

## Un esempio di deformazione gravitativa profonda: monitoraggio e modellazione

Elena Chiriotti\*

### Sommario

Viene presentato il caso di un versante soggetto ad un fenomeno di deformazione gravitativa profonda nelle Alpi Occidentali, per il quale è disponibile un numero significativo di indagini e misure in sito. Queste sono state utilizzate per definire una serie di modelli numerici consistenti con le osservazioni in sito, volti all'approfondimento dello studio delle condizioni di stabilità.

### 1. Premessa

Nella regione Piemonte sono stati documentati [MORTARA e SORZANA, 1987] duecento casi di deformazioni gravitative profonde originatesi dopo le glaciazioni. La frana di Rosone, situata presso l'omonimo paese, sulle rive del fiume Orco, circa 50 km a Nord - Nord Ovest di Torino, rappresenta uno dei casi suddetti. Ai piedi del pendio, sul versante orientale, è situata una centrale idroelettrica di 100 MWh, gestita dalla AEM, la compagnia che assicura la fornitura di energia elettrica alla città di Torino. Una condotta superficiale si trova lungo lo stesso pendio, sul lato orientale.

Le deformazioni interessano un'area di circa 5.5 km<sup>2</sup>, che presenta un dislivello totale di 1300 m, dal fondovalle fino alla cresta del rilievo dell'Orco-Piantonetto. Il caso in esame è di notevole interesse per la regione alpina. Esso appare estremamente complesso e non ancora ben definito come nel caso di numerose frane avvenute nell'età preistorica. Bisogna riconoscere, infatti, che la previsione del comportamento presente e futuro di tali pendii, benché oggetto di numerosi ed importanti studi geologici, è stata raramente oggetto di esaustive analisi di tipo quantitativo.

Questo caso offre l'opportunità di analizzare tale tipo di fenomeno dato che sono disponibili i risultati del monitoraggio e che possono essere eseguite analisi di stabilità che tengano conto dell'osservazione di numerosi fattori (geologia, geomorfologia, idrogeologia; risultati di analisi in sito e di laborato-

rio; livelli piezometrici correlati alle precipitazioni; ecc.). È anche possibile effettuare prima una ragionevole stima delle attuali condizioni di stabilità del pendio per poi prevedere l'evolversi delle deformazioni, ponendo particolare attenzione ai fattori innescanti che potrebbero comportare fenomeni di instabilità. Questo studio è stato effettuato con il supporto di analisi numeriche applicate a modelli bidimensionali.

Sono state prese in considerazione due particolari zone del pendio, rappresentative di due differenti fasi di deformazione, quella iniziale e quella intermedia: i settori di Perebella e di Bertodasco (Fig. 1). In entrambi i casi non sembrano sussistere condizioni di stabilità e si presume che l'ammasso roccioso subisca essenzialmente due tipi di movimento. Il primo è un meccanismo lento e continuo che coinvolge in profondità l'intero pendio; il secondo, più semplice da osservare e da monitorare, specialmente dopo forti precipitazioni, è veloce e limitato ad aree ben definite, e raggiunge la profondità massima di circa 100 m.

### 2. Il settore di Perebella

Nel settore di Perebella i movimenti residui dovuti ad una antica frana hanno comportato la suddivisione dell'ammasso roccioso in blocchi prismatici a causa di due sistemi di giunti subverticali ed ortogonali, con notevole spaziatura, e di un piano di scistosità con una inclinazione di circa 35° (Fig. 2). Appaiono possibili sia uno scorrimento planare che fenomeni di ribaltamento.

Con l'obiettivo di studiare i modi di instabilità del pendio sono state svolte numerose analisi numeriche. È stata considerata la sezione trasversale avente la massima pendenza e sono stati creati vari modelli discontinui (Fig. 3) usando l'UDEC [CUNDALL, 1980], un codice di calcolo ad elementi distinti.

Si parte da un modello molto semplice, consistente in blocchi rigidi con un solo piano di scistosità, per poi aggiungere maggiori dettagli. Nel modello finale i blocchi sono stati considerati completamente deformabili e sono state introdotte tutte le discontinuità osservate in sito. Questo modello pertanto include un sistema di giunti sub verticali ed il piano di scistosità; la spaziatura è stata scelta sulla base di osservazioni effettuate in sito. Si assume che i blocchi deformabili e le discontinuità della roccia abbiano un comportamento elastico perfettamente plastico, nel rispetto del criterio di Mohr-Coulomb. Le proprietà meccaniche del materiale e delle discontinuità sono state stabilite in base ad uno studio geotecnico, mentre il coefficiente  $K_0$  è stato posto pari a 1.

\* Dottoranda, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Torino.

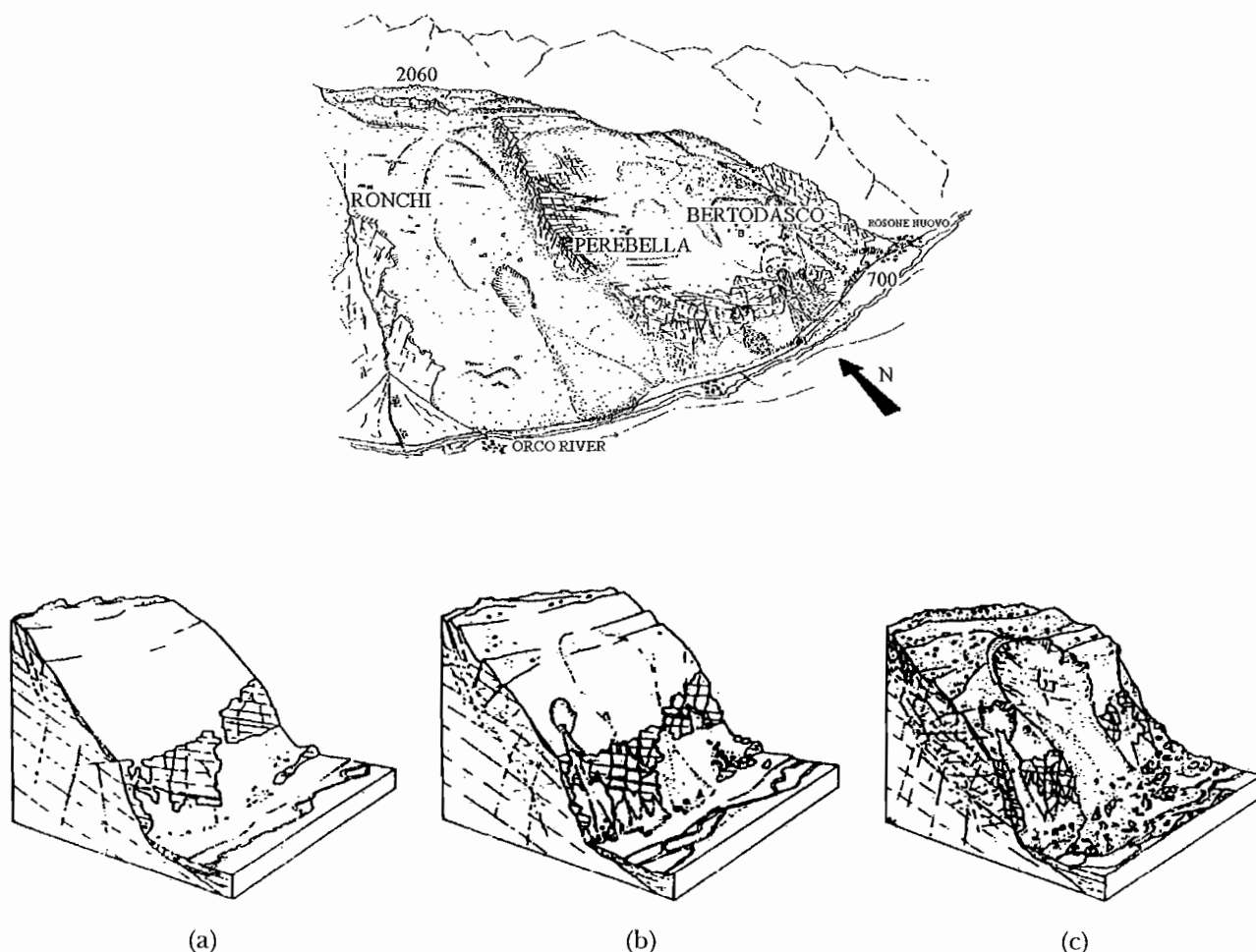


Fig. 1 – Illustrazione schematica del pendio Rosone [FORLATI *et al.*, 1993]. Le tre immagini mostrano le differenti fasi di evoluzione che corrispondono rispettivamente ai settori di Ronchi, di Bertodasco e di Perebella.

Fig. 1 – Schematic picture illustrating the Rosone slope [FORLATI *et al.*, 1993]. The three sketches show the different evolution stages corresponding respectively to Ronchi, Bertodasco and Perebella sectors.

In tale modello la genesi morfologica della valle e lo stato tensionale iniziale sono stati simulati applicando il peso proprio e rimuovendo successivamente gli strati di ghiaccio e di roccia che si trovavano al di sopra dell'attuale pendio, in modo tale da riprodurre il processo di scarico tensionale avvenuto durante il disgelo.

È interessante notare che con il processo di scarico che ha luogo in concomitanza del disgelo, la cresta del pendio giunge a rottura e viene mobilitata la resistenza a trazione in prossimità della superficie libera del pendio e lungo i giunti sub verticali. Tali fenomeni sono molto bene interpretati dal modello utilizzato. In tutti i casi il pendio rimane stabile, come viene testimoniato dal valore delle forze sbilanciate agenti sul sistema al termine dei calcoli.

Al fine di analizzare i possibili meccanismi di instabilità, è stata introdotta nel modello una progressiva riduzione della resistenza al taglio lungo i piani di scistosità facendo diminuire gradualmente il va-

lore dell'angolo di attrito fino a  $30^\circ$ . In tal caso lo scorrimento avviene al piede del pendio, mentre un meccanismo di ribaltamento ha inizio nella sezione intermedia, per poi svilupparsi verso la parte sovrastante. Le colonne di roccia ruotano intorno alla base, così come mostrato dalla distribuzione degli spostamenti (Fig. 4).

Nel modello è stata anche introdotta la presenza di "cleft pressures" nei giunti, in conseguenza delle precipitazioni, in seguito all'osservazione che gli spostamenti misurati in determinati punti, per mezzo di inclinometri o livellazioni ottiche nel vicino settore di Bertodasco, sembrano essere correlati alle altezze di pioggia mensili (Fig. 5). Visto che i blocchi di roccia sono impermeabili, il flusso dell'acqua avviene essenzialmente attraverso i giunti sub verticali che sono aperti e molto permeabili.

Le analisi numeriche sono state eseguite considerando, all'interno delle discontinuità, differenti livelli di acqua a seconda delle precipitazioni. Par-

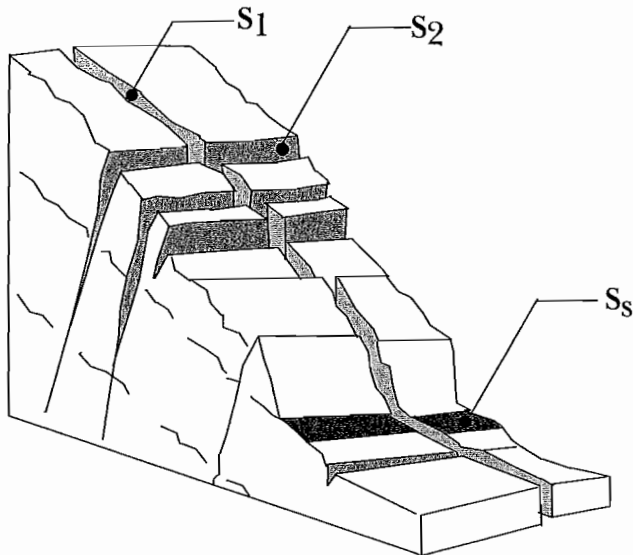


Fig. 2 - Il settore di Perebella. Nel blocco che schematizza il pendio sono mostrati i giunti S1 ed S2 insieme al piano di scistosità SS. Tali discontinuità sono anche disegnate su the stereographic plot.

Fig. 2 - *Perebella sector. In the block diagram of the slope the S1 and S2 joint sets are shown with the schistosity plane SS. These discontinuities are also plotted on the stereographic plot.*

tendo da una condizione di completa saturazione, il livello di acqua nei giunti sub verticali è stato ridotto gradualmente fino ad una profondità di 200 m dal piano campagna. Durante i calcoli è stata posta una particolare attenzione agli spostamenti sia orizzontali che verticali di alcuni particolari punti, situati al piede e nella parte centrale del pendio. Disegnando i loro spostamenti  $\delta$ , rapportati ai corrispondenti spostamenti in condizioni sature, in funzione del livello piezometrico, il pendio risulta stabile fin quando il livello piezometrico è ubicato ad una profondità maggiore di 175 m dal p.c.; ciò sta a significare che i volumi di roccia situati al di sopra del piano di scistosità che affiora alla base della vallata non sono influenzati dalla presenza dell'acqua. All'aumentare del livello piezometrico oltre i 100 m, il pendio diventa instabile ed evolve rapidamente a rottura se non c'è drenaggio.

Interessanti risultati possono essere ottenuti portando in conto gli effetti del drenaggio e simulando una sequenza di forti piogge. I movimenti dei blocchi, dell'ordine di qualche centimetro, causati dal flusso dell'acqua attraverso le discontinuità, sono rapidamente smorzati e viene raggiunta una condizione di stabilità temporanea, come mostrato dalle forze sbilanciate agenti sul sistema, fino a che non ha luogo una nuova precipitazione.

Con riferimento ai meccanismi di instabilità, si è notato che quando il livello dell'acqua si abbassa, il potenziale ribaltamento evolve gradualmente verso lo scorrimento rotazionale, con un significativo

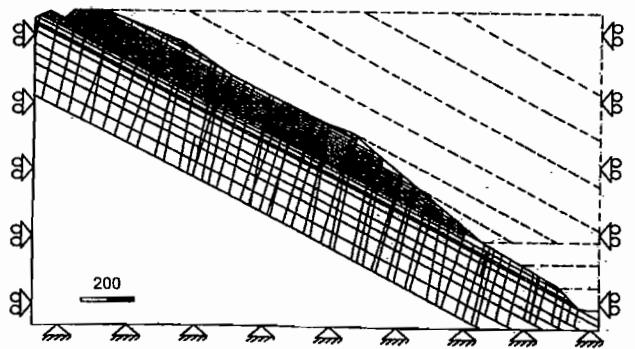
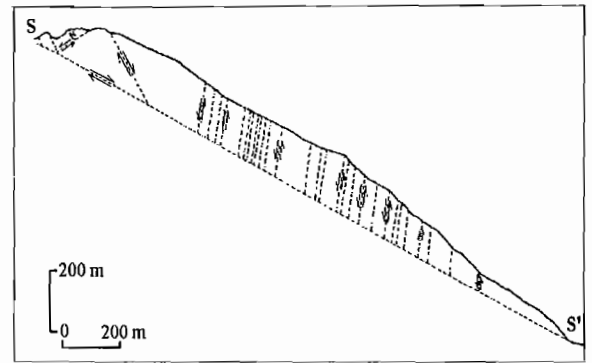


Fig. 3 - Il settore di Perebella. Modelli utilizzati per la simulazione in UDEC: semplice geometria con blocchi rigidi; semplice geometria con blocchi completamente deformabili; geometria finale con blocchi completamente deformabili.

Fig. 3 - *Perebella sector. UDEC models used for the simulations: simple geometry with rigid blocks; simple geometry with fully deformable blocks; final geometry with fully deformable blocks.*

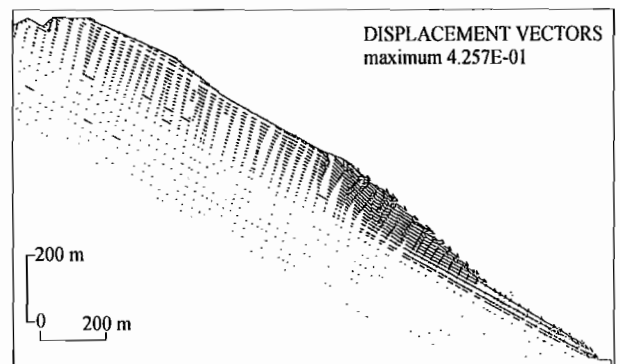


Fig. 4 - Il settore di Perebella. Vettori di spostamento nel modello in UDEC quando l'angolo di attrito lungo il piano di scistosità è posto pari a  $30^\circ$ .

Fig. 4 - *Perebella sector. Displacement vectors in the UDEC model when the friction angle along the plane of schistosity is taken down to  $30^\circ$ .*

abbassamento della cresta del pendio ed un sollevamento del piede (Fig. 6). Si può, dunque, concludere che la presenza di acqua nei giunti è l'unico fattore in grado di influenzare la stabilità del pendio nel settore di Perebella.

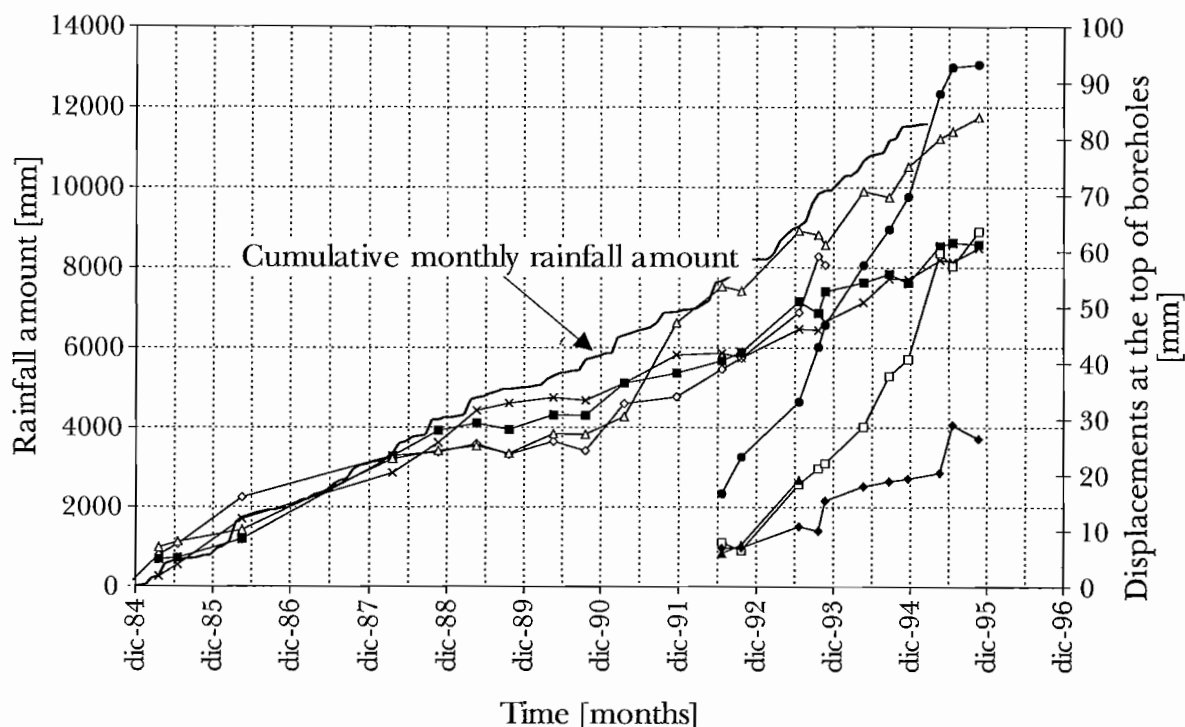


Fig. 5 – Altezze di piogge mensili e letture inclinometriche in testa alle perforazioni.  
 Fig. 5 – Cumulative monthly rainfall amount and inclinometer readings at the top of boreholes.

### 3. Il settore di Bertodasco

In questo settore l'ammasso roccioso è caratterizzato da un lento e continuo movimento, che è accompagnato da instabilità locali come scorrimenti, ribaltamenti, rotazioni e caduta di massi di diverse dimensioni, che comportano valanghe di roccia. Il verificarsi di numerosi fenomeni di instabilità, documentati a partire dal 1940, hanno comportato l'abbandono, nel 1953, dei paesi di Bertodasco e Rosone Vecchio.

Il settore di Bertodasco è stato tenuto sotto osservazione per un certo numero di anni valutando sia gli spostamenti superficiali (attraverso livellazioni ottiche) sia gli spostamenti in profondità (attraverso inclinometri). Sono state eseguite anche letture piezometriche. Sulla scorta degli spostamenti superficiali misurati dal 1953 ad oggi, si può notare che la velocità del movimento che ha interessato il pendio negli ultimi 15 anni oscilla tra 2.5 cm/anno e 1.0 cm/anno. Benché gli spostamenti superficiali siano desunti dal monitoraggio del comportamento dei blocchi di ancoraggio lungo la condotta forzata, si può concludere che l'intero pendio subisce deformazioni di creep che, attualmente, sembrano aver attinto una condizione stazionaria. Questa ipotesi è confermata dai risultati delle letture inclinometriche eseguite negli ultimi 5 anni nei sondaggi eseguiti lungo il pendio (Fig. 7). Un lento scorrimento avviene lungo una superficie che si trova tra una pro-

fondità massima di 60÷70 m (sondaggi A3, S103) ed una minima di 24÷40 m (sondaggi S104, A1). Questa superficie di scorrimento profonda rappresenta una linea di demarcazione tra roccia sconnessa e fratturata e roccia intatta; essa rappresenta una zona di debolezza nell'ammasso roccioso.

Anche per il settore di Bertodasco sono state eseguite analisi numeriche. È stata scelta come riferimento una sezione verticale che si estende dalla cima del pendio fino alla valle del fiume Orco. Basandosi sulle informazioni derivate dai sondaggi e sul monitoraggio degli spostamenti, sono state identificate due interfacce all'interno del pendio che delimitano zone con proprietà meccaniche differenti (Fig. 8).

Sono stati messi a punto numerosi modelli con l'ausilio del codice di calcolo FLAC. Questo codice di calcolo ben si adatta allo studio di problemi di grosse deformazioni, di instabilità e di analisi non lineare. La genesi morfologica della vallata è stata simulata attraverso fasi successive. Come per il settore di Perbella, gli strati di roccia e ghiaccio situati al di sopra dell'attuale profilo del pendio sono stati gradualmente rimossi per simulare il processo di scarico avuto luogo durante il disgelo. Il valore di  $K_0$  è stato posto uguale ad 1. Si assume che l'ammasso roccioso abbia un comportamento elastico perfettamente plastico, con criterio di resistenza Mohr-Coulomb.

L'analisi di stabilità del pendio eseguita con il metodo dell'equilibrio limite e assumendo un coefficiente di sicurezza pari ad 1 per le attuali condizio-

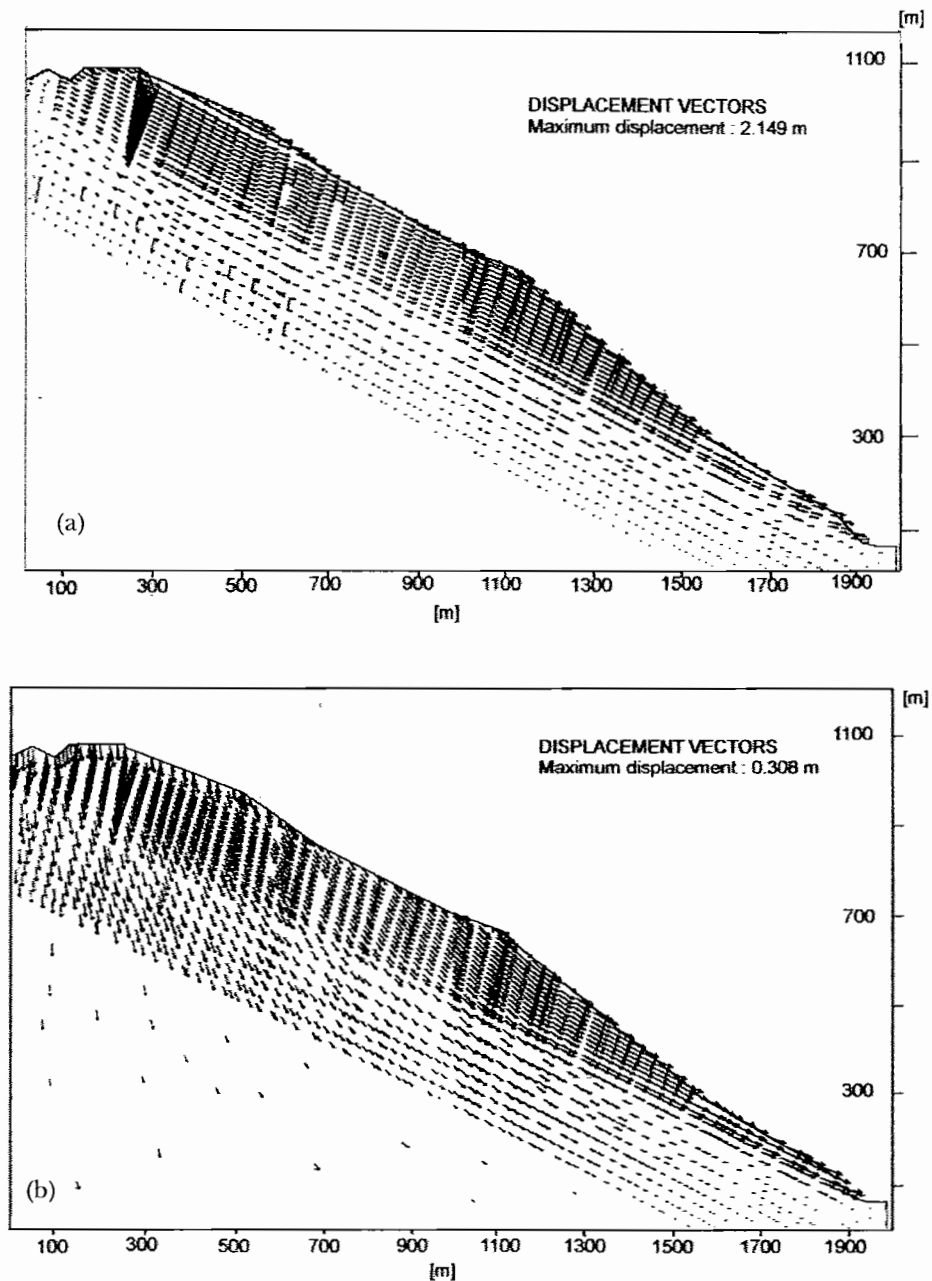


Fig. 6 – Il settore di Perebella. Vettori di spostamento computati per un livello di falda posto rispettivamente a 50 e 150 m al di sotto del piano campagna.

Fig. 6 – Perebella sector. Down-slope displacements and horizontal displacement contour plots computed for the piezometric level equal respectively to 50 and 150 m below the free surface.

ni (il livello della falda è stato determinato dalle letture piezometriche), ha fornito un angolo di attrito  $\Phi'$  pari a  $33 \pm 1.1^\circ$  (si assume che la coesione  $c'$  vari tra 0 e 30 kPa) per l'interfaccia tra il terreno stabile e lo strato intermedio. Col FLAC, adoperato utilizzando lesse caratteristiche di resistenza al taglio, si dimostra comunque che il pendio non è stabile poiché si sviluppa un meccanismo di rottura nella parte che si trova immediatamente al di sopra del piede (Fig. 9). Di conseguenza sono state eseguite ulteriori analisi numeriche per definire le attuali condizioni (come mostrato dai diagrammi delle *time*

*history* di punti critici del pendio) che si suppone siano prossime all'equilibrio limite. I risultati di tali analisi mostrano che vi è una notevole concentrazione di tensioni al piede del versante, in cui la resistenza mobilitata non è molto lontana dalle condizioni limite.

Sono state, dunque, eseguite analisi dettagliate per individuare il possibile comportamento del pendio nelle condizioni di rottura. Viene dimostrato che con l'erosione della valle dell'Orco, in concomitanza di un improvviso innalzamento del livello dell'acqua nel pendio, la condizione di stabilità

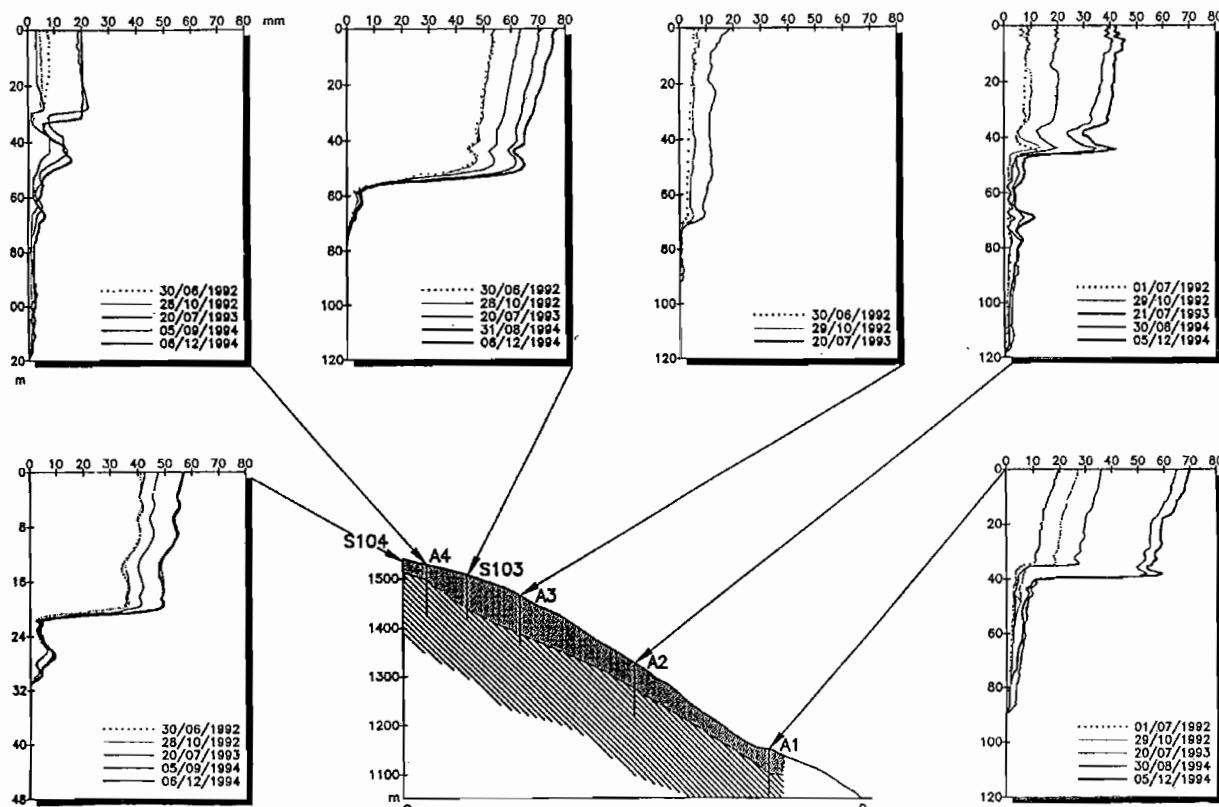


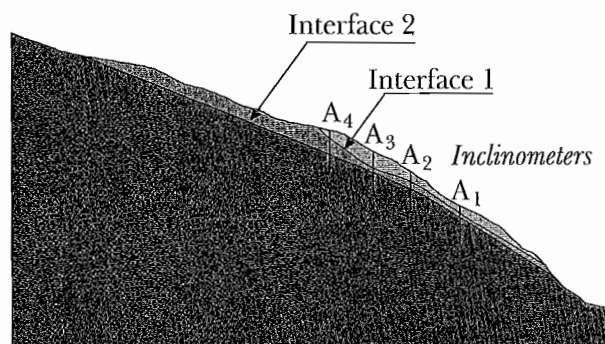
Fig. 7 – Il settore di Bertodasco. Spostamenti misurati negli inclinometri installati lungo il pendio.

Fig. 7 – Bertodasco sector. Down-slope displacements measured in the inclinometer holes installed along the slope.

complessiva potrebbe essere compromessa ed un fenomeno di rottura progressiva dal piede verso l'alto (Fig. 10). In tali condizioni si registrano grossi spostamenti a quote superiori ai 950 m. Si può dunque concludere che la stabilità del pendio nelle condizioni attuali è assicurata dalla resistenza al piede e può essere compromessa da un significativo incremento del livello delle pressioni neutre.

#### 4. Osservazioni conclusive e sviluppi futuri

I problemi di stabilità che caratterizzano la frana di Rosone sono stati studiati in riferimento a due particolari settori del pendio ed utilizzando tecniche di analisi numerica. Tali tecniche possono facilitare la comprensione del comportamento dei pendii, soprattutto se associate ad un'intensa opera di monitoraggio. Sono così stati evidenziati numerosi fattori che potrebbero compromettere le condizioni di stabilità in entrambi i settori. Nel primo caso, la struttura geologica caratterizzata da un piano di scistosità che si immerge verso valle e la variazione delle pressioni neutre sono fattori capaci di mettere in crisi le condizioni di stabilità. Nel secondo caso, invece, la stabilità del pendio è fortemente influenzata dalle condizioni di sollecitazione al piede e dal regime delle pressioni neutre.



#### Legend

Unit 1    Unit 2    Unit 3

Fig. 8 – Il settore di Bertodasco. Sezione trasversale del pendio che mostra la localizzazione delle possibili superfici di scorrimento (1) e le zone aventi differenti proprietà meccaniche.

Fig. 8 – Bertodasco sector. Cross section through the slope showing location of potential sliding surface (1) and zones having different mechanical properties.

Gli sviluppi futuri prevedono la messa a punto di un modello in grado di cogliere la dipendenza dal tempo del comportamento del pendio, già stata messa in evidenza dalle analisi in sito. Tale obiettivo può essere raggiunto mediante analisi numeriche mediante un modello elastico-viscoplastico.

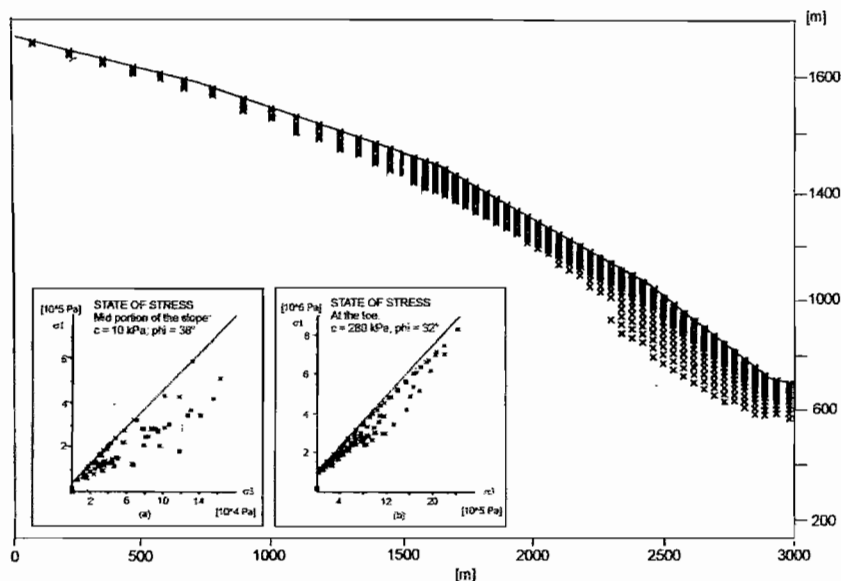


Fig. 9 – Il settore di Bertodasco. Zone di rottura nel pendio per un set di parametri che forniscono condizioni di equilibrio limite. Il livello della falda viene desunto dalle letture piezometriche. Le figure in basso mostrano lo stato tensionale al piede e nella parte centrale del pendio. Nella figura in alto viene anche mostrata la storia della forza sbilanciata.

Fig. 9 – Bertodasco sector. Failure zones in the slope for a set of parameters giving limit equilibrium conditions. The groundwater level is assumed as in the piezometric holes. The low margin sketches show the stress level at the toe and in the mid portion of the slope. In the upper margin sketch it is also shown the unbalanced force time history plot.

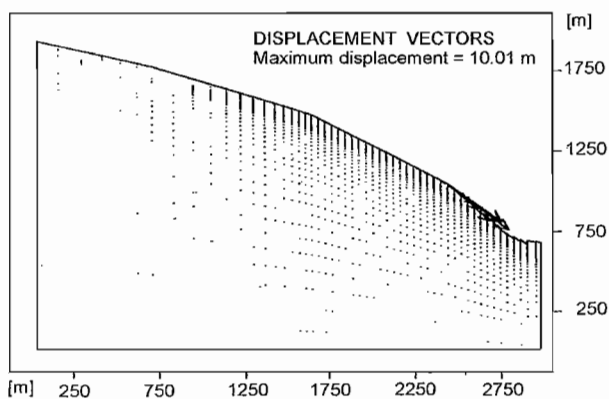


Fig. 10 – Il settore di Bertodasco. Superfici di scorrimento (in alto) e vettori di spostamento (in basso) nel pendio per la simulazione del fenomeno di erosione nella valle dell'Orco, che ha luogo in concomitanza di un innalzamento improvviso del livello dell'acqua. I parametri di resistenza assunti nella modellazione in FLAC dimostrano una attuale condizione di stabilità.

Fig. 10 – Bertodasco sector. Mobilized level contour lines (above) and displacement vectors (below) in the slope when simulating the erosion of the Orco Valley, occurring with a sudden increase in water level. The strength parameters assumed in the FLAC model bring the slope to stability in the present conditions.

## Bibliografia

- BARLA G., CHIRIOTTI E. (1995) – *Insights into the behaviour of the large deep-seated gravitational slope deformation of Rosone, in the Piemonte region (Italy)*. Proc. of the 44.th Geomechanics Colloquy, Salzburg, pp. 425-432.

CUNDALL P.A. (1971) – *A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movements in Blocky Rock Systems*. Proceedings of ISRM Symposium, Nancy, paper II-8.

MORTARA G., SORZANA P.F. (1987) – *Fenomeni di deformazione gravitativa profonda nell'arco alpino occidentale italiano. Considerazioni lito-strutturali e morfologiche*. Boll. Soc. Geol. It., n.106, pp. 303-314 (in italiano).

FORLATI F., RAMASCO M., SUSELLA G., BARLA G., MARINO P., MORTARA G. (1993) – *La deformazione gravitativa profonda di Rosone – Un approccio conoscitivo per la definizione di una metodologia di studio*. Studi Tentini di Scienze Naturali. Acta Geologica, vol. LXVIII, 1, pp. 71-108 (in italiano).

## A case of deep-seated gravitational slope deformation: monitoring and modelling

### Summary

The case history of a slope located in the West Alps, which undergoes a deep-seated gravitational deformation, is presented. A representative number of surveys and in situ measurements is available. Results of surveys and monitoring were used to develop a number of numerical models, which are consistent with all the observed facts, in order to better understand the stability conditions.