p_t + p_{ni} = 1$$

Il termine $\sum_x p_x = p_v + p_t$ è la probabilità che la costruzione sia interessata dall'evento.

B.4 Valutazione del rischio

Ad ogni scenario di danno possono essere associate delle conseguenze sociali ed economiche.

La conseguenza sociale (s_x) associata ad un dato scenario, ovvero la probabilità di perdita di vite umane, è funzione di energia (E) e dimensione del blocco (r_b):

$$s_x = s_x(E, r_b)$$

Dalle precedenti considerazioni, le conseguenze sociali totali $S(E, r_b)$ conseguenti all'impatto di un blocco lapideo caratterizzato da una dimensione r_b ed un'energia di impatto E sono pari alla sommatoria dei prodotti tra la probabilità di decesso (s_x) associata a ciascuno scenario di danno e la probabilità di accadimento dello stesso (p_x), ossia:

$$s(E, r_b) = \sum_x s_x p_x$$

Analogo discorso può essere fatto per le conseguenze economiche: la conseguenza c_x relativa è funzione di energia e dimensione del blocco:

$$c_x = c_x(E, r_b)$$

La conseguenza totale $C(E, r_b)$ associata all'impatto di un blocco caratterizzato da un raggio r_b ed un'energia di impatto E è pari alla sommatoria dei prodotti tra le conseguenze economiche associate a ciascun scenario di danno (c_x) e le probabilità di accadimento dello stesso (p_x), ossia:

$$C(E, r_b) = \sum_x c_x p_x$$

Nel caso in cui fosse possibile associare una distribuzione probabilistica all'energia e definire una legge delle occorrenze per i volumi unitari, le conseguenze sociali Φ ed economiche Γ totali a seguito dell'evento di caduta massi sarebbero espresse come:

$$\Phi = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} S(E, r_b) p(E, r_b) \frac{1}{p(r_b)} dE dr_b$$

$$\Gamma = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} C(E, r_b) p(E, r_b) \frac{1}{p(r_b)} dE dr_b$$

dove $p(E, r_b)$ è la densità di probabilità associata ad un'energia di impatto E , che dipende dal volume unitario, e $p(r_b)$ è il tempo di ritorno [14] del blocco avente dimensione r_b .

C.1

Criteria generali per la valutazione del danno atteso su un'infrastruttura lineare

Sulle infrastrutture di tipo lineare la valutazione del rischio considera sia i potenziali danni diretti che quelli indiretti. Il peso di questi ultimi risulta spesso determinante per la decisione di intervenire a mitigare un pericolo idrogeologico. Mentre la stima dei danni diretti per un tratto di infrastruttura può essere rapida, quella dei danni indiretti è quasi sempre molto difficoltosa e spesso richiede oneri eccessivi per lo scopo dell'analisi.

L'analisi dei danni indiretti perciò si concentra nell'individuare le principali conseguenze di un'eventuale interruzione della rete nel tratto interessato dal dissesto.

In generale i danni indiretti di un'interruzione di un tratto di una infrastruttura lineare sono i seguenti:

- 1) isolamento di singole unità abitative, nuclei urbani di diverse dimensioni o centri strategici;
- 2) aumento dei costi per la percorrenza del tratto attraverso percorsi alternativi;
- 3) aumento dei tempi di percorrenza e conseguenti perdite economiche;
- 4) perdita di introiti del gestore delle infrastrutture a pedaggio o del gestore di attività strategiche e turistiche.

Per il calcolo delle variazioni dei tempi e dei costi di percorrenza di una determinata tratta si può usare, se disponibile, il grafico dell'infrastruttura con una matrice origine/destinazione ove sia possibile stimare il tipo di utenze, la loro destinazione e le perdite economiche che ne conseguono [15].

In ambito di pianificazione, o in sede di progettazioni puntuali, in mancanza di dati approfonditi, si possono utilizzare funzioni specifiche o metodi statistico-euristici o metodologie di supporto decisionale.

In ambito progettuale, su un'infrastruttura, un'analisi costi/benefici è indispensabile per decidere se intervenire e quale intervento eseguire (vedere punto 6.2).

L'efficacia economica di un intervento di mitigazione EC si definisce come:

$$EC = \Delta R / C_p$$

dove:

ΔR = beneficio in termini economici = differenza tra rischio prima del provvedimento e rischio dopo il provvedimento

C_p = costi annui del provvedimento, che comprendono:

- costi d'investimento: costi di ammortamento e interessi;
- costi correnti: costi d'esercizio, manutenzione e ripristino.

Quando $EC \geq 1$ l'intervento di mitigazione del rischio risulta efficace.

C.2

Valutazione della probabilità di lesioni o perdita della vita umana

È possibile valutare la probabilità che su una infrastruttura lineare avvengano eventi che causano lesioni o perdite di vita umana considerando la densità del traffico veicolare e l'ampiezza dell'evento di caduta massi.

La densità veicolare P_j , espressa come numero di veicoli /km, è calcolata come:

$$P_j = (TGM/24) \times v$$

dove:

v = velocità media nella tratta, espressa in km/ora;

$TGM/24$ = Traffico medio orario (veicoli /ora).

Il numero di veicoli potenzialmente coinvolti dall'evento di caduta massi (N_v) è funzione della densità veicolare (P_j) e della possibile area di impatto dell'evento atteso (vedere figura C.1).

figura C.1

Lunghezza della tratta potenzialmente investita

Legenda

- 1 Punto di distacco
- 2 Area di impatto



Nella possibile area di impatto è compresa sia l'area di propagazione dell'evento atteso, sia lo spazio di frenata di veicoli non direttamente coinvolti, in base a quanto riportato nelle raccomandazioni della legislazione vigente⁵⁾. Per area di propagazione dell'evento atteso si intende l'area potenzialmente colpita da un singolo evento. Per infrastrutture di trasporto ferroviario, in mancanza di studi specifici sull'impatto, deve essere presa in considerazione l'intera lunghezza del convoglio. Il numero di veicoli coinvolti N_v risulta quindi:

$$N_v = P_j \times L$$

dove:

P_j = densità veicolare (numero di veicoli/km);

L = lunghezza della tratta investita (km).

Il Numero di utenti potenzialmente colpiti per evento (N_U) è pari a:

$$N_U = n \times N_v$$

dove:

n = numero di utenti medio per mezzo di trasporto sulla tratta (occupazione)

N_v = numero di veicoli coinvolti

In Italia mediamente l'occupazione (n) risulta 1,2 in ambito urbano e tra 1,5 e 1,7 in ambito extraurbano.

A seconda del tipo di mezzi che percorrono l'infrastruttura si può considerare l'utilizzo di un coefficiente moltiplicativo di aggravio.

Considerando in via totalmente cautelativa come vittima ogni utente dell'infrastruttura presente nell'area di impatto dell'evento di caduta massi, il numero di perdite di vite umane su base annua per la determinazione del rischio accettabile risulta:

$$N_f = N_U / (Tr)$$

dove

Tr = tempo di ritorno = $1/P_a$ (P_a = probabilità di accadimento)

5) Alla data di pubblicazione della presente norma è in vigore il Decreto Ministeriale 5 novembre 2001, n. 6792 (S.O. n.5 alla G.U. n.3. del 4.1.02) "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

Esempio di definizione di un coefficiente di danno atteso su una rete di infrastrutture di trasporto [16]

Il metodo multicriteriale [17] è un sistema decisionale che permette di ottenere un coefficiente che caratterizza il danno atteso in una scala definita e normalizzata in base al massimo danno previsto nell'intera rete. Tale coefficiente non esprime un valore "assoluto", come per esempio la monetizzazione di tale danno, ma è in grado di differenziare il suo valore sulle varie tratte stradali al fine di redigere una lista di priorità d'intervento.

Il sistema permette di attribuire pesi ai vari fattori che influiscono sull'entità del danno atteso. Tali fattori sono scelti sulla base della loro importanza e della loro reperibilità su tutta la rete stradale in modo omogeneo. Sono inoltre inseriti in un diagramma ad albero che visualizza i rapporti gerarchici e di dipendenza fra gli stessi.

Il fattori principali che caratterizzano il danno atteso sono suddivisibili in danni diretti e danni indiretti.

I danni diretti sono i danni immediati su cose e persone causati direttamente dall'evento:

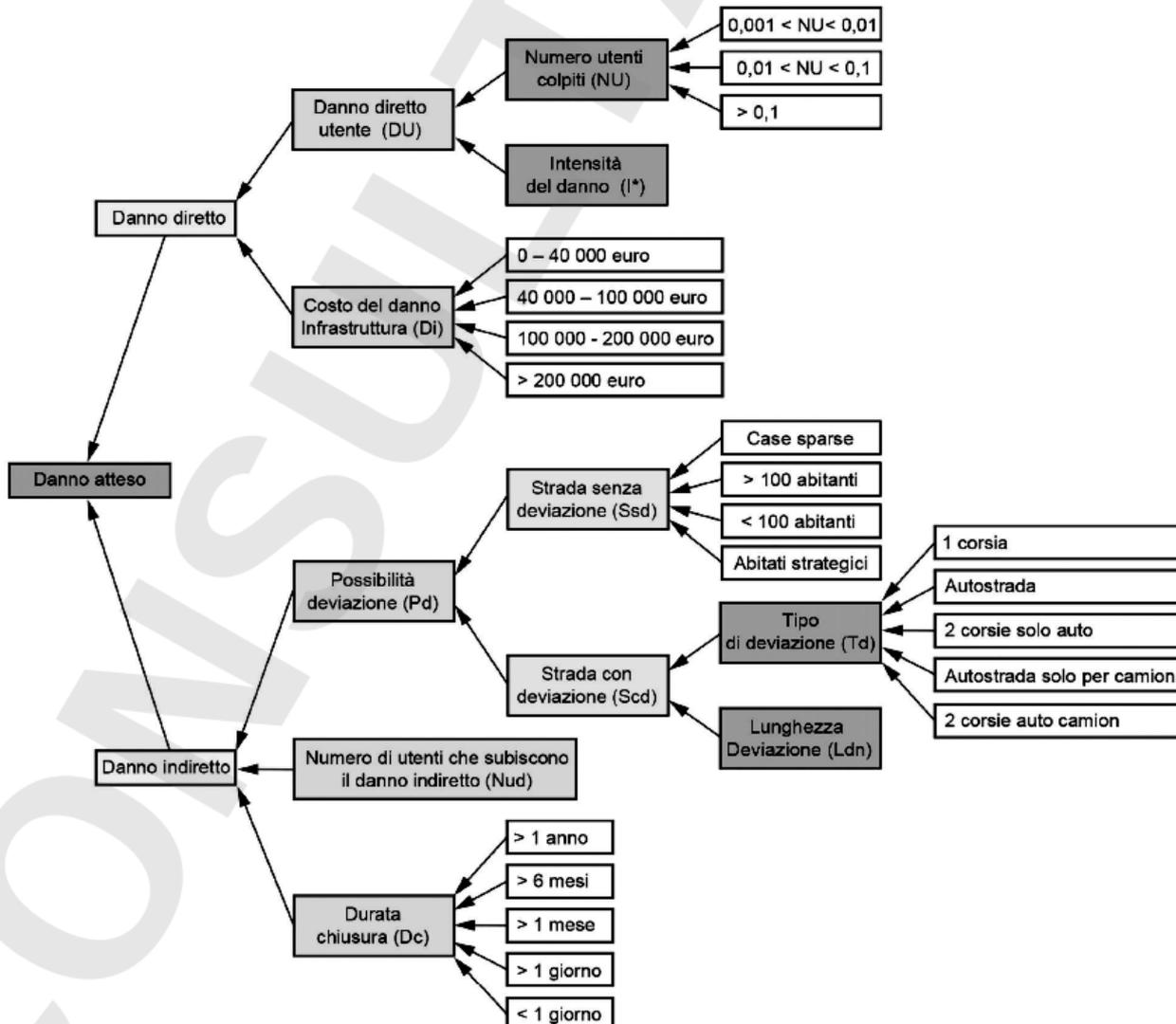
- danno diretto agli utenti (morti; feriti; invalidi; danni ai mezzi di trasporto);
- costo del danno all'infrastruttura (ponti, paracarri, asfalto ecc.).

I danni indiretti sono le conseguenze della chiusura dell'arteria dovuta all'evento:

- danno dovuto alla chiusura e alla possibilità di una deviazione;
- numero di utenti che subiscono una deviazione o non possono raggiungere un luogo;
- danno agli utenti dovuto alla durata della chiusura.

figura C.2

Diagramma per la valutazione del danno atteso



Nel diagramma di figura C.2 ogni fattore sorgente (caselle bianche) concorre a definire un fattore di rango superiore (caselle colorate). Ad ogni fattore, sorgente o derivato, sono stati attribuiti dei pesi $W_1 - W_n$ ottenendo degli indici. I pesi sono stati attribuiti, attraverso il metodo del confronto a coppie tra fattori del medesimo rango.

Il coefficiente di danno atteso d è dato dalla somma dei vari indici stimati (DU, Pd, N_{ud}, Dc) moltiplicato per i pesi (w_i) ad essi assegnati:

$$\text{Danno atteso} \quad d = w_{DU} \times DU + w_{Di} \times Di + w_{Pd} \times Pd + w_{Nud} \times Nud + w_{Dc} \times Dc$$

dove:

DU = Danno diretto subito dall'utente;

Di = Costo del danno sull'infrastruttura;

Pd = Possibilità di deviazione;

Nud = Numero di utenti che subiscono il danno indiretto;

Dc = Durata della chiusura.

L'indice Possibilità di deviazione Pd è dato da:

$$Pd = w_{Ssd} \times Ssd + w_{Scd} \times Scd$$

dove:

Ssd = strada senza deviazione;

Scd = strada con deviazione.

L'indice Strada Con deviazione si stima come:

$$S_{CD} = w_{Td} \times Td + w_{Ldn} \times Ldn$$

dove:

Td = Tipo di deviazione;

Ldn = Lunghezza deviazione.

Il Danno diretto subito dall'utente è dato da:

$$DU = w_{NU} \times NU + w_{I^*} \times I^*$$

dove:

Nu = Numero utenti colpiti;

I^* = Intensità del danno.

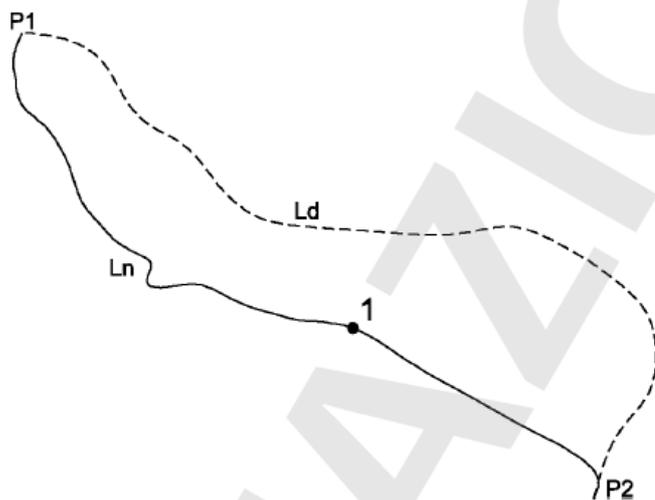
Ai fattori non suddivisi in classi sono attribuiti degli indici normalizzati rispetto al massimo valore ipotizzato per il territorio analizzato. Essi sono: il numero di utenti che subiscono il danno indiretto (Nud), la lunghezza massima della deviazione (Ldn) e l'indice di intensità del danno (I^*)

La lunghezza della deviazione è calcolata come rapporto tra la lunghezza della tratta normale (Ln) dall'ultimo incrocio prima dell'interruzione (P_1) al primo incrocio dopo l'interruzione (P_2) e la lunghezza della deviazione più corta possibile tra gli stessi due punti (Ld).

figura C.3 **Esempio di determinazione della lunghezza di deviazione**

Legenda

- Ln Lunghezza normale della tratta da P1 a P2
- Ld Lunghezza della deviazione da P1 a P2 in caso di evento di caduta massi
- P1 Ultimo incrocio prima dell'interruzione
- P2 Primo incrocio dopo l'interruzione



BIBLIOGRAFIA

- [1] Confederazione Elvetica -UFPP- Ufficio Federale della Protezione della Popolazione, "Formazione sulla gestione dei rischi UFPP - Glossario sui rischi," Office fédéral de la protection de la population OFFP, Berna, 2012.
- [2] Christopher P. Russell, et.alii, "Modification and statistical analysis of the Colorado rockfall hazard rating system.," Report No. CDOT-2008-7. Final Report, , p. 124 pp., 2008.
- [3] N. M. L. B. M. P. D. De Biagi V., "Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size," no. 17, pp. 1-11, 2017.
- [4] W. U. L. –. B. BUNDESAMT FÜR UMWELT, "Risikoanalyse," Umwelt-Materialien, no. nr. 107/I, 1999.
- [5] GEO-HONG KONG, Hong Kong Geotechnical Office, "Landslide and boulder falls from natural terrain: Interim Risk Guidelines," *GEO Report*, no. 75, p. 183.
- [6] C. e. al., "Quantitative risk assessment of the residual risk in a rockfall protected area.," *Landslides*, vol. 2, 2005.
- [7] GEO-Hong Kong. Hong Kong Geotechnical Office, Landslide and boulder falls from natural terrain: Interim Risk Guidelines., vol. Report n. 75, GEO-Hong Kong, 1998, p. 183.
- [8] Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto di Ricerca per la protezione Idrogeologica IRPI, "Rapporto periodico sul Rischio posto alla Popolazione italiana da Frane e Inondazioni," CNR IRPI, 2020.
- [9] F. e. al., "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning," *Engineering Geology*, vol. 102, 2008.
- [10] P. M. T. P. Bertolo D., "Analisi di pericolosità e rischio da caduta massi pre e post-intervento. Il caso di Hone-Valle d'Aosta.," GEAM, Torino, 2019.
- [11] L. B. ,. F. P. U. Dorren, "Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes," *NHESS - Natural hazards and earth system sciences.*, vol. 6, no. 145, 2006.
- [12] F. Leone, "Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movements: working toward a better risk perception.," *Landslides*, 1996.
- [13] V. De Biagi and et al., " A quantitative approach for the evaluation of rockfall risk on buildings.," 2017.
- [14] V. De Biagi, M. Napoli, M. Barbero and D. Peila, "Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size.," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017.
- [15] F. Rupi, S. Bernardi, A. Danesi and G. Rossi, "The Evaluation of Road Network Vulnerability in Mountainous Areas: A Case Study," *Springer Networks and Spatial Economics*, vol. 15, no. pp. 397–411, p. pages397–411, 2015.
- [16] C. Strada, S. Tagnin, M. Mottironi, V. Larcher, G. Villa and V. Mair , "Management of Rock Fall Risk on the Main Roads of Southtirol," *Engineering Geology for Society and Territory*, vol. 2, no. pp 1829 - 1833, pp. pp 1829-1833, 2015.
- [17] J. M. Tacnet , J. Dezert and M. Batton-Hubert, "A two-step fusion process for multi-criteria decision," *Environment Systems and Decisions*, Springer, Vols. Proceedings of International Workshop on the Theory of Belief Functions,Brest (France, pp. pp 288-311, 2010.
- [18] UNI 11230:2007 Gestione del rischio Vocabolario
- [19] B. et, "Pericoli naturali lungo le strade nazionali: Gestione dei rischi. ASTRA 89001," ASTRA, 2012.
- [20] B. e. al., "Pericoli naturali lungo le strade nazionali: Gestione dei rischi. ASTRA 19003," 2014.
- [21] AA.VV. - CONFEDERAZIONE SVIZZERA, "Strategia "Pericoli naturali" Svizzera. Attuazione del Piano d'azione PLANAT 2016-2019," p. 20, 2019.

-
- [22] R. J.D., "Pentes instables dans le Pennique valaisan: MATTEROCK: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels," in Vol. Schlussbericht/NFP 31 = Rapport final / PNR 31 = Final report / NRP 31, Zurigo, Vdf Hochschulverl. an der ETH Zurich, 1998.
- [23] J. Corominas and O. Mavrouli, "Quantitative risk assessment for bouildings due to rockfalls: some achievements and challenges," in Proceedings des Journees de rencontre sur le dangers naturels, Lausanne, 2011.
- [24] L. Cascini, "Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development.," in Landslide Risk Management, Taylor and Francis, 2005.
- [25] R. Fell, "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning.," Engineering Geology, vol. 102, no. 3-4, pp. 85-98, 2008.
- [26] H. Wong, "Landslide risk assessment for individual facilities-state of the art report.," in Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, 2005.
- [27] M. Uzielli, "A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides," Engineering geology, vol. 102, pp. 251-256, 2008.
- [28] Australian Geomechanics Society, "Guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use management.," Australian Geomechanics, pp. 13-36, 2007.

CONSULTAZIONE
