

4 - Parte Seconda

ALLEGATI ANALISI DI PERICOLOSITÀ GEOLOGICA

ALLEGATO I

Procedura di analisi di pericolosità per fenomeni di crollo

Definizione dell'area interessata dalla propagazione di fenomeni di crollo

Il seguente metodo empirico per definire l'area interessata da un fenomeno di crollo, si basa sul cosiddetto "cono d'ombra", che sottende la zona in cui la maggior parte dei blocchi si dovrebbero arrestare. Il metodo si basa sugli studi di HEIM [1932], di LIED [1977], di ONOFRI & CANDIAN [1979], di EVANS & HUNGR [1993] e di MEISSEL [1998].

Questo metodo previsionale empirico si basa sul concetto di linea di energia e di angolo di attrito equivalente; l'area interessata da un crollo può venir delimitata da un "cono" definito utilizzando l'angolo d'ombra minimo, a partire da una parete o da una porzione di versante possibile origine di crolli, oppure l'angolo di inclinazione del versante.

L'angolo d'ombra minimo è definito come l'inclinazione della retta che congiunge l'apice della scarpata con il blocco più lontano; secondo EVANS & HUNGR [1993], il valore medio di tale angolo è di $27,5^\circ$. Un'altra possibilità è di utilizzare l'angolo di inclinazione del versante (zona di deposito), calcolato partendo dal punto più alto della zona di distacco, congiungendolo con il masso che ha raggiunto la massima distanza di espandimento, che in genere fornisce valori compresi tra 28° e 41° [ONOFRI & CANDIAN, 1979]. (Fig.1).

La scelta tra i due metodi può essere effettuata in modo teorico, utilizzando la relazione di figura 2: se $Z_1/Z_2 < 0,8825$ si utilizza l'angolo d'ombra minimo; se tale rapporto è $> 0,8825$, si utilizza l'angolo di inclinazione del versante.

Figura 1 - Delimitazione in pianta del "cono d'ombra" per frane di crollo.

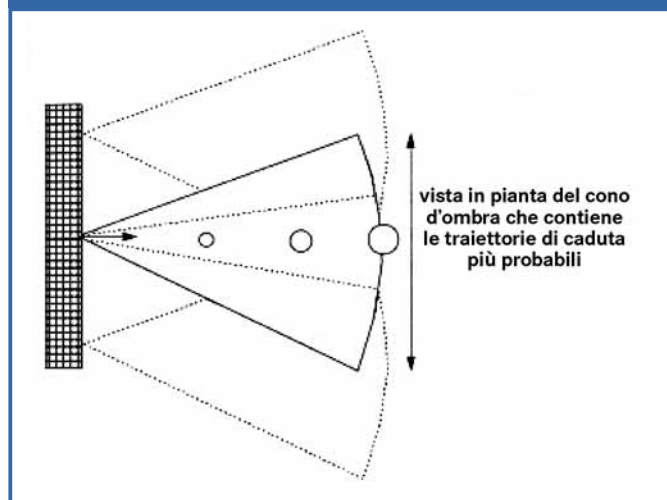
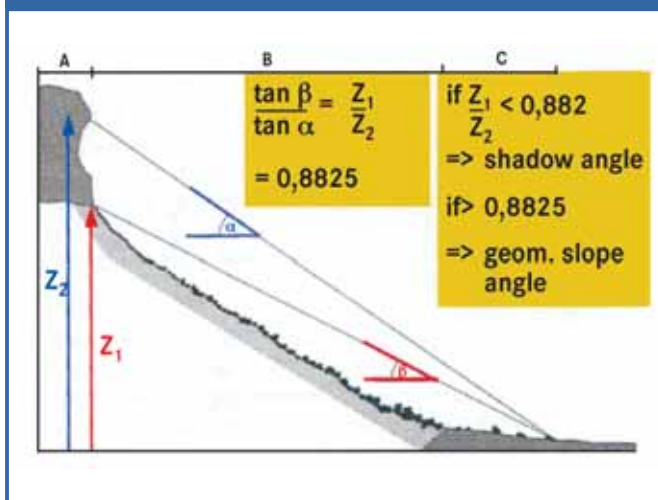


Figura 2 - Basi teoriche che illustrano quando usare l'angolo d'ombra minimo o l'angolo di inclinazione del versante.



La zonazione della pericolosità generata da crolli in roccia

Per la mappatura della pericolosità generata da crolli in roccia si propongono due procedure differenti, una per crolli di singoli massi o per crolli di massi fino ad una volumetria massima complessiva di circa 1000 m^3 e un'altra per crolli in massa (volumetrie tra 1000 e alcune centinaia di migliaia di metri cubi).



Crolli di singoli massi o inferiori a 1000 m³

La procedura proposta, denominata R.H.A.P. (*Rockfall Hazard Assessment Procedure*), è valida per crolli di singoli blocchi o per crolli di massi fino ad una volumetria massima complessiva di 1000 m³. Questa procedura si sviluppa in più fasi.

Il primo passo è l'individuazione dei settori di parete rocciosa potenziale origine di crolli; si procede alla delimitazione in aree omogenee in funzione dei seguenti aspetti:

1. caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso ricavate da rilievi in sito;
2. morfologia del versante lungo le traiettorie di discesa (zone di transito e d'arresto) dei blocchi, valutando l'altezza della parete e la pendenza del versante sottostante;
3. presenza di opere di difesa, di cui vanno valutati le caratteristiche di assorbimento di energia e il loro stato di efficienza;

questi parametri vengono poi utilizzati nella modellazione numerica.

In ciascuna delle aree omogenee così definite, sono scelte, in pianta, una o più traiettorie di discesa dei blocchi su cui effettuare analisi di rotolamento tramite simulazioni di caduta, con modelli numerici di tipo stocastico, supportate da rilievi geomeccanici e da osservazione degli accumuli di detrito.

Le simulazioni di caduta con modelli numerici (cinematici e/o dinamici) sono effettuate prendendo in considerazione i seguenti parametri:

- zona di partenza dei blocchi: la sommità della parete;
- volumetria dei massi: le dimensioni modali, valutate tramite analisi statistica (istogramma di frequenza) del detrito al piede della parete in esame e/o in base alla fratturazione in parete, ricavata da rilievi geomeccanici. Possono essere considerati più valori modali nel caso in cui la distribuzione sia bi- o polimodale;
Oltre ai volumi modali si deve prendere in considerazione anche il volume maggiore o quello del blocco che ha raggiunto la distanza massima ed eventualmente il blocco potenzialmente instabile di maggiori dimensioni riscontrato in parete;
- forma: dovrà essere utilizzata nella simulazione la forma più simile alla forma modale osservata nel detrito o in parete oppure la forma fisicamente più sfavorevole;
- coefficienti di restituzione e rugosità: vanno valutati attraverso un rilievo puntuale delle traiettorie di caduta, sia reali che ipotizzate, prestando particolare attenzione al tipo di superficie, tipo di vegetazione presente, profondità e distanza tra solchi di impatti precedenti, eventuali danni a strutture e piante, ecc. La valutazione dei coefficienti di restituzione andrà effettuata quando possibile anche attraverso calibrazioni tramite eventi pregressi;
- numero di simulazioni: essendo questa analisi di tipo probabilistico, è necessario effettuare numerose simulazioni di caduta (sono da effettuare almeno 1000 cadute per ogni traiettoria).

In base ai risultati delle analisi di rotolamento massi, si esegue una zonazione longitudinale preliminare delle traiettorie di caduta suddividendole in 3 zone:

- a) di transito e di arresto del 70% dei blocchi;
- b) di arresto del 95% dei blocchi;
- c) di arresto del 100% dei blocchi.

Queste percentuali sono valutate sulla totalità delle simulazioni effettuate, per ogni traiettoria, sui blocchi modali di qualsiasi forma considerata e verrà tenuta in considerazione la zonazione longitudinale più sfavorevole. A queste zone vengono assegnate le classi di pericolosità relativa: 4 (a), 3 (b), 2 (c). In aggiunta si delimita un'area di bassa pericolosità (valore 1) utilizzando la distanza massima raggiunta dal blocco di maggiori dimensioni oppure la distanza massima raggiunta da massi di crolli precedenti.

Successivamente si valuta la probabilità di accadimento del fenomeno in ciascuna delle aree omogenee, definendo la propensione al distacco dei blocchi. A tale scopo si suddivide la parete in maglie, con lato da 5 m fino a 20 m, secondo la complessità geomeccanica dell'area omogenea o in base alle dimensioni della parete.



Per ciascuna maglia si verifica la presenza dei seguenti elementi di instabilità:

- fratture aperte con evidenze di attività associate a cinematismi possibili;
- blocchi ruotati;
- zone intensamente fratturate;
- superfici non alterate che testimoniano recenti distacchi;
- emergenze di acqua alla base dei blocchi.

Per ogni maglia viene quindi indicato il numero degli elementi di instabilità presenti. Poi, per ogni area omogenea viene calcolata la somma di tutti gli elementi di instabilità presenti e viene ricavata la percentuale di attività in relazione al numero massimo ottenibile nell'area omogenea, dando a ciascuna maglia il valore massimo 5 (Fig. 3).

In base alle percentuali così ricavate, le aree omogenee vengono raggruppate in 3 gruppi a differente attività relativa per il sito indagato: alta, media, bassa. Non vengono indicati valori di percentuali di riferimento assolute per evitare che gran parte delle aree omogenee risultino avere lo stesso valore di pericolosità, impedendo una zonazione. Tuttavia, nel caso in cui tutte le aree omogenee presentino percentuali inferiori al 10% non si ritiene necessario effettuare la zonazione della pericolosità.

Spesso succede che le aree omogenee nelle zone di rotolamento e di arresto dei blocchi si sovrappongano parzialmente o anche totalmente; in tali casi la rappresentazione in carta risulterà dalla sovrapposizione delle aree omogenee, in modo che le aree ad attività maggiore risultino sovrapposte a quelle ad attività minore. La zonazione finale della pericolosità viene definita utilizzando i valori delle classi di pericolosità relativa della zona di transito e accumulo dei blocchi, che vengono aumentati di 1, mantenuti costanti o diminuiti di 1, a seconda che le pareti sovrastanti appartengano ai gruppi di attività alta, media o bassa rispettivamente. Si possono così avere in totale 5 classi di pericolosità, da H1 a H5. Esiste una tipologia di frana, assimilabile ai crolli, che non rientra nelle normali classificazioni e riguarda la caduta di blocchi, più o meno arrotondati, scalzati da depositi glaciali o da terrazzi fluvioglaciali. Il meccanismo di rotolamento a valle dei blocchi è del tutto assimilabile a quello dei crolli e quindi va

Figura 3 - Schema di valutazione dell'attività relativa delle aree omogenee di origine dei crolli. Ogni area omogenea è suddivisa in maglie in ciascuna delle quali è riportato il numero degli elementi di instabilità riscontrati.

Area omogenea 1			Area omogenea 2				Area omogenea 3		
	2			1				2	1
3			3	2	2				3
	3	4		1	2				1
	2	2		1		2		2	
2					2	1			

Area omogenea 1 - Numero totale elementi di instabilità presenti: 18 su 75 (numero massimo ottenibile di elementi di instabilità per l'area omogenea. Percentuale di attività relativa: 24% (alta).

Area omogenea 2 - Numero totale elementi di instabilità presenti: 17 su 100. Percentuale di attività: 17% (media).

Area omogenea 3 - Numero totale elementi di instabilità presenti: 9 su 75. Percentuale di attività: 12% (bassa).

In questa rappresentazione i limiti tra le aree omogenee sono stati schematizzati con delle linee rette e sono state considerate solo separazioni verticali. Nella realtà possono verificarsi casi molto più complessi.



seguita la procedura sopra descritta per quanto riguarda la determinazione della pericolosità preliminare. Per passare alla pericolosità finale si procede come per i crolli, sovrapponendo la griglia alle aree omogenee e valutando l'attività in funzione dei seguenti parametri:

- presenza di scollamenti tra matrice e blocchi;
- blocchi o ciottoli parzialmente ruotati nella matrice;
- blocchi in buona parte isolati rispetto alla matrice;
- superfici non alterate o incavi che testimoniano recenti distacchi;
- emergenze di acqua alla base dei blocchi.

Le varie fasi dello studio per i crolli andranno descritte nella relazione geologica che deve sviluppare i seguenti punti:

1. **Inquadramento geologico-geomorfologico:** geologia e geomorfologia di un intorno significativo dell'area in esame; dati esistenti sulle frane già avvenute.
2. **Caratterizzazione delle aree omogenee:** risultati e descrizione dei rilievi geomeccanici; descrizione dei parametri per la definizione delle aree omogenee e per la scelta delle traiettorie di caduta massi; modellazione statistica dei volumi e della forma dei blocchi (istogrammi di frequenza).
3. **Simulazione della caduta massi:** breve descrizione del codice di calcolo utilizzato e dei parametri di ingresso usati e in particolare i coefficienti di restituzione e la rugosità; risultati delle simulazioni di caduta massi, con visualizzazione dei rimbalzi lungo la traiettoria di caduta, istogrammi di frequenza di altezza dei rimbalzi, velocità, energia per ogni traiettoria analizzata.
4. **Descrizione del calcolo delle percentuali di instabilità in parete delle aree omogenee.**
5. **Discussione dei risultati e conclusioni.**

Allegati alla relazione sono previsti i seguenti elaborati cartografici e schede:

1. *Carta di inquadramento geologico-geomorfologica*, con unità geologiche e principali elementi strutturali e geomorfologici (scala 1:10000), che può essere desunta da dati preesistenti a scala adeguata;
2. *Carta dei dissesti con elementi morfologici*, in cui vanno riportati gli elementi morfologici dei dissesti, l'idrogeologia, le opere di difesa e di sistemazione, etc., come da legenda allegata (scala 1:1000 - 1:5000);
3. *Carta delle aree omogenee*, in cui sono da riportare le diverse aree omogenee con le percentuali di attività, le traiettografie, le maglie con gli elementi di instabilità (scala 1:500 - 1:2000); nel caso in cui le maglie non siano rappresentabili in planimetria dovranno essere fornite fotografie della parete con sovrapposte le maglie utilizzate;
4. *Carta della pericolosità preliminare*, con la zonazione preliminare della pericolosità da H2 a H4 (scala 1:500 - 1:2000);
5. *Carta della pericolosità finale*, con la zonazione delle aree di pericolosità da H1 a H5 (scala 1:2000);
6. *Scheda frane* per tutta l'area considerata;
7. *Scheda crolli* per ogni singola area omogenea;
8. *Scheda di rilevamento geomeccanico* per ogni stazione.

Crolli in massa

Per crolli in massa si intendono frane con volumetria compresa tra i 1000 m³ e qualche centinaia di migliaia di metri cubi.

La procedura proposta prevede, per il sito studiato, l'identificazione delle aree soggette a crolli in massa potenziali, rilevando le fratture aperte che isolano volumi di roccia potenzialmente instabili, in zone limitrofe a crolli già avvenuti o in zone che non sono ancora state soggette a franamenti.



Successivamente, per ogni area, si determinano, se possibile, i volumi minimi, medi e massimi potenzialmente instabili, includendo l'eventuale ampliamento della nicchia di distacco di fenomeni già avvenuti. In base a queste volumetrie si calcolano le distanze massime raggiungibili e le relative aree di espansione dell'accumulo per ciascun volume secondo i metodi empirici disponibili in letteratura.

SCHEIDEGGER [1973] fornisce la formula:

$$\log f = a * \log V + b$$

in cui $f = H/x$. In tal modo è possibile calcolare la distanza massima raggiungibile dalla frana (x) inserendo i valori di dislivello (H) in metri, il volume presunto (V) e le due costanti $a = -0.15666$ e $b = 0.62419$.

DAVIES [1982] propone invece un legame tra il volume (V) e la distanza raggiunta (R_a), secondo la formula:

$$R_a = 9.98 V^{0.33}.$$

Anche TIANCHI [1983] mette in relazione il volume (V) della frana con la distanza raggiunta (L), secondo la formula:

$$\log (H/L) = A + B \log V$$

in cui H è il dislivello e A e B due costanti del valore rispettivo 0.6640 e -0.1529 . Un legame tra distanza raggiunta dalla frana, il volume e la pendenza è proposto da HUTCHINSON (1988) in un diagramma che, per le volumetrie qui considerate, si riferisce a dati ricavati da crolli in calcari porosi (*chalk*). Andrà utilizzato il metodo empirico più adatto alle volumetrie ipotizzate e alle caratteristiche litologiche del sito. La larghezza e la forma dell'accumulo di frana vanno delimitate tenendo conto della morfologia del pendio e dell'area di possibile espansione [vedi per esempio: NICOLETTI & SORRISO-VALVO, 1991].

I metodi sopra citati sono validi soprattutto per volumetrie elevate; per i crolli di poche migliaia di m^3 si possono utilizzare metodi basati sulle linee di energia [es. HEIM, 1932] associandoli a simulazioni di caduta massi. La zonazione della pericolosità preliminare dell'accumulo può essere valutata in due modi che possono essere integrati tra loro. Preferibilmente si utilizzeranno le tre volumetrie identificate (minima, media, massima) per ogni area; se questo non è possibile si applicheranno più metodi empirici che risulteranno più o meno conservativi. In questo modo si distingueranno tre distanze massime raggiungibili dalla frana e quindi tre zone di pericolosità relativa decrescenti (4, 3, 2) verso le zone più distanti.

Per valutare l'attività delle aree di distacco e quindi passare alla pericolosità finale, le aree di distacco andranno classificate nel seguente modo:

- **non attive** - se vi sono fratture aperte senza sintomi di movimento. Questa condizione è evidenziata ad esempio, dalla presenza di vegetazione antica all'interno della frattura, dalla assenza di evidenze di crolli recenti in parete e fattori innescanti quali infiltrazioni d'acqua, ecc.;
- **quiescenti** - se sono presenti fratture aperte e persistenti e se vi è possibilità cinematica di movimento della porzione di ammasso roccioso in esame;
- **attive** - se, oltre ai sintomi precedenti, vi sono anche fratture con superfici non alterate, evidenze di frequenti crolli di blocchi, blocchi ruotati, emergenze di acqua, piante con radici tirate.

A questo punto il valore della pericolosità viene diminuito, mantenuto costante o aumentato di 1 a seconda che la zona di distacco sia stata classificata non attiva, quiescente o attiva rispettivamente. In questo modo si ottiene la zonazione finale della pericolosità con le 5 possibili classi da H1 a H5. Spesso può succedere che si sovrappongano diverse aree di accumulo con la loro rispettiva zonazione; la zonazione totale dell'intera area risulterà dalla sovrapposizione delle zonazioni, in modo che le aree a pericolosità maggiore risultino sovrapposte a quelle di pericolosità minore.

Le varie fasi dello studio andranno descritte in una relazione geologica che deve sviluppare i seguenti punti:

1. **Inquadramento geologico-geomorfologico:** geologia e geomorfologia di un intorno significativo dell'area in esame; dati esistenti sulle frane già avvenute.



- 2. Caratterizzazione delle aree potenziali di crollo in massa:** risultati e descrizione dei rilievi geomeccanici; descrizione delle principali discontinuità e delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso; eventuali dati di monitoraggio; definizione dei volumi potenzialmente instabili (scenari di instabilità); descrizione del pendio sottostante.
- 3. Valutazione delle aree di espansione:** scelta del metodo e dei parametri utilizzati.
- 4. Valutazione dello stato di attività delle aree potenzialmente instabili.**
- 5. Discussione dei risultati e conclusioni.**

Allegati alla relazione sono previsti i seguenti elaborati cartografici e schede:

- 1. Carta di inquadramento geologico-geomorfologica*, con unità geologiche e principali elementi strutturali e geomorfologici (scala 1:10000) che può essere desunta da dati preesistenti a scala adeguata;
- 2. Carta dei dissesti con elementi morfologici*, in cui vanno riportati gli elementi morfologici dei dissesti, l'idrogeologia, le opere di difesa e di sistemazione, etc., come da legenda allegata (scala 1:2000 - 1:5000);
- 3. Carta delle aree potenziali di crollo e della pericolosità preliminare*, in cui sono da riportare le zone potenzialmente instabili e le diverse aree di espansione, con zonazione preliminare della pericolosità (scala 1:2000 - 1:5000); se la parete origine del crollo è molto acclive, è meglio allegare fotografie con delimitate graficamente le aree potenziali di crollo;
- 4. Carta della pericolosità finale*, con la zonazione delle aree di pericolosità da H1 a H5 (scala 1:2000 - 1:5000);
- 5. Scheda frane per tutta l'area considerata;*
- 6. Scheda di rilevamento geomeccanico per ogni stazione.*



SCHEMA CROLLI

Lunghezza massima piste di discesa (m)	
--	--

ZONA DI DISTACCO	Pendenza (°)				
	Altezza della parete (m)				
	Forma della parete	Planare			
		Convessa			
		Concava			
		Aggettante			
	Fratture a monte della parete		sì		no
	Presenza di contatti litologici		sì		no
	Presenza di interstrati argillitici		sì		no
	Presenza di venute d'acqua		sì		no
	Volumetrie potenzialmente instabili (totale in m³)				
	Sintomi di attività	Fratture aperte	sì		no
		Blocchi ruotati	sì		no
		Zone intensamente fratturate	sì		no
		Superfici non alterate	sì		no
	Esecuzione di rilievo geomeccanico (n)*				

ZONA DI TRANSITO	Pendenza media versante (°)				
	Natura della superficie	Roccia resistente			
		Roccia debole			
		Detrito grossolano			
		Detrito fine			
		Terreno			
	Tipo di impatti	Impatti singoli*	sì		no
		Impatti multipli*	sì		no
	Rottura di blocchi per impatto		sì		no
	Tipo di vegetazione	Assente			
		Erbacea			
		Arbustiva	sì		no
		Di alto fusto	sì		no
	Altezza vegetazione abbattuta (m)				

(Da compilare per ogni area omogenea).



VALORI DEI COEFFICIENTI DI RESTITUZIONE E DI ROTOLAMENTO DA LETTERATURA

[Tratti da CROSTA & AGLIARDI, 2000]

Tabella 7.1 - Valori di e (coefficiente di restituzione) e di $tg\delta_r$ (coefficiente di rotolamento) proposti da differenti autori.

Autore, anno	e	$tg\delta_r$
HABIB [1977]; PAIOLA [1978]; HALLBAUER [1986]	0.50 - 0.60	–
BROILI [1978]	0.75 - 0.80 (roccia)	–
BROILI [1978]	0.20 - 0.35 (detrito)	–
BOZZOLO & PAMINI [1986]	–	0.60 - 1.00
DESCOUEDRES & ZIMMERMANN [1987]	0.40 - 0.85 (normale)	0.30 - 0.50
COCCO [1993]	0.28 - 0.75	0.35 - 0.85

Tabella 7.2 - Valori di e_t , e_n (coefficienti di restituzione tangenziale e normale) e di $tg\delta_r$ (coefficiente di attrito dinamico al rotolamento) proposti da AZZONI et al. [1991].

Natura del substrato	e_t	e_n	$tg\delta_r$
Roccia	0.45 - 0.75	0.45 - 0.75	0.97
Detrito fine	0.66	0.3	0.75
Detrito misto a terra	0.66	0.62	0.39
Detrito grossolano	0.80	1.00	0.88

Tabella 7.3 - Valori di e_t ed e_n (coefficienti di restituzione tangenziale e normale) proposti da PFEIFFER & BOWEN [1989a, 1989b] e da BARRET et al. [1989].

Natura del substrato	e_t	e_n
Roccia o pavimentazione stradale	0.87 - 0.92	0.37 - 0.42
Roccia intatta con blocchi isolati	0.83 - 0.87	0.33 - 0.37
Detrito a blocchi, scarsa vegetazione	0.82 - 0.85	0.30 - 0.33
Detrito abbondantemente vegetato	0.80 - 0.83	0.28 - 0.30
Pendio in terreno coesivo	0.78 - 0.82	–

Tabella 7.4 - Valori di e (coefficiente di restituzione) e di $tg\delta_r$ (coefficiente di rotolamento) proposti da AZZONI & DE FREITAS [1995].

Natura del substrato	e	$tg\delta_r$
Roccia affiorante	0.85	0.40
Detrito compatto	0.60	0.55
Detrito non compattato	0.40	0.75
Detrito	0.55	0.60
Detrito frammisto a terreno coesivo	0.45	0.60
Materiale coesivo	0.20	0.80
Terreno compattato artificialmente	0.50 - 0.60	0.60