

## THE SCASCOLI CASE STUDY (BOLOGNA – ITALY)

### DESIGN AND SAFETY MEASURES OF A LARGE LANDSLIDE AREA

Giorgio Giacchetti<sup>1</sup>, Gianfranco Marchi<sup>2</sup>, Gianluca Benedetti<sup>3</sup>, Alberto Landuzzi<sup>2</sup>

#### SOMMARIO

Le gole di Scascoli sono chiuse tra pareti di arenarie e marne alte tra 40 e 80 m. Indagini geomeccaniche avviate nel 2002 hanno individuato, nel sito denominato “Mammellone 1”, una porzione di ammasso roccioso potenzialmente instabile. È stato quindi avviato il monitoraggio sulle discontinuità principali. Nel marzo 2005 dal sito “Mammellone 1” si è staccata una frana in roccia del volume di circa 30.000 m<sup>3</sup>. Sulla base dei dati di monitoraggio e dei rilievi, la stabilità è stata analizzata a ritroso con vari metodi (LEM, FEM, DEM), al fine di individuare poi, gli spostamenti critici durante i lavori. Nel tratto di valle interessato dal crollo del Mammellone, il ripristino definitivo della strada e la sistemazione del torrente Savena hanno richiesto soluzioni progettuali che tenessero conto sia del poco spazio disponibile per l'affiancamento della strada all'alveo fluviale, sia della potenziale pericolosità della grande frana di Scascoli, nel versante destro della valle. Tale frana, benché antica e complessivamente quiescente, fa registrare spostamenti dell'ordine di 1÷2 cm/anno in prossimità dell'unghia.

**Parole chiave:** frana, crollo, monitoraggio, analisi di stabilità

#### ABSTRACT

Landslide processes commonly occur on both sides of the Scascoli Gorge. The valley floor is flanked by vertical sandstone walls 40 to 80 m high, as well as steep slopes of heavily fractured and weathered rocks. The most important rockfalls known up to date occurred from the left valley side in 1992, 2002 and 2005, when a rock wedge called Mammellone 1, collapsed by a large and complex rockslide, with an estimated volume of 25000 m<sup>3</sup>. The collapse of the Mammellone 1 shifted the riverbed to the right valley side where, just a few weeks later, a roto-translational earth slide was triggered by that undermining process. In order to rehabilitate the local road, three safety interventions were planned in the following order: (a) reshaping the residual wall of the Mammellone 1; (b) removing the shallow earth slide from the right valley side, and consolidating its detachment zone; (c) carrying out training works on the riverbed and reconstructing the road embankment.

**Keywords:** rockfall, landslide, monitoring, numerical models

---

1 Officine Maccaferri S.p.A, Via degli Agresti, 640123 Bologna (tel: +39 051 6436000 fax: +39 051 23 65 07 e-mail: [giorgio.giacchetti@maccaferri.com](mailto:giorgio.giacchetti@maccaferri.com))

2 Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria (e-mail: [alberto.landuzzi@mail.ing.unibo.it](mailto:alberto.landuzzi@mail.ing.unibo.it); [gianfranco.marchi@mail.ing.unibo.it](mailto:gianfranco.marchi@mail.ing.unibo.it))

3 Enser srl, società d'ingegneria, Viale Baccarini 29, 48018 Faenza (RA). (Tel. +39 546 663423 e-mail: [gianluca.benedetti@enser.it](mailto:gianluca.benedetti@enser.it))

## INTRODUZIONE

Le gole di Scascoli si trovano nella valle del Torrente Savena, nell'Appennino a sud di Bologna. Le gole sono chiuse tra pareti rocciose verticali alte tra 40 e 80 m. Il 12.03.05 dalla parete in sinistra idrografica denominata Mammellone 1 sono franati circa 30000 m<sup>3</sup> di roccia, che hanno sbarrato il torrente e interrotto la strada di fondovalle. Alcune settimane dopo il crollo, l'erosione del torrente al piede del versante destro ha innescato in quest'ultimo uno scorrimento roto-traslativo di terra, del volume di oltre 8500 m<sup>3</sup>. I lavori di ripristino sono stati ostacolati principalmente dall'instabilità della parete rocciosa in sinistra idrografica, che incombeva su tutta l'area in dissesto. I lavori di bonifica sono stati perciò organizzati nelle fasi seguenti: (a) la riprofilatura e il monitoraggio della parete rocciosa in sinistra idrografica; (b) trattamento della frana in terra in destra idrografica; (c) sistemazione idraulica e ricostruzione della strada nel fondovalle.

Per verificare la stabilità del Mammellone 1 sono stati utilizzati modelli ad elementi distinti (DEM) e modelli ad elementi finiti (FEM), validati mediante back analysis. Tali modelli hanno permesso di identificare le fasi critiche di escavazione in termini di spostamenti significativi. Ciò ha permesso di mettere in sicurezza il cantiere sottostante, durante la sistemazione della frana di terra in destra idrografica ed il successivo ripristino stradale.

Il lavori sul versante destro della valle sono consistiti nella rimozione del corpo detritico instabile, nella parziale riprofilatura della nicchia di distacco e nel trattamento della stessa con un soil nailing leggero, mirato ad impedire il distacco di piccole masse superficiali, a controllare l'erosione per ruscellamento ed a favorire la ripresa della vegetazione.

Il ripristino del corpo stradale è stato condotto mediante la realizzazione di un rilevato permeabile e flessibile, capace di adattarsi alle deformazioni indotte dalla grande frana di Scascoli, che interessa un lungo tratto di valle in destra idrografica. Il rilevato è stato realizzato mediante scogliera rinforzata e Green Terramesh nel lato fiume e con gabbioni fondati su micropali per i muri di controripa.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Prima del crollo il Mammellone 1 era alto circa 70 m, e presentava un oggetto regolare di una decina di metri, causato dalla progressiva erosione del corso d'acqua al piede di un ammasso roccioso delimitato da faglie distensive. Come tutte le pareti in sinistra idrografica delle Gole di Scascoli, l'ammasso in questione è costituito da unità appartenenti al Gruppo di Bismantova (età Burdigaliano sup.- Serravalliano), con spessore locale da 200 a 250 m. Si tratta di arenarie ben cementate in strati e banchi, intervallate da arenarie finissime con matrice marnosa, mediamente cementate, in strati che compongono intervalli di diversi metri. Nella zona del Mammellone 1 gli strati immergono a reggipoggio, con scarsa inclinazione (Enser, 2000; Giacchetti G., 2004).

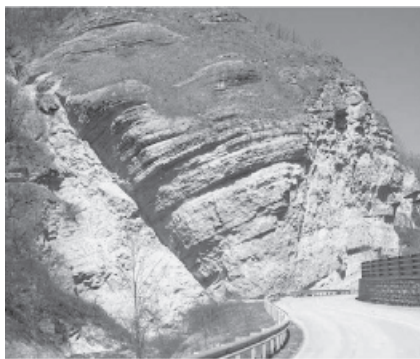
Il versante in destra idrografica delle Gole di Scascoli è interessato da deformazioni gravitative profonde che coinvolgono decine di milioni di metri cubi di terra e roccia. L'insieme di queste deformazioni è stato attribuito alla messa in posto di una grande e complessa frana per scivolamento, nota come "grande frana di Scascoli" (Landuzzi A. & Bernagozzi G., 1996). Nel fondovalle queste deformazioni si manifestano con movimenti misurati di alcuni centimetri all'anno, mentre nelle scarpate frontali, prospicienti la strada di fondovalle si osservano frequenti situazioni di marcata instabilità locale (Gottardi G. et alii, 2004). Tra queste ultime si segnalano distacchi di blocchi da ammassi rocciosi degradati, processi di creep accelerato e piccole frane rototraslazionali.

## CROLLO DEL 12 MARZO 2005

Il Mammellone 1 è crollato il 12 marzo 2005 (fig. 1). Sul Torrente Savena si è formato un lago di sbarramento e la strada di fondovalle è stata completamente distrutta per un tratto di circa 100 m. La nicchia di distacco era un diedro con sviluppo verticale massimo di 60 m (fig. 2). La faccia di sinistra del diedro si è sviluppata sia su superfici di taglio preesistenti (superfici piane regolari, ossidate, di colore nocciola), sia su superfici di neo-formazione (superfici debolmente irregolari, grigie). La faccia destra del diedro corrisponde a una lunga discontinuità preesistente, con morfologia regolare, completamente ossidata.

Com'è stato evidenziato dalle osservazioni in sito e dalle analisi di stabilità, il corpo roccioso crollato, originariamente a sbalzo, ha prodotto sollecitazioni a trazione sui giunti di strato e su alcuni giunti minori trasversali alla stratificazione. Contemporaneamente, sulla faccia sinistra del diedro si sono manifestati processi di rottura progressiva della roccia, con estensione delle fratture preesistenti. Questi ultimi processi si sono sviluppati con velocità crescente fino al collasso. La massa instabile si è quindi mossa nei primi istanti con cinematismo di scivolamento sulla faccia destra e sulla metà inferiore di quella sinistra; dopo pochi metri il moto è divenuto di ribaltamento. Successivamente, durante la caduta, la massa si è scomposta in blocchi, alcuni dei quali con dimensione di migliaia di metri cubi, che sono rovinati in alveo e in parte sulla strada.

Le cause che hanno predisposto il crollo sono da ricercare principalmente nelle scadenti proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso, nei processi di rammollimento (softening) e nella morfologia aggettante della parete, prodotta dallo scalzamento al piede praticato nel tempo dal torrente Savena.



**Fig. 1:** Mammellone 1 prima del 12-03-2005

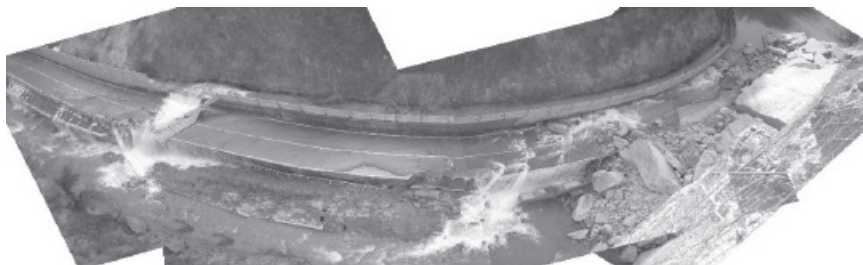
**Fig. 1:** Mammellone 1 before 12-03-2005



**Fig. 2:** Mammellone 1 dopo il 12-03-2005

**Fig. 2:** Mammellone 1 after 12-03-2005

Poco tempo dopo il crollo del 2005, le ispezioni in parete hanno evidenziato nella faccia destra del diedro residuo una serie di fratture per trazione, verticali a sviluppo plurimetrico, con apertura massima centimetrica e labbra segmentate, giustapposte. Tali fratture segnalavano la grave instabilità potenziale della parete, per uno spessore massimo di 8÷10 m. Il volume di roccia in pericolo di crollo imminente era stimabile in 13000 m<sup>3</sup>. Si è quindi deciso di riprofilare la parete, sulla base di un vecchio piano di demolizione opportunamente modificato.



**Fig. 3:** vista della porzione di strada coinvolta dal crollo del Mammellone 1

**Fig. 3:** Mammellone 1 rockfall: view of damaged street

Nel frattempo il Torrente Savena si è in parte incanalato al piede del versante idrografico destro. Il nuovo tracciato del corso d'acqua si è sviluppato tra il pendio in terra e la barriera paramassi in acciaio, installata in testa al muro di controripa della strada. Lo scorrimento incontrollato delle acque ha rapidamente eroso la strada ed inciso il piede del versante detritico in destra idrografica. Dopo alcune settimane si è sviluppata una frana per scorrimento rototraslativo, su un fronte di un centinaio di metri e con un'altezza massima di 80 m circa. Gli spostamenti hanno raggiunto velocità massime di 3÷4 m/giorno, per poi ridursi progressivamente con il raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio.



**Fig. 4:** Frana rototraslativa in destra Savena

**Fig. 4:** roto-translational earth slide



**Fig. 5:** Strada fondovalle Savena a ottobre 2005

**Fig. 5:** Savena valley road (october 2005)

## INDAGINI GEOMECCANICHE PRECEDENTI IL CROLLO

La possibilità di crollo del Mammellone 1 era stata prevista grazie alla campagna di indagini geomeccaniche in sito ed alle successive analisi di stabilità. Gli studi sull'ammasso sono stati condotti per approssimazioni successive, reiterando le seguenti fasi: (a) rilievo geomeccanico; (b) prove di laboratorio e analisi dei dati; (c) modellazione; (d) verifica in sito. I rilievi geomeccanici sono stati eseguiti direttamente in parete, anche se il pericolo di crolli, gli oggetti ed il degrado superficiale della roccia hanno limitato gravemente il campo d'azione dei rocciatori.

Note le caratteristiche generali dell'ammasso roccioso, la scala del problema e l'incertezza dei modelli geomeccanici, le analisi sono state affrontate con i metodi LEM e FEM. In particolare, l'ammasso roccioso è stato trattato come mezzo pseudo-continuo nei modelli agli elementi finiti (FEM), e come mezzo giuntato nei modelli all'equilibrio limite per scivolamenti planari o a cuneo (LEM).

## Metodo dell'equilibrio limite

La parete del Mammellone 1 era segnata da numerose discontinuità di lunghezza pluridecimetrica, che potevano influire sulla stabilità globale del fronte roccioso. Sulla base dei rilievi è stato realizzato un modello geometrico tridimensionale, per identificare i poliedri rocciosi che potevano formarsi. Il modello così ottenuto ha consentito anche di prevedere come si sarebbero presentate le discontinuità sul fronte di progetto. Il tipo di modellazione scelto si basa sull'ipotesi semplificativa che i giunti siano planari e continui. Nonostante le semplificazioni operate, il modello ottenuto è sufficiente a descrivere lo stato di suddivisione dell'ammasso.

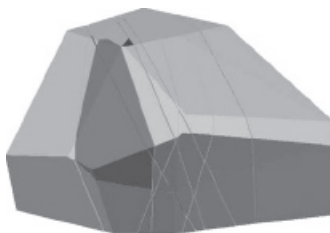
**Tab. 1** – Parametri d'ingresso per l'analisi LEM.

**Tab. 1** – LEM analysis: input parameters

Criterio rottura	Param.	Valore attendibile	Valore utilizzato
Barton Bandis	JCS	30 - 50 MPa	45 MPa
	JRC	8 - 12	11
	$\phi_b$	29 - 31°	31°
Mohr	C	0.2 - 0.3 MPa	0.21 MPa
Coulomb	$\phi$	29 - 31°	31°

Poiché era oggettivamente impossibile misurare la resistenza di ciascun piano, è stata utilizzata la medesima resistenza per tutti i piani (tab. 1). La resistenza caratteristica è stata determinata integrando i dati di campagna con quelli di laboratorio di studi precedenti. I dati così ottenuti sono stati utilizzati per descrivere i piani, sia con il metodo dell'equilibrio limite per poliedri, sia con quello agli elementi finiti. Nei modelli è stato utilizzato il criterio di rottura di Mohr Coulomb, derivando i parametri da quello di Barton Bandis.

Le analisi hanno indicato che il fattore di sicurezza dei poliedri rocciosi era compreso tra 1.03 e 12.0. La situazione di minor stabilità ( $F_s = 1.03$ ) è stata individuata nel blocco del Mammellone 1, identificato in grigio scuro nella fig.6.



**Fig. 6:** Modello geometrico 3D della parete del Mammellone 1

**Fig. 6:** 3D LEM model

## Metodo degli elementi finiti

Il comportamento delle arenarie è stato descritto con il criterio di rottura di Hoek & Brown, determinando i parametri a partire dall'indice GSI (Geological Strength Index) e dai parametri di resistenza della roccia ottenuti da prove di laboratorio (tabella 2).

**Tab. 2** – Parametri d'ingresso per l'analisi FEM.

**Tab. 2** – Parametri d'ingresso per l'analisi FEM.

$\sigma_{ci}$	90 MPa
GSI	63
$m_b$	2.23233
s	72E-3
a	0.5023
$\gamma$	23.5 kN/m <sup>3</sup>
$E_m$	15.0 GPa

Per rendere più verosimile il modello, sono stati introdotti alcuni giunti discontinui a franapoggio, osservabili nel settore sinistro del Mammellone 1.

Il fattore di sicurezza relativo alla stabilità globale della parete è compreso tra 1.0 e 1.5, secondo l'estensione dei giunti introdotta nel calcolo. Il fattore di sicurezza, espresso come rapporto tra la tensione ammissibile della roccia e lo stato tensionale attivo

nell'ammasso, indica che la rottura può propagarsi nella parte profonda dell'ammasso roccioso anche in assenza di giunti preesistenti. Questo tipo di rottura era già stato osservato

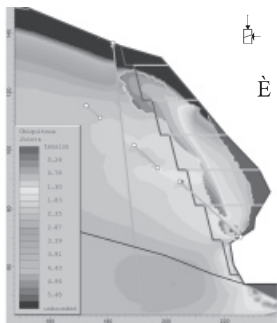


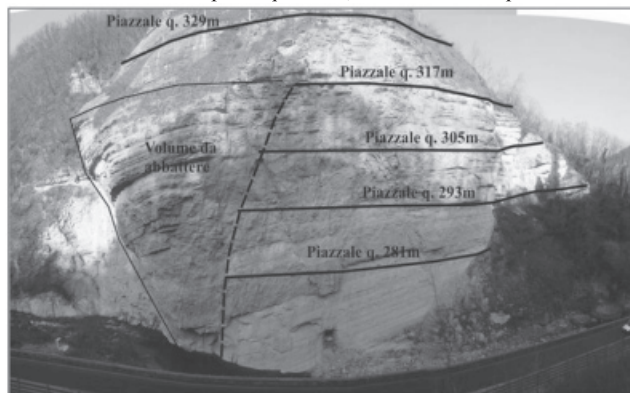
Fig. 7: Modello FEM del Mammellone 1  
Fig. 7: Mammellone 1 FEM model

in un grande crollo avvenuto nell'ottobre del 2002, in prossimità del Mammellone 1 (Gottardi G. et alii., 2004). È interessante notare come le tensioni raggiungano valori critici qualche decina di metri all'interno dell'ammasso, lasciando presagire l'andamento di una possibile linea di rottura. Si osserva inoltre come al piede della parete, soprattutto in corrispondenza dei giunti e dell'incavo dell'aggetto, si riscontrino le più alte concentrazioni di stress. E' quindi probabile che proprio dal piede della parete prenda l'avvio un processo di rottura che vinca la resistenza dei ponti di roccia.

### Progetto di messa in sicurezza

Data la grande dimensione e la morfologia aggettante non era possibile consolidare la massa instabile del Mammellone 1. È stata quindi proposta la riprofilatura dell'intera parete, che comportava la demolizione di circa 50 000 m<sup>3</sup> di roccia. La modellazione FEM della sequenza di scavo ha messo in evidenza come, una volta raggiunto il terzo gradone, vi fosse il concreto pericolo di un collasso dell'aggetto residuo della parete rocciosa (fig. 8). Per prevenire questo pericolo, il piano di abbattimento prevedeva lo scavo a gradoni fino al secondo piazzale, e poi l'abbattimento del grande cuneo a sinistra della gradinata. La riprofilatura sarebbe poi stata completata approfondendo i gradoni orizzontali del settore destro del fronte.

Avendo riconosciuto questo pericolo, ed in attesa di spostare il tracciato stradale sottostante,



sono stati installati estensimetri elettrici nelle principali fratture dell'ammasso roccioso. I sensori erano collegati mediante modem satellitare e gestiti in remoto.

Fig. 8: Progetto di riprofilatura della parete del Mammellone 1

Fig. 8: Mammellone 1 reshaping design

In caso di emergenza, il controllo del traffico veicolare della strada sottostante sarebbe stato garantito da un impianto semaforico di allertamento. Purtroppo, il crollo del 12 marzo 2005 è avvenuto prima che i lavori di completamento dell'impianto di monitoraggio e allertamento fossero conclusi.

### Misure di spostamento

Al momento del crollo il sistema di monitoraggio era in fase sperimentale, sia perché non ne era stata ancora completata l'installazione, sia perché era da poco iniziata la raccolta di dati.

Nei sistemi di monitoraggio, soprattutto se esposti a variazioni climatiche severe, è necessario assumere almeno un ciclo annuale completo di misure, per escludere variazioni correlate a escursioni termiche e cogliere il reale trend di spostamento. Nel presente caso, neppure i modelli FEM già elaborati sono stati d'aiuto per interpretare i dati dei sensori. Infatti, tali modelli non erano sufficientemente raffinati da fornire l'idea degli spostamenti necessari per arrivare alla soglia del collasso. In questa fase sperimentale, gli spostamenti registrati dai sensori (in alcuni casi piccoli e confondibili con l'errore strumentale), sono stati correlati alle variazioni termiche, perchè coerenti con le escursioni stagionali di temperatura rilevate nel periodo luglio 2004 – gennaio 2005. Anche se tra tali deformazioni vi fosse stata una componente profonda, legata ad eventuali movimenti precursori del crollo del marzo 2005, per la sua minima entità non sarebbe stato possibile discriminarla dagli effetti delle variazioni termiche. L'instabilità del Mammellone 1 è stata quindi ritenuta potenziale fino al momento del crollo.

Dopo il crollo del marzo 2005 le misure di spostamento sono state reinterpretate col "senno di poi" (fig. 9), anche se riferite ad un periodo di osservazione molto breve (da fine luglio 2004 a inizio gennaio 2005). A partire da metà agosto 2004 (ossia 7 mesi prima della frana del 12.03.05), il sensore 4 comincia a manifestare in modo incerto un trend di spostamento. Lungo quello che poi sarebbe diventato uno dei piani di rottura principale (sensori 5 e 6), si manifestano deformazioni crescenti verso il basso, con ampiezze massime attorno a 1 mm. Le fratture adiacenti (sensori 8, 9, 10) danno anch'esse spostamenti crescenti verso il basso, ma di ampiezza molto minore.



Fig. 9: Curva tempo - spostamento di 3 estensimetri installati sul Mammellone 1

Fig. 9: Mammellone 1 instruments. Time - displacement data

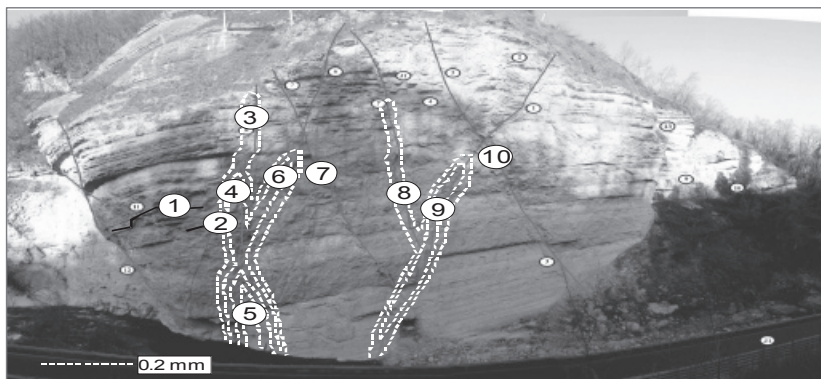


Fig. 10: Parete del Mammellone 1: ubicazione dei sensori

Fig. 10: Mammellone 1: instruments installed on main joints

La distribuzione delle deformazioni riprende abbastanza bene il comportamento previsto con i modelli FEM e LEM. Tuttavia è evidente che l'instabilità raggiunge il piede della parete e interessa un settore ben più ampio del semplice cuneo instabile ipotizzato. In altri termini, le dislocazioni a carico delle superfici di discontinuità analizzate si inseriscono in un più esteso processo di deformazione e rottura progressiva, che coinvolge anche le parti integre dell'ammasso roccioso.

## **INTERVENTI DI RIPRISTINO E CONSOLIDAMENTO**

### **Difficoltà operative**

Gli interventi sono apparsi molto problematici sin dalle prime fasi dell'emergenza, in quanto: (a) i tempi concessi per il ripristino della strada erano ristretti. Era perciò necessario eseguire contemporaneamente gli interventi di bonifica delle frane in destra e in sinistra idrografica, anche se la sistemazione di quella in sinistra (Mammellone 1) risultava prioritaria per eseguire in sicurezza il lavoro nel cantiere sottostante. (b) Gli interventi sui versanti, per quanto possibile, dovevano preservare il contesto paesaggistico. (c) Le opere per il ripristino idraulico del torrente e la ricostruzione del corpo stradale dovevano essere sufficientemente flessibili per compensare le deformazioni indotte dalla grande frana di Scascoli, che domina l'intero versante destro. (d) I costi dovevano essere ragionevolmente contenuti.

### **Interventi sul versante in sinistra idrografica**

La stabilità della parete del Mammellone 1 è stata migliorata con la demolizione di parte dell'ammasso roccioso, secondo una variante opportunamente adeguata del piano già previsto prima del crollo del 12 marzo 2005. A causa della grave instabilità residua della parete rocciosa è stato però necessario monitorare le fasi di scavo più critiche. Ciò ha consentito di mettere in sicurezza i lavori in parete e l'area di cantiere di fondovalle. Per definire le soglie di spostamento critico è stata eseguita un'accurata analisi di stabilità, che si è avvalsa della ricostruzione in back analysis del crollo del 12 marzo 2005 (per i dettagli si rinvia ai capitoli successivi). Poiché anche al termine della profilatura alcune parti dell'ammasso roccioso restavano potenzialmente instabili, per prevenire le conseguenze di un eventuale distacco l'intervento è stato completato con le opere seguenti: (a) un piano basale sul settore sinistro della parete, per arrestare l'eventuale caduta di grandi masse residue non di-sgaggiabili. (b) Una barriera paramassi ad alto assorbimento d'energia tipo OM1000, della Officine Maccaferri. La barriera è stata posta a metà altezza nel settore destro della parete, con lo scopo di proteggere la strada di fondovalle dall'eventuale caduta di blocchi con dimensioni inferiori al metro cubo. (c) Il rivestimento della metà superiore della parete con rete metallica, al fine di controllare la velocità di caduta dei massi ed impedire la proiezione di schegge verso la strada. Allo scopo è stata utilizzata una rete tipo Steelgrid MO.

### **Interventi sul versante in destra idrografica**

L'intervento sulla frana di detrito in destra idrografica ha comportato la rimozione del corpo instabile e il consolidamento della superficie di scivolamento, in corrispondenza della quale affioravano terreni sciolti e ammassi rocciosi degradati (fig. 12). Il consolidamento è stato conseguito mediante la realizzazione di un soil nailing leggero, con barre in acciaio 430 N/mm<sup>2</sup> di lunghezza 3.0÷6.0 m. La densità di questo intervento è di 1 ancoraggio ogni 12 m<sup>2</sup> di superficie. Nei settori in cui affiorava terra, il rivestimento è stato realizzato con rete a doppia torsione 8 x 10 cm, filo 3.0 mm, galvanizzata in Galfan; alla rete è stata associata una biostuoia, con lo scopo di impedire l'erosione per ruscellamento e favorire la ripresa della vegetazione e un reticolo romboidale di funi d'acciaio (fig. 11). Nei settori in cui affiorava roccia degradata ed alterata sono stati applicati pannelli di rete in fune d'acciaio, tipo HEA. L'abbinamento di due diverse tipologie di intervento ha consentito di posare di volta in volta



la rete adeguata al tipo di terreno affiorante, ottimizzando così le risorse economiche a disposizione.



Fig. 11: Consolidamento con soil nailing  
Fig. 11: Soil nailing



Fig. 12: Intervento sulla frana in detrito  
Fig. 12: Consolidation of roto-translational earth slide

### Ripristino idraulico e ripristino del corpo stradale

Poiché il fondovalle è molto stretto, la sistemazione idraulica ed il ripristino stradale sono stati praticamente realizzati con lo stesso intervento (fig. 13). Per ottenere un risultato funzionale dal punto di vista idraulico e stradale, e contemporaneamente compatibile con gli aspetti ambientali, si è deciso di realizzare opere di sostegno a vista, tipo gabbioni e Green Terramesh. Per proteggere le fondazioni dallo scalzamento esercitato dal torrente e garantire la stabilità locale del piede dalla grande frana di Scascoli, tali opere sono state fondate su micropali (vedi sezione tipo in fig. 14).

Le fasi principali dell'intervento sono state le seguenti: (a) sistemazione della frana in detrito in destra idrografica; (b) costruzione del gabbione di monte della strada, fondato su micropali; (c) realizzazione del rilevato stradale, costituito da materiale opportunamente frantumato derivante dai blocchi crollati del Mammellone 1, compattato e rinforzato con reti delle Officine Maccaferri; (d) messa in opera della scogliera antiersiviva nel lato torrente, costituita da blocchi arenacei squadri e saturata con calcestruzzo magro; (e) completamento della porzione superiore del rilevato stradale con Green Terramesh; (f) altri interventi di completamento (posa dei neri e del manto di usura stradale, sagomatura della sezione di progetto dell'alveo, ecc).



Fig. 13: intervento di ripristino stradale  
Fig. 13: reconstructed road embankment



Fig. 14: intervento di ripristino stradale (sezione tipo)  
Fig. 14: road embankment: typical section

Le opere realizzate sono risultate soddisfacenti sia dal punto di vista estetico – funzionale, sia dal punto di vista geotecnico – strutturale. Gli interventi eseguiti ai fini del ripristino della funzionalità stradale ed idraulica sono tuttavia da considerarsi efficaci solamente a livello locale in quanto devono convivere con i movimenti legati alla grande frana di Scascoli (alcuni centimetri all'anno).

## VALIDAZIONE DEI MODELLI

La stabilità del Mammellone 1 è stata esaminata per determinare le condizioni critiche delle fasi provvisionali ed il grado di equilibrio raggiunto a lavoro ultimato. I parametri utilizzati nelle modellazioni numeriche sono stati validati mediante la back analysis del crollo del 12 marzo 2005. Poiché il cinematismo di crollo era molto complesso, sono stati utilizzati sia metodi FEM (codice Phase2), sia metodi DEM (codice UDEC).

I dati d'ingresso dei due procedimenti di calcolo sono concettualmente e operativamente differenti. Per consentire la comparazione dei risultati, i dati d'ingresso sono stati resi omogenei. La taratura dei modelli geomeccanici è avvenuta: (a) tarando le proprietà geomeccaniche, fino ad ottenere una morfologia della nicchia di crollo compatibile con quella osservata in sito, nel caso delle modellazioni FEM; (b) riposizionando le discontinuità principali rilevate in parete dopo il crollo del marzo 2005, nel caso delle modellazioni DEM; (c) tarando le proprietà geomeccaniche, fino ad ottenere spostamenti aderenti a quelli misurati e congruenti tra i due approcci.

### Analisi agli elementi finiti

Il comportamento delle arenarie di Bismantova è stato descritto con il criterio di rottura di Mohr Coulomb in campo plastico, con regola di flusso associata (dilatanza non nulla). L'analisi è iniziata considerando l'ammasso come se fosse omogeneo e privo di giunti; i parametri geotecnici sono stati tarati fino a che le direttrici di rottura indicate dalla concentrazione degli sforzi di taglio massimo sono risultate aderenti a quelle che si sono formate nella realtà. Il fattore di sicurezza è risultato 1.785. Il fattore di sicurezza si abbassa drammaticamente ( $F_s = 1.055$ ) imponendo dei giunti discontinui, analoghi a quelli osservati nella nicchia di distacco. Gli sforzi di taglio massimo sui ponti di roccia determinano la propagazione dei giunti. A causa di ciò aumenta lo stress di taglio sui setti integri e quindi anche la velocità di propagazione dei giunti fino al collasso. Alle discontinuità sono stati attribuiti i parametri di rigidità e resistenza derivati dalle elaborazioni DEM (tabella 3). L'analisi è stata eseguita con una maglia ad elementi triangolari a sei nodi, nell'ipotesi di piccole deformazioni.

**Tab. 3** – Parametri geomeccanici ottenuti con la back analysis FEM.

**Tab. 3** – Geomechanical parameters derived from FEM back analysis

Peso unitario	0.0235 MN/m <sup>3</sup>	Coesione di picco	0.75 MPa
Mod Young	12500 MPa	Angolo di dilatanza	14°
Rapporto di Poisson	0.3	Angolo d'attrito residuo	30°
Resistenza a trazione	0.3 MPa	Coesione residua	0.2 MPa
Angolo d'attrito di picco	54.5°		

Fermo restando che la morfologia aggettante si è sviluppata molto lentamente e quindi non entra come una variabile del sistema, il modello conferma come il collasso sia probabilmente avvenuto a causa del progressivo decadimento delle proprietà meccaniche dell'ammasso e della propagazione dei giunti preesistenti.

Secondo i risultati dell'analisi FEM, il Mammellone 1 ha manifestato condizioni di equilibrio critiche quando gli spostamenti totali hanno raggiunto l'ordine di grandezza di 1.1 cm. L'entità degli spostamenti concorda con quelli determinati negli scenari di rischio calcolati

con procedure DEM. Gli stress maggiori sono concentrati al piede della parete, concordemente ai dati del monitoraggio. Si osserva inoltre che il corpo di frana tende a frazionarsi in corpi secondari di grandi dimensioni, com'è stato effettivamente constatato nel macereto di frana.

### Analisi agli elementi distinti

Il DEM considera l'ammasso come costituito da singoli blocchi, separati da giunti diversamente orientati (ammasso roccioso discontinuo, disomogeneo e anisotropo). Nel modello devono quindi essere introdotte le proprietà sia dei giunti, sia della roccia che costituisce il blocco. L'insieme delle proprietà di resistenza e rigidità dei giunti e della matrice roccia deve essere equivalente a quella dell'ammasso roccioso considerato con proprietà omogenee come le classificazioni RMR, GSI, RMI, Qindex ecc... Ciò significa che più è grande il blocco, più le sue proprietà divengono simili a quelle dell'ammasso giuntato descritto con il metodo FEM; viceversa, quando il blocco è molto piccolo presenta proprietà assimilabili a quelle della matrice roccia. Le proprietà delle discontinuità alla scala d'interesse sono state determinate secondo le procedure riportate nei manuali dei codici di calcolo. I parametri così ottenuti sono stati successivamente affinati fino a portare in condizioni di equilibrio limite l'ammasso. Analogamente all'analisi FEM, il metodo DEM dimostra che il crollo del Mammellone 1 è stato innescato dall'aumento di persistenza di una frattura a tergo, per propagazione di fratture tipo tension crack. Quando la deformazione dell'ammasso ha superato i 2 cm si è verificata l'accelerazione delle deformazioni e quindi il collasso.

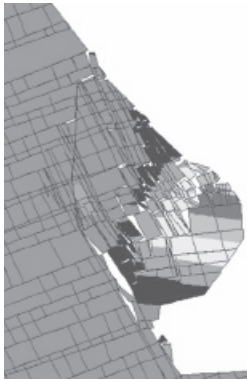


Fig. 16: Modello DEM

Fig. 16: DEM model

Le dislocazioni a taglio lungo le principali superfici di strato e le fratture subverticali raggiungono entità decimetrica, dopo di che comincia il cinematismo di ribaltamento. Si noti che nel DEM l'instabilità della parete aggettante è marcata, mentre nel FEM pur essendoci un'accentuata sollecitazione di taglio non c'è instabilità dell'aggetto. La simulazione evidenzia che i giunti inclinati  $65^\circ$  circa sono il principale indicatore di pericolo da monitorare.

## CONCLUSIONI

Il caso in esame mostra i buoni risultati ottenuti con sistemi flessibili di consolidamento, apparentemente di difficile applicazione in un'area che richiedeva interventi rapidi, buon inserimento nel contesto del paesaggio ed un'accurata pianificazione della sicurezza del cantiere. In merito a quest'ultima necessità, sono stati raggiunti risultati soddisfacenti col supporto delle analisi numeriche, che hanno consentito di prevedere il comportamento delle masse rocciose in immediato pericolo di crollo. Le stesse analisi hanno inoltre messo in luce la complementarietà dei diversi metodi di calcolo, mostrando come per le verifiche di stabilità in situazioni complesse sia preferibile adottare più di una procedura. Il modello 3D LEM ha individuato il volume roccioso più critico, ma non è stato in grado di prevedere la rottura dell'ammasso roccioso fino al piede della parete, ossia fino allo spigolo inferiore del cuneo instabile. Il modello FEM ha abbozzato il comportamento dell'ammasso prima del crollo, e si è dimostrato particolarmente va-lido in back analysis, soprattutto perché ha evidenziato le zone dove potevano propagarsi nuovi giunti. Tuttavia, questo tipo di analisi ha richiesto che

fossero introdotti alcuni master joint per arrivare a rottura. Il modello DEM ha simulato in modo molto soddisfacente il cinematismo, localizzando anche i giunti “spia” utili per monitorare gli spostamenti durante gli scavi. In questo senso, il DEM sembra essere il metodo numerico più efficace per la modellazione dei crolli in roccia, anche se è molto più oneroso del FEM.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l’Agenzia di Protezione Civile della Regione Emilia Romagna, la Provincia di Bologna, il Servizio Tecnico di Bacino Reno per i dati ed il supporto gentilmente forniti.

## BIBLIOGRAFIA

- Benedetti G., Landuzzi A., Gualdrini M., Marchi G., Ferro S., Samori L., Giacchetti G. (2004) – Landslides in the Scascoli gorge (Bologna, Appennines, Italy): from reconnaissance to monitoring (part 2). 32<sup>nd</sup> International Geological Congress
- ENSER S.r.l. (2003, 2004, 2005, 2006) Studio geologico, geotecnico e degli interventi di sicurezza per la strada intercomunale fondovalle Savena – Studio non pubblicato - Provincia di Bologna.
- Ghirotti, M. & Genevois, R. 2007. A complex rock slope failure investigated by means of numerical modelling based on laser scanner technique. In E. Eberhardt et al. (eds) *Rock Mechanics, Meeting Society’s Challenges and Demands*. Taylor & Francis, 2: 917-924.
- Giacchetti G. (2004) Rilievi geomeccanici di dettaglio e analisi di stabilità dello stato di fatto e dell’ammasso riprofilato della zona del Mammellone 1 in località Gole di Scascoli – Strada Intercomunale di Fondo Valle Savena – studio non pubblicato Regione Emilia Romagna.
- Gottardi G., Marchi G., Landuzzi A., Benedetti G. - Sui complessi fenomeni di instabilità presso le Gole di Scascoli Appennino settentrionale, Bologna – 10<sup>o</sup> Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004, Riva/Trento, Italia. 2(V): 25-36.
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002) Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Rocscience Inc. Toronto, 2002
- Hudson J.A., Harrison J.P., (1997) – *Engineering rock Mechanics – An introduction to the Principles* - Pregamon Press, London.
- Hudson J.A., Harrison J.P., (2000) – *Engineering rock Mechanics – Illustrative Worked Examples* - Pregamon Press, London.
- ITASCA Consulting Group (2004) – UDEC 4.00 Universal Distinct Elements Code – Manuals
- Landuzzi A., Benedetti G., Gualdrini M., Marchi G., Ferro S. (2004) – Landslides in the Scascoli gorge (Bologna, Appennines, Italy): from reconnaissance to monitoring (part 1). 32<sup>nd</sup> International Geological Congress.
- Landuzzi A. Bernagozzi G. (1996) - *Geologia e geomorfologia della frana di Scascoli (Appennino settentrionale, Bologna, Italia)*. V Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Cagliari, 1996.
- Rocscience (2005) – Phase2 6.00 - Manuals.