

Verifica delle condizioni di sicurezza della S.P. Lodovica in seguito ai fenomeni di crollo nella cava di Sesto di Moriano (Lucca)

Luca Lombardi, Nicola Casagli, Giovanni Gigli, Massimiliano Nocentini

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, luca.lombardi@geo.unifi.it, nicola.casagli@geo.unifi.it, giovanni.gigli@geo.unifi.it, massimiliano.nocentini@geo.unifi.it

Safety evaluation for the “Lodovica” road following rockfalls from Sesto di Moriano quarry (Lucca, Italy)

ABSTRACT: On October 28th 2004 a rockfall took place next to the northern limit of the limestone quarry “Bertolucci e Fiore”, near Sesto di Moriano (Lucca). After this event, some minor rockfalls developed in the quarry, with a total volume of more than 30 000 m³. The rock mass around the detachment zone is heavily fractured, with several huge blocks hanging in unstable conditions and threatening the regional road “Lodovica”, which is located immediately downslope from the quarry area. Since this is a very important route, we carried out investigations to assess the safety conditions of the road. These investigations include: 1) field trips to evaluate the extent of the unstable area, the volume of the involved material, and to recognize the failure or detachment mechanisms of the rock mass; 2) execution of a high resolution digital elevation model (DEM) of the rock face and the quarry floor using a high accuracy and long range 3D laser scanner. This technique allowed us to define the overall morphology of the area and the mean and maximum size of the rock blocks; 3) in situ rockfall simulations to evaluate rockfall runout, velocity and bounce height and to estimate the coefficients of restitution; 4) 2D numerical simulations of rockfalls along 5 profiles derived from the new DEM, performed by using two different methods (lumped mass and CRSP) in order to forecast the runout, the velocities, the bounce heights and the possible impact energy on the defence barriers. Based on numerical and in situ simulations, blocks were expected to collide with significant energy against the defence barrier only at its northern limit. After the critical section of the barrier was strengthened it was possible to assess that the risk for the “Lodovica” road was sufficiently low, and the road was again opened to traffic on December 24th, 2004.

Key terms: Quarry, rockfall, laser scanner DEM, rockfall simulation

Termini chiave: Cava, frana di crollo, laser scanner DEM, simulazioni caduta massi

Riassunto

In data 28 ottobre 2004 si è verificata una frana di crollo in roccia della parte settentrionale del fronte della cava “Bertolucci e Fiore”, in località Sesto di Moriano (Lucca). Fenomeni di crollo si sono ripetuti nei giorni successivi, con una mobilitazione complessiva di oltre 30 000 m³ di roccia.

In seguito a tali eventi, l’ammasso si presentava intensamente fratturato, con la presenza di blocchi in precario stato d’equilibrio, che minacciavano la sottostante S.P. Lodovica nel tratto prospiciente al piazzale di cava.

Le indagini necessarie per la verifica della sicurezza della viabilità sulla S.P. Lodovica, in seguito ai fenomeni franosi, hanno compreso le seguenti attività:

- 1) sopralluoghi per la verifica dell’estensione dell’area in frana, finalizzata alla stima delle volumetrie del materiale instabile e all’individuazione dei meccanismi di rottura e di distacco dei blocchi;
- 2) realizzazione di un DEM ad alta precisione mediante l’impiego di un laser scanner long ranging 3D;
- 3) simulazioni in situ di caduta massi per una valutazione

diretta delle distanze di arrivo per una scelta più accurata dei coefficienti di restituzione energetica;

- 4) simulazioni numeriche di caduta massi lungo 5 profili tracciati sul nuovo rilievo topografico con due modelli bidimensionali (*lumped mass* e *CRSP*). I materiali affioranti sono stati classificati in 5 categorie; i parametri utilizzati nelle simulazioni tengono conto delle osservazioni in situ e di prove dirette di caduta massi.

Sulla base dei risultati ottenuti è stato suggerito l’adeguamento della barriera paramassi esistente. In seguito a questo intervento, in data 24 dicembre 2004, è stato possibile riaprire la viabilità sulla S.P. Lodovica.

1. Introduzione

Nelle zone caratterizzate da elevata energia del rilievo, da una disposizione sfavorevole della giacitura delle discontinuità e/o da un intenso grado di fratturazione dell’ammasso roccioso, il rischio di frane per crollo è molto elevato. Numerosi sono gli studi per l’individuazione delle zone più soggette a fenomeni di crollo e per la

determinazione delle traiettorie dei blocchi (Giani, 1992; 1997). In ogni caso la delimitazione delle aree a maggior rischio di crolli presuppone una buona conoscenza delle proprietà geomeccaniche dell'ammasso roccioso e in particolare delle caratteristiche di fratturazione. La modellizzazione delle possibili traiettorie di caduta dei blocchi necessita altresì di una dettagliata topografia dell'area e di un'appropriata scelta dei coefficienti di restituzione del substrato.

Nel presente lavoro viene descritta la metodologia applicata ad una frana di crollo avvenuta all'interno di una cava prospiciente una strada di grande comunicazione. Una delle problematiche occorse per le verifiche di sicurezza è stata la mancanza di un supporto topografico adeguato alle

caratteristiche del sito (lavorazioni in atto all'interno della cava) e all'evento franoso, limitazione risolta tramite un rilievo laser scanner tridimensionale dell'area di studio.

2. Inquadramento geografico

L'area oggetto di studio è costituita dalla cava "Bertolucci e Fiore" e dal prospiciente tratto della Strada Provinciale n° 9 Lodovica, in località Sesto di Moriano (Lucca). La cava Bertolucci e Fiore è una cava di inerti e presenta uno sviluppo areale di circa 10 ha con un dislivello massimo di circa 190 m. Le pendenze medie dei fronti sono circa 60° anche se localmente possono superare gli 80°. Il tratto della strada provinciale interessato dal dissesto è lungo 350 m.



Figura 1 - Localizzazione dell'area di studio e vista prospettica della cava Bertolucci e Fiore
Study area location and perspective view of the Bertolucci and Fiore quarry

3. Inquadramento geologico – geologico-tecnico

La cava ricade all'interno della formazione della Maiolica costituita da un'alternanza di strati calcarei aventi uno spessore da centimetrico a decimetrico, alternati con livelli marnosi-argillosi. Sono presenti anche livelli selciferi di colore bruno di spessore centimetrico (AA.VV., 1992). A monte della cava la formazione della Maiolica passa alla formazione stratigraficamente superiore della Scaglia Rossa, contatto che in alcuni tratti risulta parzialmente tettonizzato.

Dal punto di vista geomeccanico l'ammasso roccioso risulta interessato da quattro famiglie di discontinuità. La persistenza delle diverse famiglie di discontinuità è generalmente inferiore al metro eccezion fatta per la stratificazione. La spaziatura va da 0,1 m a 0,5 m per la stratificazione mentre è di circa 1 m per le famiglie di giunti. L'apertura delle discontinuità è nella maggioranza

dei casi serrata anche se il valore di apertura varia da chiusa a larga; il riempimento quando presente è costituito da sabbia limosa e limo sabbioso. Le discontinuità sono prevalentemente planari. Nell'area di distacco sono presenti alcuni *master joint* che hanno svolto un importante ruolo sulla geometria del movimento.

4. Descrizione dell'evento franoso

In data 28 ottobre 2004 si è verificata una frana di crollo in roccia in corrispondenza del limite settentrionale del fronte di scavo della cava. Fenomeni di crollo si sono ripetuti nei giorni 3-4 novembre 2004 con retrogressione della scarpata (figura 2). Complessivamente le frane hanno mobilizzato oltre 30 000 m³ di materiale.

In seguito a questi eventi franosi la Provincia di Lucca ha disposto la chiusura della SP Lodovica e la realizzazione di un by-passa valle (figura 2).

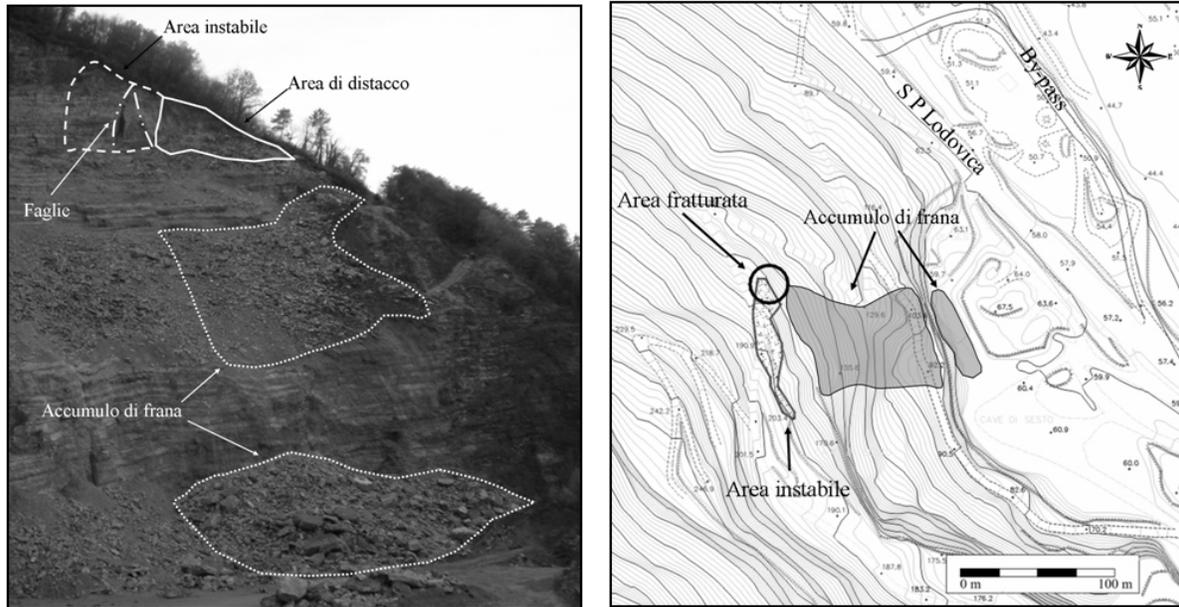


Figura 2 – Localizzazione dei diversi settori della frana
View and sketch of the different parts of the landslide

In data 22 novembre la ditta Betonval ha presentato un progetto per la messa in sicurezza del dissesto con l'installazione di un sistema di monitoraggio topografico e la realizzazione di un rilevato a protezione della SP Lodovica. In data 3 dicembre da parte degli autori è stato eseguito un sopralluogo insieme ai tecnici della Provincia di Lucca e della Protezione Civile della Regione Toscana, per valutare l'entità dell'evento, i possibili scenari di rischio e l'efficacia delle misure di mitigazione del rischio messe in opera al momento.

5. Metodologia di studio

Per la verifica della sicurezza della SP Lodovica e del by-pass, rispetto ai possibili eventi di crollo è stata adottata la seguente metodologia:

1. caratterizzazione dell'area in frana;
2. adeguamento della topografia alla situazione post-frana;
3. simulazioni in situ di caduta massi;
4. verifiche delle distanze di arrivo dei blocchi e dell'energia di impatto sulle strutture di difesa e contenimento.

Il primo passo è stato l'identificazione tipologica del fenomeno franoso e del materiale coinvolto, nonché la valutazione delle condizioni al contorno dell'area in frana per la stima della pericolosità residua del fenomeno.

Successivamente si è reso necessario adeguare la topografia alla situazione post-evento; questo è stato realizzato mediante l'esecuzione di un rilievo laser scanner 3D (Fröhlich & Mettenleiter, 2005).

Nella terza fase, per supportare l'applicazione dei modelli di previsione di rotolamento massi, sono state

effettuate delle simulazioni in situ di caduta massi.

L'applicazione dei modelli previsionali, ha consentito di verificare le distanze di arrivo dei blocchi e le energie associate al loro movimento (Giani, 1992;1997). In particolare, per lo scopo sono stati utilizzati i codici bidimensionali Rocfall (Rocscience, 2005) e Georock (Geostru, 2005).

Il primo modello, sviluppato dalla RocScience, si basa sul metodo *lumped mass* che considera le seguenti ipotesi: schema piano, profilo del pendio assimilabile ad una spezzata costruita da segmenti rettilinei, blocco puntiforme e resistenza dell'aria trascurabile. Con queste assunzioni la traiettoria di caduta è funzione dei coefficienti di restituzione e del coefficiente d'attrito al roto-scivolamento dei materiali con i quali il blocco viene a contatto e del profilo topografico, mentre è indipendente dalla massa del blocco.

Il secondo codice, sviluppato dalla società Geostru, si basa sul metodo CRSP proposto da Pfeiffer & Bowen (1989). Il modello CRSP permette di modellare il moto di caduta di blocchi aventi la forma di sfere, cilindri o dischi, con sezione circolare nel piano verticale del movimento. Per descrivere il movimento dei blocchi il modello CRSP applica l'equazione del moto parabolico di un corpo in caduta libera ed il principio di conservazione dell'energia totale. Il fenomeno dell'impatto viene modellato utilizzando come ulteriori parametri, rispetto al metodo *lumped mass*, la rugosità del pendio e la dimensione dei blocchi. Il modello considera le combinazioni dei movimenti di caduta libera, di rimbalzo, di rotolamento e di scivolamento, che variano a seconda delle dimensioni dei blocchi e della rugosità del pendio.

6. Verifiche delle condizioni di sicurezza

Dal sopralluogo è emerso che l'area in frana comprendeva anche una zona intensamente fratturata presente a nord della scarpata principale (figura 2).

Lo spessore del materiale potenzialmente instabile, valutato sulla base delle sezioni sismiche a rifrazione eseguite dalla ditta Geodes (2004), risultava mediamente compreso tra 4 e 6 m.

Sulla base delle precedenti considerazioni, il volume del materiale potenzialmente instabile è stato stimato in circa 6000 m³.

Al centro del coronamento della frana è presente un blocco monolitico in precarie condizioni di stabilità. Dato l'assetto delle discontinuità e il loro rapporto con il pendio, si reputava possibile un distacco del blocco per ribaltamento/scivolamento basale.

Il rilievo topografico della parete instabile e dell'accumulo di detrito è stato eseguito mediante l'applicazione della tecnologia laser scanner da terra. Questo è stato realizzato mediante l'impiego del dispositivo 3D Laser Imaging Sensor, modello LMS-Z420i, prodotto dalla Riegl Laser Instrument Systems.

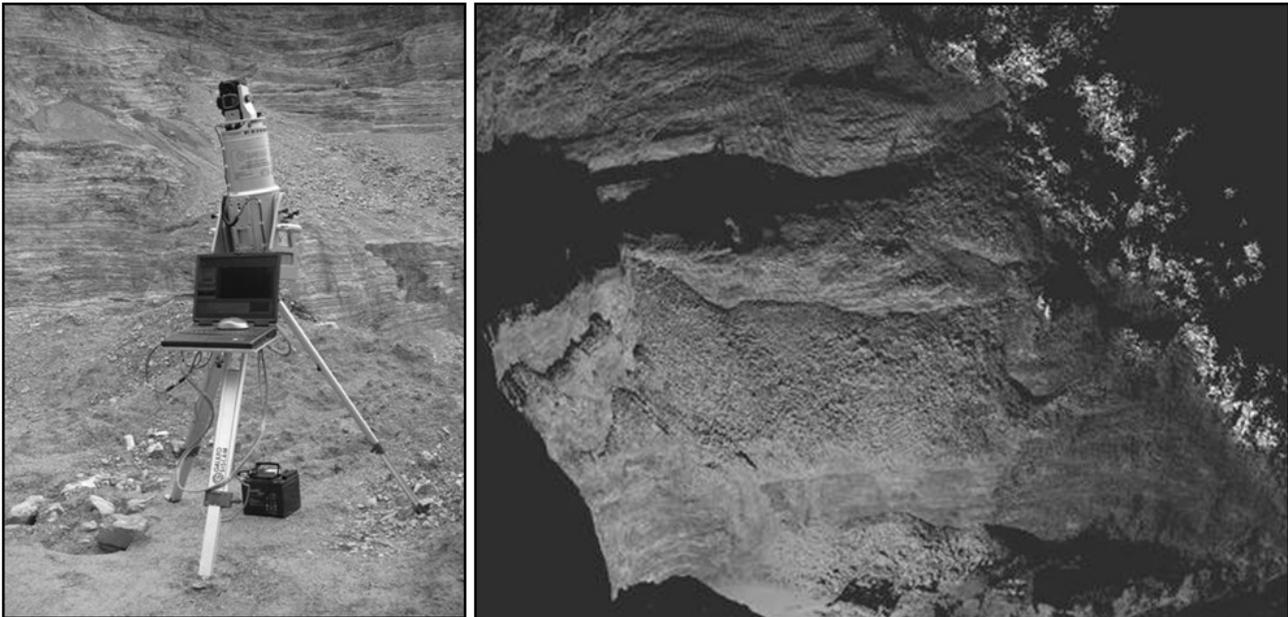


Figura 3 – Apparecchiatura laser scanner e ortoimmagine digitale della cava ottenuta proiettando una foto digitale sul modello digitale del terreno prodotto con la scansione laser

Laser scanner instrument and digital orthoimage of the quarry obtained by dropping a digital photo on the digital model of the terrain

La tecnica utilizza un fascio di luce coerente (laser) di ridotte dimensioni per scandire una superficie sotto un predefinito angolo solido e con un determinato pattern di scansione (Riegl, 2004). La nuvola di punti prodotta dalla scansione laser costituisce direttamente il modello digitale tridimensionale dell'oggetto scandito.

Il modello digitale del terreno ottenuto, opportunamente georiferito, permette di eseguire determinazioni morfometriche dirette dalle quali è stato possibile stimare in circa 420 m³ il volume del blocco monolitico instabile (figura 4).

La figura 4 mostra anche un particolare della nuvola di punti del rilievo laser scanner in corrispondenza dell'accumulo dei blocchi, sulla quale è possibile effettuare misurazioni della dimensione dei blocchi stessi. Le misure effettuate hanno mostrato come i blocchi maggiori avessero un volume fino a 10 m³.

I blocchi prodotti dai due eventi franosi hanno raggiunto la porzione superiore del piazzale di cava, formando una

tipica falda detritica a pendenza di circa 40° (figura 2). I blocchi che presentano le distanze di propagazione maggiori hanno volumi inferiori a 2 m³.

La riduzione del volume dei blocchi con la distanza di arrivo è imputabile a fenomeni di frammentazione in seguito agli impatti con il substrato e con gli altri blocchi. Si è ritenuto tuttavia possibile, anche se poco probabile, il verificarsi di fenomeni di rotolamento di blocchi di grossa taglia (fino a 10 m³). In questo caso il processo può avvenire con limitata frammentazione e progressivo arrotondamento della massa in movimento.

Sulla base delle osservazioni effettuate in situ, sono stati considerati due *scenari di rischio* per la sede stradale:

- crollo di blocchi di massa pari a 5 000 kg (volume di ca 2 m³) originati dalla frammentazione di blocchi più grandi e con prevalente meccanismo di rimbalzo;
- crollo di blocchi di massa pari a ca. 25 000 kg (volume di ca 10 m³) con limitata frammentazione e prevalente meccanismo di rotolamento.

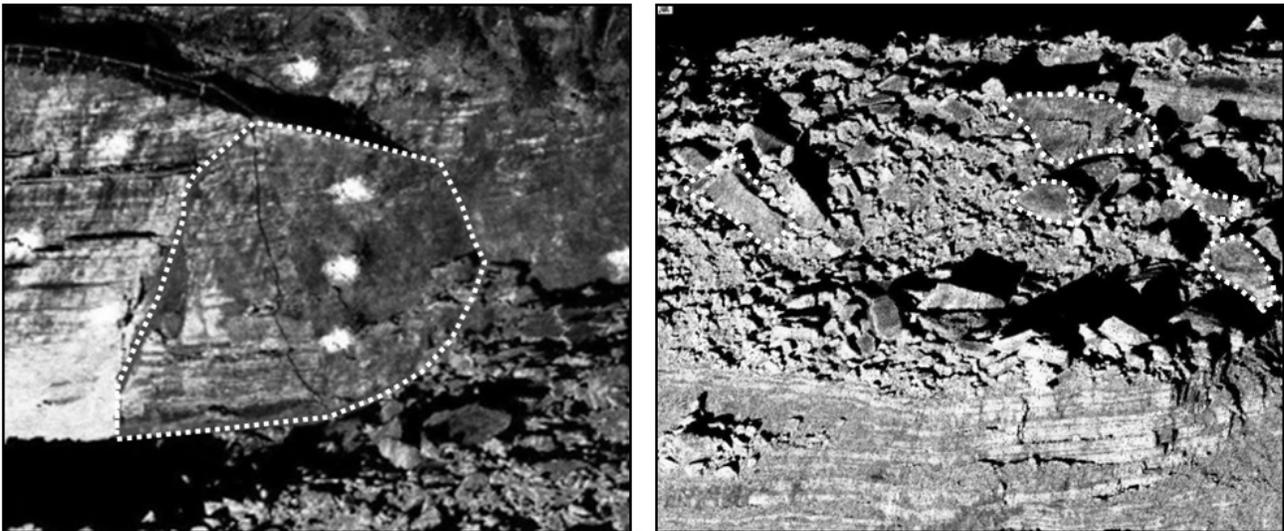


Figura 4 – Particolare della nuvola di punti in corrispondenza del blocco monolitico (a sinistra) e dell’accumulo di blocchi (a destra) di cui sono state determinate le dimensioni

Detail of the point cloud in correspondence of the monolithic block (left) and of the debris (right) of which the size has been measured

Sono state effettuate delle simulazioni in situ di caduta blocchi che, per motivi di sicurezza, si sono dovute limitare a blocchi di pochi chilogrammi di massa. I blocchi sono stati gettati dall’apice del coronamento della frana e la loro caduta è stata filmata da una telecamera digitale installata sul piazzale di cava.

Sono state eseguite complessivamente 10 prove e, in tutti i casi, i blocchi lanciati non hanno oltrepassato i limiti dell’accumulo detritico alla base del versante.

eseguite su 5 profili (figura 5) ottenuti dall’integrazione del rilievo laser scanner con la Carta Tecnica Regionale, classificando, sulla base di quanto osservato in situ, i materiali affioranti in 5 categorie (tabella 1) (Giani, 1997).

Le simulazioni con il programma Rocfall, basato sul metodo *lumped mass*, sono state eseguite per verificare lo *scenario a*: blocchi aventi masse inferiori ai 5 000 kg, velocità iniziali dei blocchi pari a 2 m/s con deviazione standard di 0,25 m/s ed un numero di 10 000 lanci per ogni profilo.

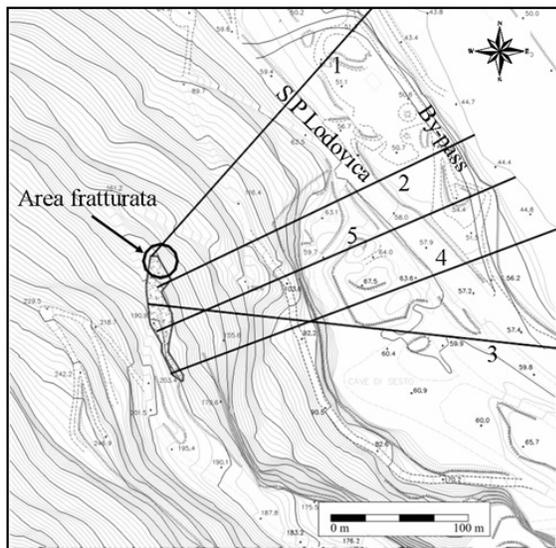


Figura 5 – Localizzazione dei profili su cui sono state eseguite le simulazioni

Location of the simulation profiles

Le simulazioni numeriche di caduta blocchi sono state

Tabella 1- Parametri geomeccanici considerati nelle simulazioni. K_n = coefficiente di restituzione normale, K_s = coefficiente di restituzione tangenziale, θ = angolo di attrito al roto-scivolamento ($^\circ$). Per ogni parametro è indicato il valore medio e la deviazione standard

Geomechanic parameters use in the simulation. K_n = coefficient of normal restitution, K_s = coefficient of tangential restitution, θ = combined friction angle for rotational and sliding movement

MATERIALE	K_n	K_s	θ
ROCCIA NUDA	0,8 ± 0,06	0,8 ± 0,06	30 ± 2
DETRITO	0,4 ± 0,06	0,7 ± 0,06	30 ± 2
RIPORTO	0,3 ± 0,06	0,35 ± 0,06	25 ± 2
VEGETAZIONE	0,3 ± 0,06	0,4 ± 0,06	25 ± 2
ASFALTO	0,4 ± 0,06	0,9 ± 0,06	30 ± 2

Le simulazioni con il programma Georock, basate sul metodo CRSP, sono state eseguite per lo *scenario b*; sulla base delle osservazioni effettuate in situ, sono stati considerati per le simulazioni blocchi sferici di 3 m di diametro con densità di 2 600 kg/m³. Il volume

corrispondente risulta di 9,4 m³ e la massa di 24 492 kg. La scelta di blocchi di dimensioni maggiori rispetto a quelli considerati per il modello *lumped mass* è giustificata dal fatto che con il modello CRSP è possibile simulare anche il meccanismo di rotolamento che può interessare blocchi di dimensioni considerevoli senza significativa frammentazione.

La scelta della forma sferica è stata ritenuta preferibile alla cilindrica e alla discoidale, in quanto i blocchi prodotti dai crolli precedenti hanno una forma prismatica equidimensionale che, in caso di un persistente rotolamento, tende ad evolvere in una sub-sferica.

E' stata utilizzata la stessa classificazione dei materiali affioranti impiegata per il modello *lumped mass*, con i

medesimi coefficienti di restituzione energetica (tabella 1). Il coefficiente di rugosità è stato assunto pari a 0,1 m. Sono state considerate velocità iniziali dei blocchi pari a 2 m/s ed un numero di 100 lanci per ogni profilo.

Nella tabella 2 sono riportati i risultati delle simulazioni con i due modelli. Soltanto per il profilo 2 i blocchi impattano contro il rilevato con energie e velocità significative (rispettivamente di 1 323 kJ e 23 m/s per Rocfall e 25 000 kJ e 14 m/s per Georock), mentre per il profilo 5 i blocchi arrivano ad impattare contro l'argine soltanto per il modello Rocfall e comunque con energie trascurabili.

Nelle figure 6-7 sono riportati i risultati delle elaborazioni eseguite con i due modelli per il profilo n°2.

Tabella 2 - Tabella riepilogativa delle analisi con le progressive (in m) dei tre elementi sensibili e le distanze massime calcolate con i due approcci sui cinque profili

Table summarizing the results of the simulations for the 3 main parameters and for the maximum distances reached with the 2 models along the 5 profiles

	Argini	S.P. Lodovica	By-pass	Rockfall	CRSP
PROFILO 1	-	147	220	30	-
PROFILO 2	158	171	237	158	158
PROFILO 3	218	283	283	205	190
PROFILO 4	205	214	248	170	190
PROFILO 5	179	195	238	179	145

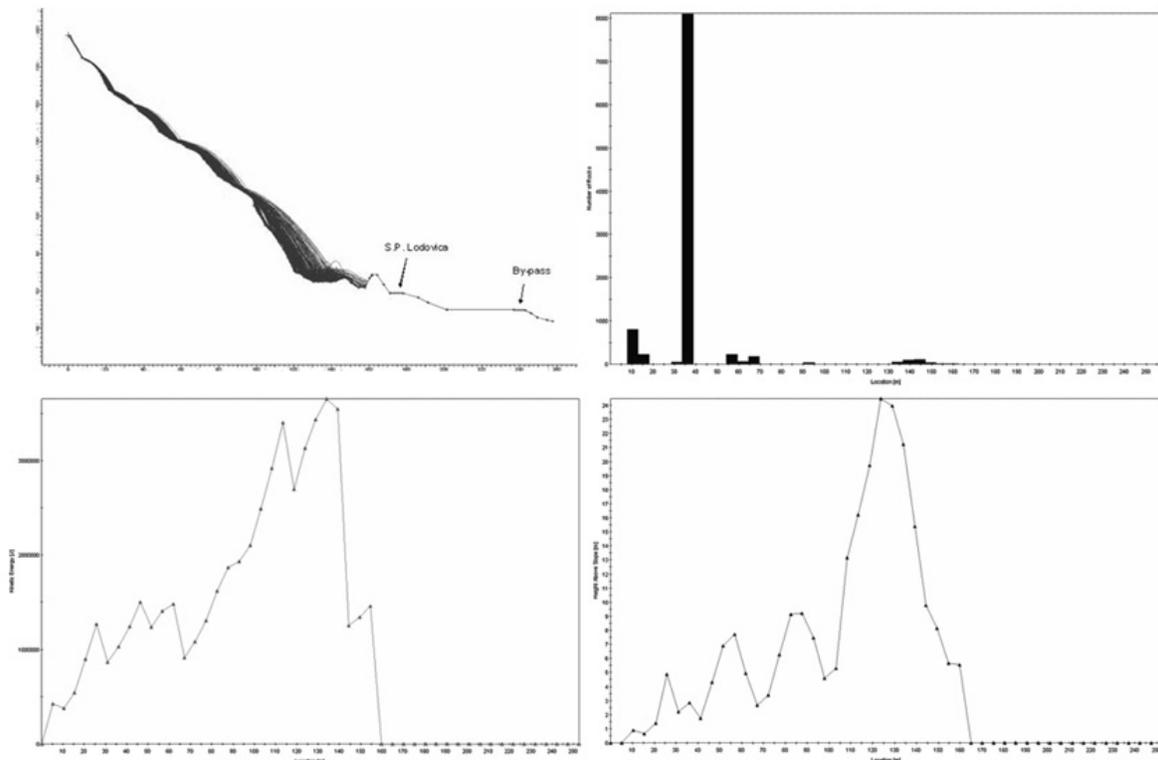


Figura 5 – Esempio dei diversi layout del programma Rocfall per il profilo 2
Example of the various Rocfall layouts for profile 2

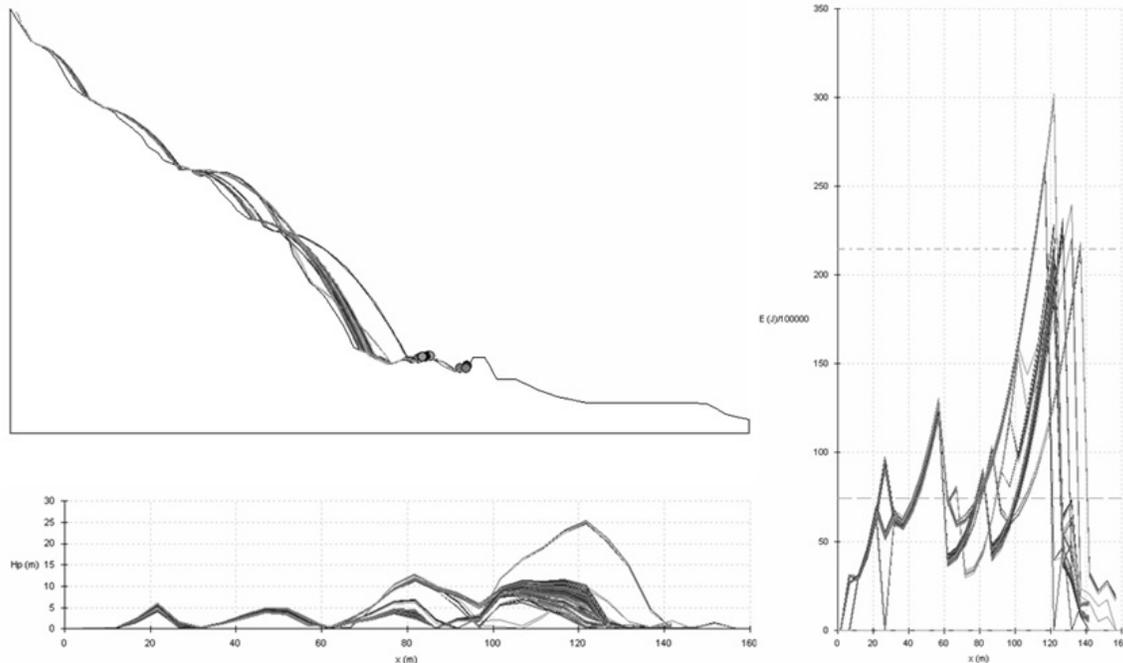


Figura 1 - Esempio dei diversi layout del programma Georock per il profilo 2
Example of the various Georock layouts for profile 2

I risultati ottenuti dalle verifiche di propagazione dei blocchi hanno previsto che soltanto per il profilo 2 e 5 i massi possono arrivare a collidere con l'argine costruito a protezione della SP e per questi ne è stata determinata l'energia di impatto.

7. Conclusioni

Nel presente lavoro sono riportati i risultati di uno studio per la verifica della sicurezza della SP Lodovica adiacente alla cava di inerti Bertolucci e Fiore per un tratto di 350 m in seguito a due eventi franosi occorsi all'interno della cava stessa.

La metodologia applicata ha previsto dapprima la valutazione della tipologia del fenomeno e lo stato di attività delle aree limitrofe l'area di distacco, nonché le caratteristiche del materiale di accumulo. Prima di poter applicare le verifiche di stabilità ai diversi versanti si è reso necessario adeguare la topografia mediante la realizzazione di un rilievo laser scanner. Successivamente sono state eseguite delle simulazioni in situ di caduta massi per poter avere dei riscontri sulle distanze dei blocchi in fase di scelta dei parametri di restituzione.

Le simulazioni sono state indirizzate alla valutazione dei vari parametri del moto dei blocchi: traiettorie, altezze massime di rimbalzo, distanze di propagazione e energie dei blocchi.

Le verifiche sono state effettuate con due metodi

diversi: il primo considera il blocco come se fosse un punto e la massa concentrata in esso (metodo *lumped mass*), mentre nella metodologia CRSP, al blocco viene associata massa e forma che può essere cilindrica, discoidale oppure sferica; inoltre questo metodo permette di analizzare anche il movimento di blocchi per rotolamento.

Nello studio i due modelli sono stati utilizzati per considerare due scenari diversi: il primo per blocchi aventi dimensioni fino a 5 000 kg, dove il movimento principale è per rimbalzo; il secondo per masse fino a 25 000 kg dove è possibile analizzare anche il movimento per rotolamento.

Dalle verifiche di sicurezza risulta che soltanto per i profili 2 e 5 i blocchi arrivano ad impattare il rilevato a difesa della SP Lodovica. Sulla base delle possibili traiettorie dei blocchi e dei valori di energia e velocità associati è stata suggerita la verifica e l'eventuale adeguamento dell'argine a protezione della sede stradale. In seguito a questi interventi, in data 24 dicembre 2004, è stato possibile riaprire la viabilità sulla S.P. Lodovica.

8. Ringraziamenti

Il lavoro è stato svolto nell'ambito della convenzione fra UNIFI-DST e Regione Toscana Sistema di Protezione Civile dal titolo "Verifica della sicurezza della viabilità sulla S.P. Lodovica in seguito ai fenomeni franosi verificatisi nella cava di Sesto di Moriano (Provincia di Lucca)".

Bibliografia

- AA.VV., 1992. Guide geologiche regionali: Appennino tosco-emiliano. Società geologica italiana. BE-ma, 329 pp.
- Fröhlich, C., Mettenleiter M., 2005. Terrestrial laser scanning - new perspectives in 3D surveying. Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (3/W19)
- Geodes 2004. Cava Bertolucci e Fiore, Frazione di Sesto di Moriano (LU). Movimento franoso del 3-4 Novembre 2004. Intervento di messa in sicurezza. Relazione geologica e geotecnica. Committente Betonval S.p.A., inedito.
- Geostru 2004. Georock, Ver. 4.0.45.
- Giani G. P. 1992. Rock slopes stability analysis. Balkema, Rotterdam, 361 pp.
- Giani G. P. 1997. Caduta massi. Analisi del moto ed opere di protezione. Collana: Argomenti di Ingegneria Geotecnica, Hevelius Edizioni, Benevento, 118 pp.
- Pfeiffer, T., Bowen, T., 1989. Computer simulation of rock falls. Bulletin of IAEG, 26 (1), 135-146 pp.
- Riegl Laser Measurement Systems GmbH 2004. Technical data at www.riegl.com
- Rocscience 2004. Rocfall, Statistical Analysis of Rockfalls. Ver. 4.042.