

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

XXIII CONVEGNO NAZIONALE  
DI GEOTECNICA

Abano Terme 16-18 maggio 2007

PREVISIONE E CONTROLLO  
DEL COMPORTAMENTO  
DELLE OPERE

*Estratto*

PATRON EDITORE  
BOLOGNA

# ANALISI RETROSPETTIVA DEGLI INTERVENTI SULLA GRANDE FRANA DI VALDERCHIA, GUBBIO (PG).

Di Francesco R., Siena M.

GEO&GEO Instruments® – research & development, Teramo (TE)

Ferrari M., Martini E., Fabrizi O.

Servizio di Difesa del Suolo e Servizio Geologico della Regione Umbria, Perugia (PG)

## SOMMARIO

A seguito di una eccezionale nevicata seguita da un repentino totale scioglimento nel gennaio del 1997 si verificò la riattivazione di una frana antica in località Valderchia, presso Gubbio (PG). Essa causò numerosi danni ad abitazioni, elettrodotti e provocò anche la formazione di un lago di sbarramento per l'ostruzione del sottostante Torrente San Donato. I lavori di consolidamento eseguiti successivamente furono mirati all'abbattimento del livello piezometrico mediante pozzi drenanti strutturali. Il monitoraggio piezometrico ed inclinometrico, eseguito fino al 2004, denotò una complessa idrodinamica della falda ed anche un possibile coinvolgimento del limitrofo fronte di scavo di una miniera a cielo aperto oramai in disuso. L'analisi retrospettiva ha invece messo in evidenza come alcuni elementi derivanti proprio dal monitoraggio inclinometrico siano contrastanti con l'ultima ipotesi di lavoro. Inoltre la costruzione di modelli ad elementi finiti convergenti con i dati a disposizione ha confermato tali assunzioni ed ha evidenziato come non esista alcun nesso tra la frana ed il fronte di scavo e come la prima non abbia ancora raggiunto le condizioni di equilibrio.

Parole chiave: frana, monitoraggio, inclinometri, analisi retrospettiva

## 1 INTRODUZIONE

All'alba del 6 gennaio 1997, a seguito di una abbondante nevicata seguita da un repentino totale scioglimento si verificò la riattivazione di una frana antica ubicata nella Valderchia, presso Gubbio (PG). La stessa, con una lunghezza di circa 450 m ed una estensione di quasi 18 Ha, distrusse due abitazioni, ostruì il Torrente San Donato creando un lago di sbarramento, coinvolse numerosi pali di sostegno delle linee elettriche e telefoniche e si arrestò contro un rilevato della ex sede della SS 452 della Contessa.

Ai primi tecnici della Protezione Civile che accorsero apparve subito ovvia la funzione di protezione svolta dal rilevato stradale il quale, protetto da muri d'ambito in cemento armato, era riuscito ad evitare che l'evento, una frana roto-traslazionale evolutasi in colamento, coinvolgesse la nuova sede della strada statale ed ulteriori abitazioni.

Le perforazioni di sondaggio eseguite e strumentate con piezometri ed inclinometri, unitamente a prospezioni sismiche, evidenziarono una struttura caotica di spessore variabile da circa 15 m a circa 25 m e presenza di falde idriche sovrapposte, talora in pressione, i cui livelli piezometrici erano prossimi al piano di campagna.



Figura 1. Ubicazione della Valderchia nel comune di Gubbio.

Furono quindi eseguiti interventi in somma urgenza per la creazione di un by-pass al Torrente San Donato e lo svuotamento del lago di sbarramento, mentre la simulazione di varie condizioni di drenaggio evidenziò la necessità di impostare gli interventi sulla regimazione delle acque superficiali, rimodellamento del pendio, dreni suborizzontali e pozzi drenanti strutturali di grande diametro. Le analisi di stabilità furono eseguite utilizzando metodi basati sull'ipotesi di leggi rigido-plastiche quali Bishop e Jambu, partendo da studi parametrici in back-analysis e simulando successivamente le condizioni di drenaggio derivanti da diverse condizioni di depressione della falda. I risultati furono incoraggianti,

con fattori di sicurezza superiori ai valori minimi normativi ( $> 1,3$  – Regione Umbria, 1998).

Il monitoraggio, iniziato nella fase pre-progettuale ed eseguito fino al 2004, ha evidenziato una situazione complessa, con il piede della frana quasi stabile e le porzioni medio-alte dotate di un campo di spostamenti tale da tranciare gli inclinometri. Inoltre la posizione di due inclinometri definibili strategici (I-6 e I-10) ha indicato il possibile coinvolgimento nell'evento franoso del limitrofo fronte di scavo di una miniera a cielo aperto oramai in disuso influenzando la costruzione delle sezioni geologiche. E tale ipotesi di lavoro ha guidato il monitoraggio stesso per un successivo eventuale intervento di consolidamento. Nel contempo le letture piezometriche hanno denotato un abbassamento stabile ma oscillante della falda alla base della frana ed un livello prossimo al piano di campagna nelle restanti porzioni.

Con la presente memoria viene eseguita un'analisi retrospettiva degli studi precedentemente condotti e degli interventi eseguiti, impostando una metodologia che ha comportato la revisione dei dati provenienti dal monitoraggio, degli iniziali studi geomorfologici propedeutici al progetto e il riesame della situazione geomorfologia locale a seguito degli interventi effettuati.

È stata cercata poi una possibile convergenza tra il modello geomorfologico dell'area e quello geotecnico appositamente costruito; sono stati quindi impostati modelli numerici ad elementi finiti basati sui dati noti, convergenti con gli elementi scaturiti da un attento riesame del monitoraggio e dei rilievi, lasciati successivamente evolvere in maniera predittiva.

Tali analisi hanno di fatto fornito elementi essenziali nella comprensione del fenomeno e della sua possibile evoluzione, in funzione di un regime idraulico complesso strettamente dipendente dalla eterogeneità del corpo di frana e che denota l'esistenza di condizioni dettate da linee preferenziali di drenaggio nonché da falde in pressione confinate nel sottostante substrato roccioso. Infine è emersa la totale divergenza tra i fenomeni osservati, dal momento che il fronte di scavo risulta possedere un meccanismo di deformazione dipendente esclusivamente dalla meccanica del substrato roccioso nel quale risulta essere impostato.

## 2 GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA ED INDAGINI GEOGNOSTICHE

### 2.1 Studi precedenti

L'analisi degli studi eseguiti nel biennio '97-'98 ha evidenziato come la frana di Valderchia interessi un tratto di versante ubicato in sinistra idrografica del Torrente San Donato, il quale risulta in fase di notevole incisione tale da mettere a nudo il nucleo calcareo della struttura anticlinale di Gubbio. Le formazioni geologiche riscontrate appartengono ai litotipi calcarei, marnosi e silicoclastici della serie Umbro-Marchigiana, il cui assetto strutturale è tale da aver influenzato le condizioni di sviluppo ed evoluzione della frana di Valderchia.

In effetti dalla lettura delle carte tematiche è risultato evidente come il fenomeno in questione abbia avuto

origine su un pendio che morfologicamente è il risultato di un'azione erosiva selettiva, dipendente dalla diversa reologia delle formazioni presenti, e che la frana è sostanzialmente composta da due eventi concomitanti (figura 2, puntinato chiaro), come denotato dalla loro parziale sovrapposizione (Cencetti et al., 1998). Inoltre, da un riscontro di carattere storico, risulta che tale frana è posteriore al 1792 (Regione Umbria, 1998), mentre eventuali dissesti latenti potrebbero essere presenti sul medesimo versante (figura 2, puntinato scuro).

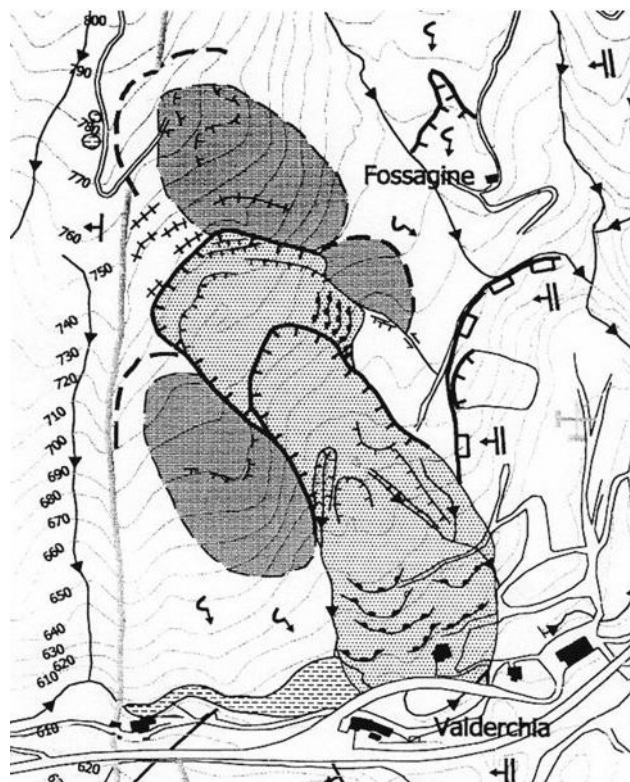


Figura 2. Carta geomorfologica della frana di Valderchia (da Cencetti et. ali, 1998).

La zona di alimentazione della frana coincide con i litotipi marnosi, mentre i settori limitrofi sono caratterizzati dalla presenza di litotipi calcarei ed arenacei considerabili indeformabili alla scala delle osservazioni.

Dall'esecuzione della campagna di indagini, costituita da sondaggi strumentati con inclinometri e piezometri e da prospezioni sismiche, è emersa una frana rotazionale a superfici multiple di spessore variabile da 15 a 25 metri; inoltre è risultato anche un interessamento dell'adiacente fronte di scavo di una miniera a cielo aperto in disuso.

### 2.2 Analisi retrospettiva

L'esecuzione di nuovi studi di carattere geomorfologico, unitamente ad un riesame dell'intera documentazione, ha evidenziato una configurazione evolutiva del versante in parziale contrasto con le informazioni precedenti. Il problema fondamentale deriva dalla constatazione che potrebbero essere stati trascurati alcuni elementi di fondamentale importanza nell'analisi

del dissesto. Utilizzando come riferimento la figura 3, occorre innanzitutto evidenziare la presenza di una vasta depressione, non considerata negli studi precedenti, ubicata a monte del corpo di frana, quest'ultima riperimetrata con linea curva continua. L'ipotesi è che la depressione possa appartenere alla frana di Valderchia, in funzione del concetto della conservazione della massa per il quale la quantità di geomateriale uscita dalla zona di testata deve essere bilanciata dalla quantità in ingresso presso il piede della stessa.

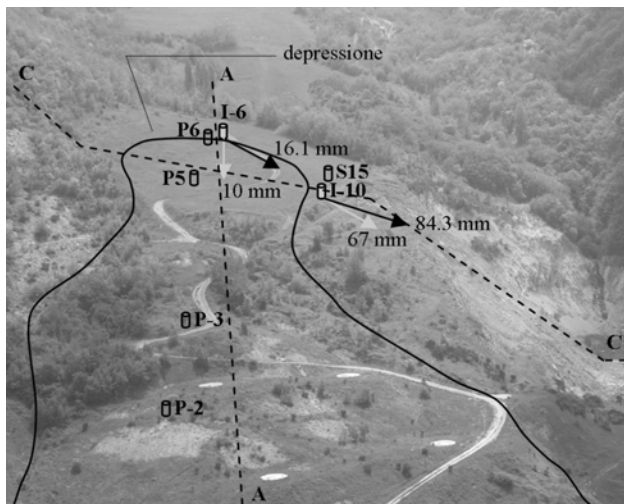


Figura 3. Nuova perimetrazione del corpo di frana e reinterpretazione delle letture inclinometriche; vettori fuori scala.

La frana, per la geometria e le condizioni di innesco ed evoluzione, appare essere di tipo complesso, ovvero una roto-traslazionale evolutasi in colamento. Inoltre sembra evidente, anche alla luce del riesame del monitoraggio inclinometrico, come non esista alcun nesso tra la il corpo di frana ed il fronte di scavo della limitrofa miniera a cielo aperto. In questo ultimo caso si assiste invece a fenomeni tipicamente rotazionali che interessano la coltre detritica e la porzione alterata del substrato ubicati presso la testata dell'area di scavo, evidenziando una connessione con fenomeni di weathering dei geomateriali e di decompressione del versante tendenti al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio.

### 3 MODELLO GEOTECNICO RETROSPETTIVO

#### 3.1 Monitoraggio inclinometrico

Le informazioni scaturite dai rilievi geomorfologici e dal monitoraggio inclinometrico, iniziato nel 1998 e protratto fino al 2004, hanno influenzato la costruzione delle sezioni geologiche di riferimento per gli interventi di consolidamento, con particolare riferimento alla sezione C-C (figura 4A). Il problema in effetti è tutto incentrato negli inclinometri I-6 e I-10 i quali hanno palesato rispettivamente spostamenti di 16.1 e 84.3 mm con direzione all'incirca ortogonale al fronte di scavo della ex-miniera (figura 3).

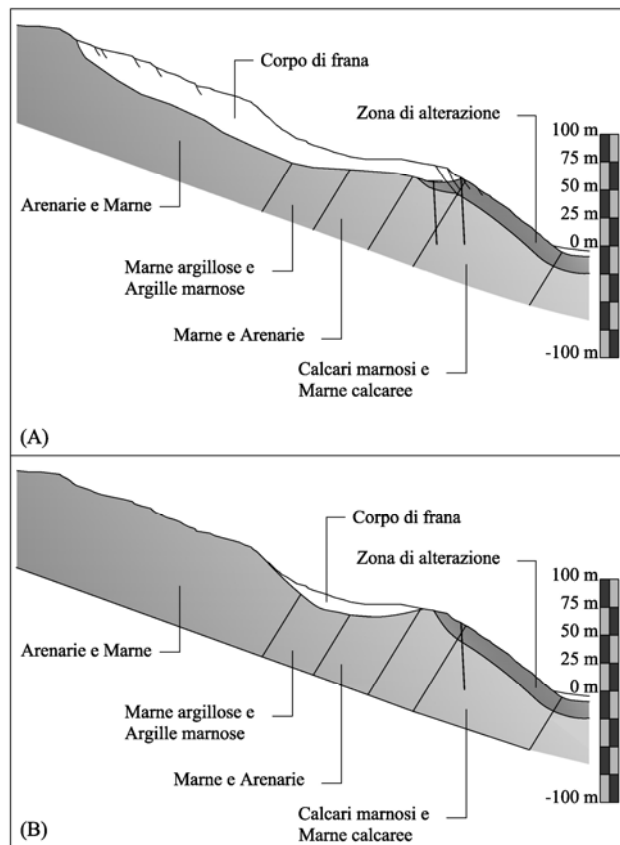


Figura 4. Sezione C-C: (A) di progetto (Regione Umbria, 1988 modificata); (B) interpretata.

Difatti, le analisi hanno consentito di individuare alcuni problemi interpretativi sui risultati inclinometrici relativi sia ai valori di spostamento che all'orientamento dei vettori risultanti. Sostanzialmente il tutto è riconducibile ad una evidente spirallatura dei tubi inclinometrici, la cui correzione ha richiesto l'utilizzo di una procedura che prende spunto dalla rotazione di sistemi di riferimento cartesiani (figura 5).

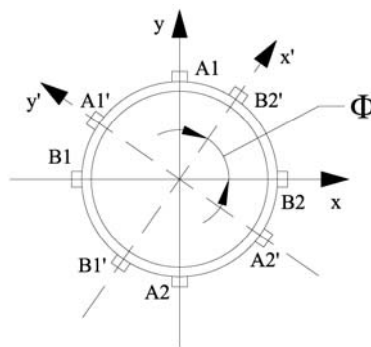


Figura 5. Schema di recupero della spirallatura degli inclinometri.

La spirallatura di un inclinometro produce in effetti una rotazione  $\Phi_j$  per il livello  $j$ -esimo di misura, con relativa influenza nella determinazione del vettore risultante quale somma dei singoli vettori degli spostamenti locali. Per il recupero dei dati è stata quindi imposta la condizione che:

$$\{v_{jR}\} = \{v_{jA1A2}\} + \{v_{jB1B2}\} \quad (1)$$

nella quale  $\{v_{jR}\}$  rappresenta il vettore risultante j-esimo di spostamento locale relativo alle guide A1-A2 e B1-B2. Applicando una matrice  $T$  di trasformazione in  $\mathbb{R}^3$  si ha:

$$T\{v_{jR}\} = \{v'_{jR}\} \quad (2)$$

$$\{v'_{jR}\} = \begin{vmatrix} \cos\Phi & -\sin\Phi & 0 \\ \sin\Phi & \cos\Phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x'_j \\ y'_j \\ z'_j \end{vmatrix} \quad (3)$$

dove  $\{v'_{jR}\}$  è il vettore j-esimo di spostamento locale corretto. Tali vettori locali sono stati infine sommati per la ricostruzione del vettore spostamento risultante:

$$\vec{V} = \sum_{j=1}^n v'_{jR} \quad (4)$$

Il problema più importante è consistito nella determinazione del valore dell'angolo di rotazione del sistema di riferimento, che è risultato compreso nella forbice  $34.1^\circ \div 47.1^\circ$  per l'inclinometro I-6 e pari a circa  $154^\circ$  per l'I-10, considerato che in quest'ultimo caso la spirallatura ha interessato la porzione inferiore dell'inclinometro, complicando ulteriormente il processo di recupero dati.

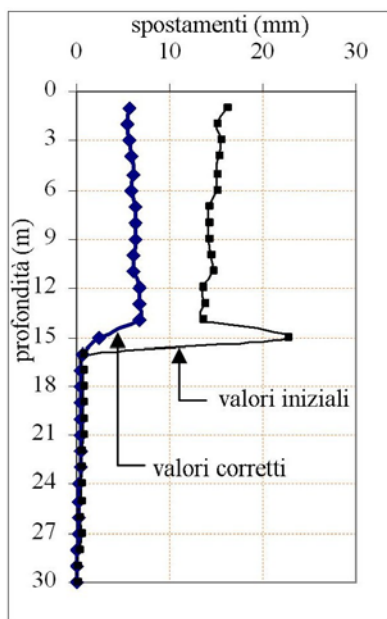


Figura 6. Sommatoria spostamenti dell'inclinometro I-6; confronto tra dati iniziali e valori corretti.

I calcoli eseguiti hanno comportato alcuni assunti fondamentali per la comprensione delle fenomenologie in atto e precisamente:

1) gli spostamenti forniti dall'inclinometro I-6 risultano dell'ordine dei 10 mm, da confrontare con il valore iniziale di 16.1 mm (figura 6), estinguendosi alla profondità di 16 m; inoltre l'orientamento del vettore risultante appare essere congruo con il campo di spostamenti della frana di Valderchia (figura 3);

2) l'inclinometro I-10 mostra effettivamente spostamenti interessanti la porzione superiore del fronte di scavo della ex-miniera, ma con valori di 67 mm e cioè circa il 21% inferiore a quelli originari. Inoltre dall'estate del 2002 si assiste ad una improvvisa accelerazione, per raggiungere in breve tempo una velocità di spostamento costante che ha condotto nell'inverno del 2004 alla rottura del tubo (figura 7).

Considerato che la posizione dell'inclinometro I-10 è a circa 25 m dal ciglio del fronte di scavo e che gli spostamenti si estinguono ad una profondità di circa 19 m, appare plausibile l'ipotesi avanzata nel sottoparagrafo 2.2.

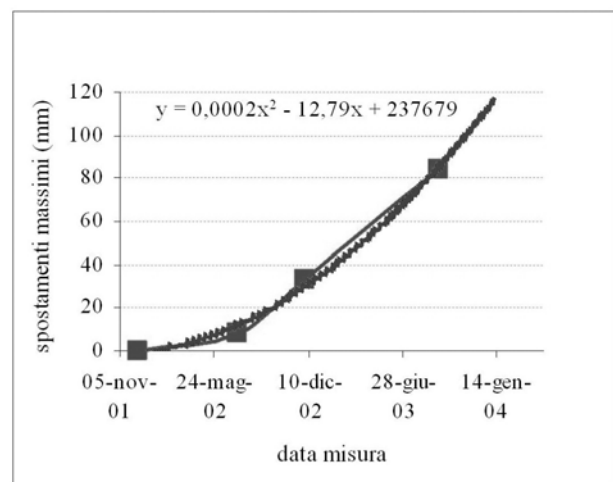


Figura 7. Velocità di deformazione della testa dell'inclinometro I-10 e relativa curva di proiezione dati, ricostruite utilizzando i dati originari e non corretti.

### 3.2 Monitoraggio piezometrico

Con riferimento alla figura 3, sono stati rilevati 5 piezometri ritenuti utili e validi per la comprensione delle fenomenologie in atto (figura 3), monitorati nel periodo intercorso tra l'inverno del 2000 e l'inverno del 2004:

1. P2 e P3, ubicati nella porzione mediana del corpo di frana;
2. P5, ubicato all'interno della depressione descritta nel sottoparagrafo 2.2;
3. P6 ed S15 posizionati rispettivamente presso gli inclinometri I-6 e I-10.

Le celle di Casagrande di P2 e P3, posizionate a varie altezze, mostrano un livello piezometrico oscillante rispettivamente tra -5.7 e -20 m e -5.6 e -9.5 m dal piano di campagna. Tali oscillazioni possono essere in parte spiegate se relazionate alla loro ubicazione: il piezometro P2 è sito nella porzione medio-inferiore del corpo di frana, in prossimità dei pozzi drenanti strutturali, mentre il secondo nella porzione medio-superiore. Una migliore

compressione può essere ottenuta se tali dati vengono confrontati con i valori misurati in P5 e P6: da un minimo depressionario di -2.6÷-2.7 m alla totale risalita della falda fino al piano di campagna (figura 8).

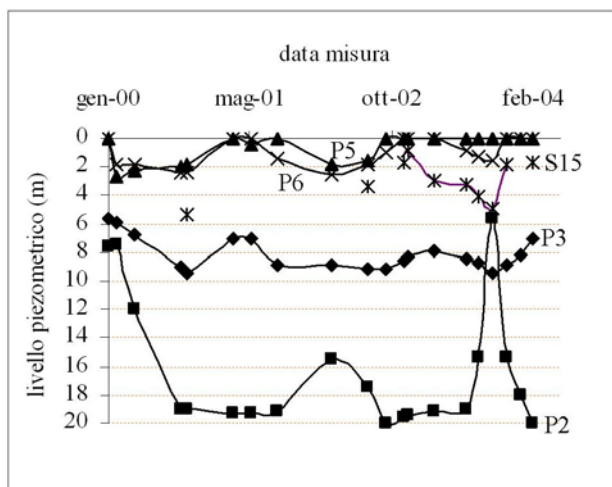


Figura 8. Livelli piezometrici monitorati nel periodo inverno 2000 ed inverno 2004.

Ciò porta ad desumere alcune condizioni essenziali:

- la depressione costituisce non solo la porzione superiore del corpo di frana, notoriamente in prevalente stato di trazione, ma anche la zona di ricarica naturale della complessa idrodinamica di falda;
- è probabile, come d'altronde è già stato rilevato nel passato, che il sistema di drenaggio subisca condizioni di temporanea inefficienza, come dimostrato dal picco positivo della curva di P2 in corrispondenza di picchi negativi di P6 ed S15 (figura 8);
- la falda non è lateralmente continua, ma è sostituita da linee preferenziali di drenaggio ubicate a diverse quote all'interno del corpo di frana.

Questa ultima condizione è derivata dalla constatazione che all'interno del medesimo piezometro le celle misurano valori diversi e che gli stessi variano tra i vari piezometri.

### 3.3 Analisi del fronte di scavo

Dall'integrazione dei risultati ottenuti è stato possibile re-interpretare la sezione C-C (figura 4B), tenuto conto delle informazioni geomorfologiche, di quelle derivanti dal riesame del monitoraggio inclinometrico, piezometrico e delle indagini geognostiche. Quindi tutte le informazioni sono state utilizzate per la costruzione di modelli numerici ad elementi finiti con lo scopo di cercare la possibile convergenza tra i dati a disposizione ed un modello geotecnico di valenza predittiva.

Nella costruzione dei modelli sono state utilizzati diverse leggi costitutive, ognuna capace di cogliere il comportamento dei singoli geomateriali coinvolti; ciò ha richiesto che le formazioni arenacee, marnose e calcaree venissero modellate come un materiale multisuperficie (Modello Multilaminare), con la matrice assimilata ad un

mezzo elasto-plastico tipo Hoek-Brown, mentre gli strati ed i giunti esibiscono un comportamento attritivo alla Coulomb (Bisetti et al., 2001). Nel modello proposto possono essere introdotti fino a 3 piani di scivolamento variamente orientati ( $\alpha_i$  inclinazione degli strati e dei giunti), ognuno dei quali rimane fisso nello spazio ed è caratterizzato da una coesione  $c_i$ , un angolo di attrito  $\phi_i$  ed un angolo di dilatanza  $\psi_i$  (tabelle 1 e 2).

Tabella 1. Proprietà geotecniche della matrice rocciosa arenacea, marnosa e calcarea, secondo il modello Hoek-Brown.

| litotipo | $\gamma_n$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $f_c$<br>[MPa] | $f_t$<br>[MPa] | $e$  | $E'$<br>[MPa] | $\nu$ |
|----------|------------------------------------|----------------|----------------|------|---------------|-------|
| Arenarie | 23.0                               | 40             | 4              | 0.52 | 250           | 0.20  |
| Marne    | 21.6                               | 20             | 2              | 0.52 | 70            | 0.22  |
| Calcarei | 24.0                               | 50             | 5              | 0.52 | 500           | 0.20  |

Tabella 2. Proprietà geotecniche della stratificazione e dei giunti delle arenarie/marne/calcarei secondo il modello Multilaminare.

|           | $\alpha_i$<br>[°] | $\phi'$<br>[°] | $\psi'$<br>[°] | $c'$<br>[MPa] |
|-----------|-------------------|----------------|----------------|---------------|
| Strati    | 58                | 35/27/40       | 23/18/27       | 1.7/0.5/2.5   |
| I° giunto | 95                | 35/27/40       | 23/18/27       | 0             |

Il materiale detritico è stato invece modellato come un mezzo elastico non lineare–perfettamente plastico ( $E'=10$  MPa,  $\nu=0.33$ ), caratterizzato dalla superficie di snervamento di Drucker-Prager ( $c'=10$  kPa,  $\phi'=30^\circ$ ) e da una regola di flusso associata ( $\psi=0$ ). La formulazione della non-linearità è stata risolta mediante l'adozione dello schema iterativo di Newton-Raphson modificato.

I risultati ottenuti, nonostante la complessità del modello bi-dimensionale dettata dall'introduzione di piani di faglia (figura 4) e l'utilizzo di leggi di variazione delle proprietà geotecniche dei terreni, non sono stati del tutto incoraggianti, dal momento che le condizioni di rottura, pur rispettando la geometria del modello reale non ne hanno interpretato le dimensioni (figura 9d). In effetti il modello FEM ha attinto a condizioni di pre-collasso presso la testata del fronte di scavo, con geometria rotazionale la cui superficie di scivolamento raggiunge profondità massime inferiori ai valori letti all'inclinometro I-10 di riferimento.

La spiegazione della differenza è insita nella lettura della figura 9, nella quale sono chiaramente visibili strati rocciosi variamente inclinati ("a" e "b"), nonché la frana rotazionale interposta tra di essi ("c"). Ciò implica che la struttura geologica di tale settore debba configurarsi come una zona di taglio diffuso (sintetizzata dalla linea tratteggiata) capace di dislocare gli strati rocciosi e di influenzare l'evoluzione morfologica in funzione delle modifiche degli stati tensionali nel tempo dovuti alla rimozione delle masse rocciose.

Una migliore comprensione del problema sarà forse possibile in futuro solo con l'ausilio di modelli numerici 3D, la cui complessità esula dalle finalità della presente ricerca.



Figura 9. Vista generale del fronte di scavo: “a” strati inclinati; “b”: strati molto inclinati; “c”: frana rotazionale; “d”: modello numerico ad elementi finiti. Il tratteggio indica una zona di taglio tettonico.

### 3.4 Modello numerico del corpo di frana

Utilizzando le medesime condizioni e modelli previsti nell’analisi geotecnica del fronte di scavo, la ricerca viene conclusa con l’analisi del comportamento tempo-dipendente della frana di Valderchia, così come emerso dal monitoraggio inclinometrico che evidenzia l’esistenza di campi di spostamento differenziali lungo l’asse longitudinale. Il punto di partenza è consistito nella ricostruzione della geometria della frana, utilizzando la sezione AA di progetto (Regione Umbria, 1998 – figure 3 e 10).

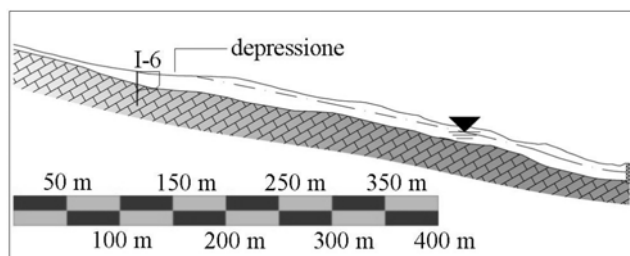


Figura 10. Sezione longitudinale (da Regione Umbria, 1998 – modificata).

La lettura dei dati piezometrici indica la presenza di una falda depressa nella porzione medio-bassa della frana, in funzione dell’azione dei sistemi di drenaggio realizzati, e coincidente con il piano di campagna nella porzione medio-alta. Nel contempo però si assiste anche ad una oscillazione della stessa nel tempo che potrebbe inficiare i lavori di consolidamento e dipendenti da due condizioni essenziali che influenzano la costruzione dei modelli numerici: a) la temporanea inefficienza dei pozzi drenanti; b) la presenza di linee preferenziali di drenaggio. Il monitoraggio inclinometrico invece indica come lo

spessore del corpo di frana a monte della depressione sia maggiore di quanto stimato negli studi precedenti, validando ulteriormente le ipotesi di lavoro.

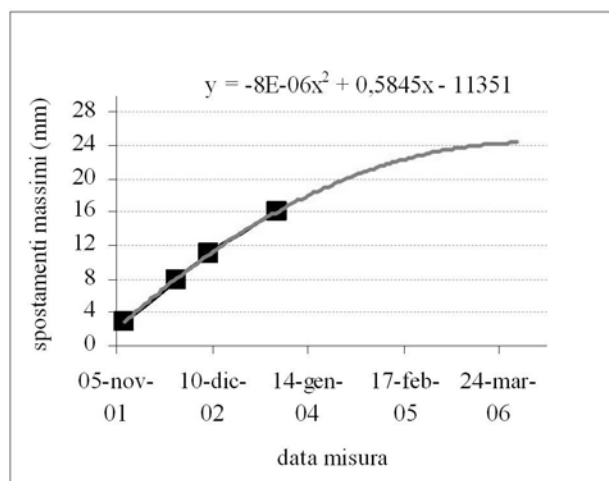


Figura 11. Velocità di deformazione della testa dell’inclinometro I-6 e relativa curva di proiezione dati, ricostruite utilizzando i dati originari e non corretti.

Il problema fondamentale nella costruzione del modello numerico è consistito nella ricostruzione del campo degli spostamenti, dal momento che l’obiettivo dell’analisi retrospettiva è quello di raggiungere condizioni di convergenza con il modello reale e solo successivamente di eseguire analisi predittive. Per tale motivo è stato necessario implementare il fenomeno di rammollimento dei geomateriali costituenti il corpo di frana inteso come processo interno (creep), simulato mediante il modello di Kelvin-Voigt, con legge di variazione logaritmica del tipo:

$$C(t, t_0) = A \ln(1 + Bt) \quad (5)$$

Nell’equazione 5,  $C(t, t_0) = \varepsilon^{cr}$  rappresenta le deformazioni per creep, mentre  $A = 1e^{-4}$  e  $B = 8e^{-5}$  parametri derivabili generalmente da prove edometriche (ZACE, 2006) e nel nostro caso dalla costruzione della curva di proiezioni dati delle letture inclinometriche (figura 11), la quale evidenzia un tipico andamento logaritmico, seppur traslato lungo l’asse delle ascisse. La complessità del fenomeno ha richiesto inoltre l’implementazione di elementi elasto-plastici di interfaccia capaci di simulare lo scorrimento della frana sul sottostante substrato roccioso, quest’ultimo modellato in campo elastico al fine di evitare che il relativo comportamento plastico potesse obliterare il reale punto di vista. Per il corpo di frana è stato utilizzato il legame costitutivo di Drucker-Prager ( $c'=5$  kPa,  $\phi'=27^\circ$ ), con una regola di flusso associata ( $\psi=0$ ).

La ricostruzione del modello attuale, convergente con quello reale, ha richiesto l’analisi degli effetti del creep e dei pozzi drenanti per un periodo di 4 anni (2000÷2004), con la simulazione degli effetti legati ad una temporanea insufficienza degli elementi drenanti, questi ultimi simulati con elementi “seepage”. Quindi il modello è stato

lasciato evolvere fino all'attualità (2006) per poi essere proiettato al 2010. La proiezione 2006÷2010 è inoltre stata eseguita secondo due modalità diverse: 1) con la geometria attuale degli interventi di consolidamento; 2) con l'estensione dei drenaggi profondi nella porzione di testata.

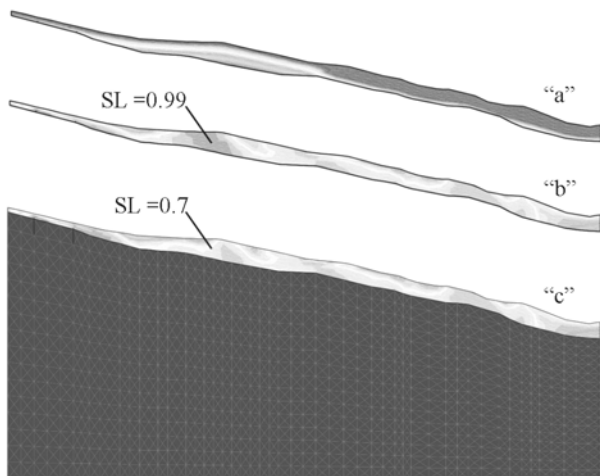


Figura 12. Modello ad elementi della frana di Valderchia. “a”: pressioni interstiziali attuali; “b”: stress-level attuale; “c”: stress-level con estensione dei drenaggi alla zona di testata.

I risultati hanno evidenziato che nel primo caso, corrispondente al modello attuale, il fattore di sicurezza minimo è di 1,32 in funzione di condizioni di temporanea inefficienza dei sistemi drenanti, mentre in condizione di perfetta efficienza lo stesso è pari a 1,78. Nel contempo però permane uno stato di deformazione che aumenta dalla testata verso il piede della frana, in relazione al passaggio da stati di filtrazione transitoria a stati di filtrazione stazionaria con falda in moto, come evidenziato anche dallo “stress-level” (definito come il rapporto tra lo sforzo deviatorico e il corrispondente valore a rottura, determinato tramite l’invariante secondo del tensore deviatorico dello sforzo) di cui alla figura 12b. In altre parole la determinazione del coefficiente di sicurezza di frane attive lente è da considerarsi una condizione necessaria ma non sufficiente.

Nel caso invece di esecuzione di ulteriori lavori di drenaggio, ubicati presso la testata e precisamente nella zona di depressione morfologica, il modello evidenzia una temporanea accelerazione della deformazione dell'intero corpo di frana, seppur con distribuzione differenziata, in funzione dell'abbassamento del livello piezometrico ed una successiva tendenza alla stabilizzazione definitiva. E tale deformazione comporta una generale subsidenza, accompagnata da uno spostamento medio verso valle non superiore ai quaranta millimetri. Il confronto dello “stress-level” corrispondente (figura 12c) con quello precedente risulta in tal senso essere significativo.

In entrambi i modelli è comunque emersa l'azione stabilizzatrice esercitata dal rilevato stradale della ex S.S. 452 Della Contessa il quale, protetto da muri d'ambito in cemento armato, ha agito ed agisce con un effetto diga.

Nel contempo però essa spiega anche le deformazioni presenti nella porzione inferiore della frana, notoriamente soggetta ad uno stato di generale compressione.

Occorre infine anche precisare che le analisi eseguite debbono essere necessariamente considerate come indicative, per l'assenza di una falda lateralmente continua sostituita da linee preferenziali di drenaggio e per la struttura caotica del corpo di frana, costituita da frammenti del substrato immersi in matrice prevalentemente limo-sabbiosa.

Alla luce di tali considerazioni è possibile anche considerare che la frana in questione potrebbe essere assimilata, in un modello estremamente semplificato ma efficace per valutazioni rapide e speditive, ad un pendio indefinito. In effetti una singola porzione della frana è costituita da un volume di materiale attritivo delimitato da un piano di campagna parallelo al sottostante contatto frana-substrato e con un moto di filtrazione parallelo ad essi. In tali condizioni al contorno si ha che il fattore di sicurezza è dato da:

$$F_s = \frac{\tan \phi' \gamma'}{\tan \alpha \gamma} \cong \frac{1 \tan \phi'}{2 \tan \alpha} \quad (6)$$

dove  $\alpha$  è l'inclinazione del pendio. L'applicazione dell'equazione 6, considerato un valore medio di  $\alpha = 14^\circ$  e di  $\phi' = 27^\circ$ , comporta un fattore di sicurezza di 1,02, una condizione prossima al collasso come d'altronde si è verificato nel 1997. In assenza di moto di filtrazione, in relazione all'esecuzione di opere efficaci di drenaggio il fattore di sicurezza aumenta a 2,04.

La rispondenza dei valori calcolati con un modello semplice con il modello reale, evidenzia come per frane di scorrimento traslazionale l'espressione del pendio indefinito è utile quanto qualunque altro metodo di analisi di stabilità e fornisce risultati estremamente validi (Bromhead E.N., 1986). Viceversa il ricorso a modelli più sofisticati è utile quando è necessario considerare gli effetti locali, pur con le complicazioni dettate dalle condizioni al contorno, come evidenziato per la frana in questione.

#### 4 CONCLUSIONI

I risultati dell'analisi retrospettiva possono essere riassunti in pochi ma essenziali concetti.

Lo studio di un corpo di frana non può esaurirsi nella determinazione del suo coefficiente di sicurezza, soprattutto se derivato dall'applicazione di leggi rigido-plastiche; in effetti gli studi e le analisi eseguite hanno dimostrato come un fattore di sicurezza superiore all'unità non sia esclusivamente espressione di salvaguardia, ma indica semplicemente una condizione al contorno lontana dal possibile collasso, ovvero rappresenta una condizione necessaria ma non sufficiente nella progettazione geotecnica (Di Francesco et al., 2004).

Nel caso specifico di una frana soggetta a movimenti tempo-dipendenti, l'elemento di maggiore importanza è fornito dalla velocità di deformazione  $ds/dt$  e dalla sua relazione con l'idrodinamica delle acque sotterranee; ed è

su tale elemento che deve essere basata la progettazione geotecnica degli interventi di consolidamento. Occorre nel contempo valutare le variazioni di velocità in condizioni post-intervento, dal momento che gli spostamenti misurati dagli inclinometri sono il risultato delle deformazioni proprie della frana che va progressivamente stabilizzandosi e di quelli derivanti dalla variazione del regime di pressione interstiziali indotte dal drenaggio (Evangelista A., 1997).

La complessa idrodinamica di falda indica due situazioni complementari: A) l'abbassamento (quasi)costante del livello piezometrico nella porzione medio-bassa del corpo di frana, che denota l'efficienza degli interventi di drenaggio ivi ubicati, ma fortemente dipendente dalla loro efficacia nel tempo la quale può essere assicurata solo attraverso idonea manutenzione. In effetti il drenaggio può essere considerato un metodo di stabilizzazione molto efficace ma, affinché la sua azione possa permanere nel tempo, richiede una periodica manutenzione (Evangelista A., 1997) e la valutazione preventiva dei suoi costi; B) La permanenza di una condizione di totale saturazione della zona di testata della frana, identificata da una vasta depressione, indica che la stessa costituisce la zona di alimentazione dei livelli piezometrici nonché la strada da seguire per una stabilizzazione nel lungo periodo. La stabilizzazione complessiva della frana di Valderchia potrebbe essere perseguita attraverso l'estensione del drenaggio, integrata da rimodellamenti, riporti e riambientazione naturalistica, fermo restando la necessità di una manutenzione continua delle opere drenanti e il proseguo del monitoraggio per ulteriori valutazioni post operam.

Non esiste alcun nesso tra la frana di Valderchia propriamente detta e la limitata instabilità del limitrofo fronte di scavo di una ex-miniera a cielo aperto. Tale assunzione è scaturita dall'analisi dei dati relativi a due inclinometri definibili strategici che ha palesato una evidente spirality il cui recupero dati è stato eseguito mediante l'utilizzo di una procedura matematica. Infine la realizzazione di modelli numerici ad elementi finiti ha solo parzialmente spiegato la fenomenologia in atto, in relazione ad una complessa struttura geologica di difficile simulazione.

## BIBLIOGRAFIA

- Bisetti A., Commend S., Tendon D., Zimmermann Th., 2001. *Finite element stability analyses of natural caves*. Eurock 2001.
- Bromhead E.N., 1986. *Stabilità dei pendii*. Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- Cencetti C., Conversini P., Ribaldi C., Sacconi P., 1998. *The landslide in Valderchia near Gubbio, Umbria, Central Italy*. Proceedings Eight International Congress International Association for Engineering Geology and the Environment, Vancouver (Canada).
- Di Francesco R., Siena M., Tiberii M.G., Labagnara R., Di Matteo L., Scalella G., 2004. *Il contributo della geotecnica nella comprensione dei dissesti storici dell'abitato di Campi (TE)*. XXII Convegno Nazionale di Geotecnica – AGI, Palermo.
- Evangelista A., 1997. *Sistemi drenanti per la stabilizzazione dei pendii*. Interventi di stabilizzazione dei pendii, AAVV, International centre for mechanical sciences, Udine.
- Regione Umbria, 1998. *Interventi urgenti diretti a fronteggiare i danni conseguenti alle attività atmosferiche, agli eventi alluvionali ed ai conseguenti dissesti idrogeologici dei mesi di novembre e dicembre 1996 e gennaio 1997 nella Regione Umbria*. Ordinanza Commissariale n. 20, 1997.
- ZACE (2006). *Z\_SOIL.PC Theoretical Manual*. Elmeppress International, Zace Services Ltd, Lousanne.

## ABSTRACT

### RETROSPECTIVE ANALYSIS ON VALDERCHIA LANDSLIDE, GUBBIO (PG).

Keywords: landslide, monitoring, inclinometers, retrospective analysis

As a result of an exceptional snowed and its rapid and total dissolution in 1997 January, in Valderchia resort near Gubbio, the reactivation of an ancient landslide was taken place. It caused numerous damages to houses, infrastructures and as well as it formation of an obstruction lake caused by the clogging of the below torrent San Donato. The consolidation works have been done to decrease the piezometric level landslide with the making of draining wells. The piezometric and inclinometric monitoring done until 2004, showed a complex hydrodynamic water table and also a possible involvement of a near old mine. The retrospective analysis has instead put in evidence the contrast of some elements, deriving from the inclinometric monitoring, with such work hypothesis. Moreover the construction of finite elements models in agreement with the known data confirmed these hypothesis and highlighted that there isn't any correlations between the landslide body and the quarry front and therefore that the landslide hasn't reached an equilibrium condition yet.