Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base Università degli Studi di Napoli Federico II

Tesi di laurea triennale in Ingegneria per l'ambiente e il territorio ANALISI CADUTA MASSI IN ZONA SISMICA

Relatore: Prof. Paolo Budetta *Correlatori:* Ing. Melania De Falco Ing. Giovanni Forte

Anno accademico 2016/2017

Candidato: Alessandro Valerio N49/643 Il presente lavoro di tesi tratta l'analisi dei fenomeni di caduta massi finalizzandola alla valutazione della pericolosità, specialmente in zona sismica.

- azione della gravità,
- circolazione di acqua nelle discontinuità,
- vibrazioni indotte da sismi o da cause antropiche,
- effetto divaricante esercitato nelle discontinuità dalla formazione di ghiaccio (azioni di gelo-disgelo) o dalle radici degli alberi,
- operazioni di scavo e sovraccarico dei pendii per azioni antropiche,
- uso di esplosivi.
- L'effetto sismico causa un incremento dell'accelerazione di gravità in condizioni statiche (g=9.81 m/sec²), in occasione di terremoti con diversa magnitudo e che quindi applicano sul blocco una frazione non trascurabile della stessa accelerazione.

ANALISI DEL MOTO DI CADUTA MASSI Le principali cause di distacco Il fenomeno inizia, generalmente, a seguito di scivolamento di blocchi instabili con moto uniformemente accelerato. La velocità iniziale di distacco dal pendio dipenderà dalla gravità (9.81 m/s2) e, in zona sismica, dall'incremento di accelerazione dovuta al terremoto.

- CADUTA LIBERA $V = \sqrt{v^2 + 2gh}$
- SCIVOLAMENTO E RIBALTAMENTO:

 $\alpha = \phi$ condizione di equilibrio limite,

α>φ il blocco slitterà,

 $\alpha < \phi$ il blocco è stabile.

- Casistica di scivolamento e ribaltamento:
- Caso 1: b<Ø e t/h>tanb; il blocco è stabile e non scorre o si ribalta.
- Caso 2: b>Ø e t/h>tanb; il blocco slitterà ma non si ribalterà.
- Caso 3: b<Ø e t/h<tanb; il blocco si ribalterà ma non scorrerà.
- Caso 4: b>Ø e t/h<tanb; il blocco potrà sia slittare che ribaltarsi.



Per tener conto del comportamento dei massi in caduta, occorre introdu alcuni coefficienti (di restituzione dell'energia, di attrito dinamico ecc.

- ► I *coefficienti di restituzione* esprimono la dissipazione di energia cinetica durante l'urto. $K = \frac{v_f}{v_i}$. Di solito, si tiene conto di due aliquote: la componente normale K_n e quella tangenziale K_t .
- A causa della elevata aleatorietà di detti coefficienti, anche loro piccole variazioni possono comportare traiettorie molto variabili e punti di arresto diversissimi.

Riferimenti	Normale	Tangenziale	Tipo di materiale	
Piteau &	0.9-0.8	0.75-0.65	Roccia integra	
Clayton	0.8-0.5	0.65-0.45	Detrito con grandi massi	
	0.5-0.4	0.45-0.35	Detrito compatto	
	0.4-0.2	0.30-0.20	Pendio coperto da erba	
Hoek	0.53	0.99	Roccia integra	
	0.40	0.90	Strada asfaltata	
	0.35	0.85	Roccia con grandi massi	
	0.32	0.82	Suolo	
	0.32	0.80	Suolo con vegetazione	
	0.30	0.80	Suolo sciolto con poca	
			vegetazione	



Pertanto, nelle simulazioni applicate a casi reali, occorre tener conto degli effettivi punti di arresto e delle impronte da impatto lasciate lungo i pendii dai massi.

Si procede quindi effettuando analisi a ritroso, basate su di un criterio osservazionale e ricavando, per tentativi, i valori dei coefficienti che meglio soddisfano le evidenze di campagna (approccio geomorfologico).







Impronte da impatto lasciate da un masso arrestatosi in una abitazione. Punti di arresto di massi (volumi di circa 7 - 20 mc) ed effetti provocati sul traffico veicolare.

- Nella realtà non si ha solo attrito volvente o di rotolamento ma anche resistenze al moto dovute alla non linearità del comportamento dei materiali, alla scabrezza (roughness) delle superfici dei pendii, alla presenza di ostacoli e vegetazione.
- Non potendo tenere conto delle numerose variabili, si ricorre a delle semplificazioni:
- Il coefficiente di attrito al rotolamento (tanφ_{µd}), per tenere conto di quanto precedentemente detto, si può calcolare come di seguito indicato (Statham, 1971; Azzoni, 1991):

$$\blacktriangleright \quad tan\phi_{\mu d} = tan\phi_0 + K\left(\frac{d}{D}\right)$$

dove: $tan\varphi_0$ è il coefficiente di attrito dinamico, K è una costante ricavata sperimentalmente, d è la granulometria media del terreno costituente il pendio e D sono le dimensioni del blocco.

Moto di rotolamento dei massi: il coefficiente di attrito L'approccio più corretto è quello di far riferimento a prove di caduta in scala reale (prove in cava o su barriere paramassi all'uopo realizzate)

- Con esse si possono infatti determinare percorsi di caduta ed energie cinetiche dei massi durante il moto ma soprattutto si può determinare il comportamento di eventuale barriere paramassi (energie cinetiche assorbibili). Pertanto, con le prove in sito otteniamo parametri in input da utilizzare nei modelli previsionali, al fine di una progettazione più efficiente e corrispondente alla realtà.
- Per le prove lungo versante otterremo i coefficienti di restituzione tangenziale e normale (caso di blocco puntiforme, approccio di tipo lumpedmass), e i coefficienti di attrito al rotolamento (blocchi dotati di forma e dimensioni variabili).
- Per le prove su barriere paramassi otteremo l'energia cinetica massima dissipabile, la deformazione massima in condizione di massima energia dissipabile e indicazioni sulle caratteristiche strutturali dei sistemi di dissipazione (montanti, ancoraggi, funi, altezze delle barriere, ecc.).

METODI ED OPERE DI PROTEZIONE

La finalità principale delle opere di protezione è intercettare ed arrestare il moto di blocchi rocciosi prima che possano fare danni anche gravi.

Pertanto una tale opera dev'essere in grado di resistere all'impatto e deve essere posizionata esattamente lungo il percorso. Diventa a questo punto fondamentale che il progettista definisca l'*urto di progetto.*

Barriere paramassi

Per la difesa di linee ferroviarie, RFI (1996) distingue le barriere in 5 classi di assorbimento di energia cinetica:

 $E_c < 10 \ kJ$,

- $10 < E_c < 15 \, kJ$,
- $15 < E_c < 50 \, kJ$,
- ♦ $50 < E_c < 150 \, kJ$,
- $150 < E_c < 200 \ kJ.$
- La progettazione parte dalle seguenti semplificazioni:
- Direzione di impatto ortogonale alla barriera,
- La deformata di calcolo assunta è quella ottenuta dalle prove in sito,
- La forza di calcolo è pari a 2.5 volte la forza media teorica,
- Barriera ipotizzata in tre campata.

Per una corretta progettazione, si può far riferimento alla Direttiva ETAG 027 dell' *European Organisation for Technical Approvals* (EOTA, 2008).



Rilevati paramassi in terra rinforzata



I rilevati paramassi in terra si utilizzano a protezione di strutture e infrastrutture di notevoli dimensioni lineari, arrivando ad opere di anche un centinaio di metri. Tali opere hanno un elevato impatto ambientale ma con capacità di assorbimento notevoli per tratti molto lunghi.

Sistemi composti da fossato di raccolta e rete di protezione

- La realizzazione di valli paramassi si accompagna spesso all'apposizione in parete di reti rinforzate, idonee per arrestare piccoli frammenti da pendii verticali.
- Principali parametri da tenere in conto sono la profondità e la larghezza dello scavo. Questo tipo di opera, generalmente, si utilizza al piede di scarpate artificiali quali scarpate stradali, ferroviarie, ecc.

In figura, apposizione di rete ancorata in acciaio, a doppia torsione.



Gallerie artificiali

- Le gallerie artificiali paramassi si realizzano a protezione di sedi stradali o ferroviarie quando, per le difficili condizioni morfologiche del versante, non si possono utilizzare soluzioni diverse. Si usano per territori montani.
- Per la progettazione, si tiene conto dei seguenti parametri:
- Dimensione, forma, velocità di caduta, angolo di impatto dei blocchi,
- Spessore e granulometria dello strato di materiale assorbente,
- Tipologia e condizioni di vincolo relative alla galleria.





Descrizione del fenomeno di caduta massi

Il fenomeno fisico di caduta massi è definito come il distacco e la successiva caduta di blocchi lapidei da pendii naturali o da fronti di scavo in roccia (propagazione primaria). Il fenomeno può avere origine anche da depositi di terre sciolte (propagazione secondaria).

In accordo con le Norme UNI sulla caduta massi, l'analisi del rischio si articola su di una serie di "passi" tesi a valutare lo "stato della natura", la Pericolosità e la vulnerabilità in relazione al tipo di elementi a rischio da proteggere

© UNI Pagina 2

Un'applicazione ad un caso reale

L'AREA DI STUDIO si colloca in località SCOGLIO DELLA MORTE nel Comune di SAN PELLEGRINO DI NORCIA (PG) caratterizzata dalla presenza di frane da crollo sismoindotte che hanno interessato una strada interessata da rilevanti volumi di traffico veicolare.



L'area è stata interessata dal sisma del 23 e 24 Agosto 2016, e che, allo stato, si manifesta ancora con numerosi *aftershocks*.

Foto aerea dell'area interessata: sono evidenziate i fenomeni di caduta massi, alcuni dei quali interagenti con la strada.

Il caso di studio

Lungo il versante interessato dai crolli si sviluppa una strada asfaltata interessata da un discreto volume di traffico. Possibili rischi:

1) impatto di un masso su uno o più veicolo in moto;

 2) impatto di un veicolo su un masso già caduto e fermo sulla carreggiata; 3) impatto di uno o più massi su una fila di veicoli fermi sulle carreggiate.

Queste possibili interazioni andrebbero analizzate al fine di ottenere una valutazione quantitativa del rischio che corrono gli automobilisti che percorrono questa sede stradale.

Classificazione sismica

L'area in questione è classificata in la zona sismica, secondo l' aggiornamento della classificazione sismica della Regione Umbria, sviluppata in coerenza con gli studi dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) redatti su incarico del Dipartimento di Protezione Civile Nazionale e pubblicato nel 2004.

 Si rileva per il territorio comunale di Norcia, a cui afferisce lo Scoglio della Morte, un'accelerazione sismica a_{gx} > 0.25 che rappresenta l'indice di accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni.



Il codice di calcolo adottato è: ROCFALL 6.0 (Rocscience inc.)

Consente:

- Un'analisi statistica (metodo Montecarlo) della caduta massi allo scopo di valutare il livello di pericolosità di questi fenomeni in termini di energie cinetiche, punti di arresto dei massi e altezze di rimbalzo.
- Si possono considerare diverse proprietà fisico-meccaniche del materiale presenti lungo il versante, la forma e le dimensione dei blocchi ipotizzando la caduta di blocchi grandi e piccoli, contemporaneamente.
- La ricostruzione del pendio da inserire nel programma può esser fatta secondo tre modalità:
- assegnare le coordinate (x;y) di ogni singolo vertice del pendio attraverso la barra dei comandi;
- 2. tracciare il profilo graficamente;
- 3. importare il profilo in formato .dxf servendosi di altro software.

Sono state ricostruite 3 sezioni topografiche, passanti per le aree in frana che hanno interessato la strada



Profili analizzati

Impostazioni del codice di calcolo

- Per tutti i profili esaminati le ipotesi iniziali del moto sono le seguenti:
- I massi partono dall'ammasso roccioso con moto uniformemente accelerato scivolando su un piano inclinato di 50°, con un angolo d'attrito allo scorrimento di 30°.
- 2. Si calcola l'accelerazione e la velocità in uscita dal piano. Le componenti verticale e orizzontale della velocità in caduta libera sono rispettivamente 0.66 e 0.38 m/s. Dette velocità tengono conto anche dell'accelerazione sismica di l categoria (0.35g).
- Si precisa inoltre che il metodo utilizzato non è "lumped mass", in quanto sono state introdotte le effettive forme e dimensioni dei massi, quali risultano dalle evidenze di campagna.

Risultati ottenuti: Andamento delle traiettorie



0 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150

Risultati ottenuti (Profilo 1): Punti di arresto



Punti di arresto di tutti i massi

Distribution of Rock Path End Locations



Punti di arresto dei massi piccoli (500 kg)

Risultati ottenuti (Profilo 1):

Energie cinetiche

Total Kinetic Energy on Slope Maximum Value



Total number of selected paths: 99 of 99 Rock Selection: Piccole rocce, grandi massi

Massi grandi (10 T) e piccoli (500 kg)

Risultati ottenuti (Profilo 2): Punti di arresto

Distribution of Rock Path End Locations



Total number of rock paths: 100

Punti di arresto di tutti i massi



Distribution of Rock Path End Locations

 $\mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}} \mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}} \mathsf{r}} \mathsf{r}_{\mathsf{r}} \mathsf{r}} \mathsf{r}$

Rocks Slope

Massi di 10 T

Total number of filtered paths: 100 of 100 Current Filter: Rock Type [Piccole rocce] OR Rock Type [grandi massi]

Risultati ottenuti (Profilo 2): Energie cinetiche

Total Kinetic Energy on Slope Maximum Value



Total number of selected paths: 100 of 100 Rock Selection: Piccole rocce, grandi massi

Massi grandi (10 T) e piccoli (500 kg)

Risultati ottenuti (Profilo 3): Punti di arresto

Distribution of Rock Path End Locations

Distribution of Rock Path End Locations

Rocks Slope



Total number of rock paths: 100

Punti di arresto di tutti i massi



Massi di 10 T

Risultati ottenuti (Profilo 3): Energie cinetiche

Total Kinetic Energy on Slope Maximum Value



Piccole rocce grandi massi Slope

Total number of selected paths: 100 of 100 Rock Selection: Piccole rocce, grandi massi

Massi grandi (10 T) e piccoli (500 kg)

Risultati ottenuti dalle analisi a ritroso

•	BEDROCK OUTCROPS	💌		
	COEFF. NORMALE	COEFF. TANGENZIALE	COEFF. ATTRITO DINAMICO	COEFF. ROTOLAMENTO
PROFILO 1	0,3	0,8	0,8	0,57
PROFILO 2	0,35	0,7	0,8	0,67
PROFILO 3	0,35	0,6	0,8	0,67
	ASPHALT			
	COEFF. NORMALE	COEFF. TANGENZIALE	COEFF. ATTRITO DINAMICO	COEFF. ROTOLAMENTO
	0,4	0,9	0,5	0,1
	VELOCITA' ORIZZONTALE (m/s)	VELOCITA' VERTICALE		
	0,66	0,38		

Quadro riassuntivo delle principali grandezze ottenute

Risultati ottenuti dall' *«analisi a ritroso»*

I massi tendono ad arrestarsi lungo diversi punti del versante, con una maggior concentrazione, in taluni casi, in corrispondenza della sede stradale. In tutti i casi, tuttavia, si è osservato che essi non arrivano alla base del versante.

l livelli energetici raggiunti dai massi (grandi e piccoli) variano nell'intervallo tra **50 e 3000 kJ**.

Per i **piccoli massi** le energie sembrano assumere un valore piuttosto costante lungo tutti i profili e pari a circa **50-70 kJ**.

I grandi massi invece mostrano valori variabili con picchi tra 2000 e 3000 kJ nei punti di primo impatto sul versante e poi massimi e minimi relativi dell'ordine di 100-200 kJ lungo i settori successivi del versante.

In corrispondenza della **strada** si raggiungono valori medi di circa **300 kJ**.

CONCLUSIONI

- I dati ottenuti sono utili all'ingegnere per costruire una «mappa di pericolosità» sulla base di curve isocinetiche.
- In tal modo l'ingegnere potrebbe dimensionare al meglio eventuali opere di difesa passiva.
- PREVISIONE MODELLISTICA

COSCIENZA DEL RISCHIO.

SISMICITA' notevole aumento della pericolosità a causa dell'incremento che essa applica sull'accelerazione di gravità.

- La migliore progettazione delle opere di difesa e protezione è possibile solo se a monte vi è uno studio previsionale che ci consente di dimensionare l'opera con i giusti parametri.
- MAGGIOR SICUREZZA DELLE OPERE UMANE

MINORE RISCHIO PER LE VITE



Grazie per l'attenzione!