

Previsione dell'evoluzione cinematica dei pendii mediante un procedimento di simulazione statistica

Alessandro Mandolini*, Gianfranco Urciuoli**

Sommario

Alcuni pendii sono soggetti a spostamenti lenti che non pregiudicano l'esercizio di alcune attività ed infrastrutture. In tali casi però è necessario controllare l'entità dei movimenti e valutarne l'ammissibilità in ragione della destinazione d'uso del territorio. Possono essere utili metodi di previsione statistica che consentono di stimare la velocità futura di spostamento, correlandola ad un fattore innescante tenuto sotto osservazione.

In questo lavoro viene presentato il caso di un pendio soggetto a movimenti stagionali di alcuni cm/anno, regolati dal regime delle piogge. I dati misurati ed utilizzati per l'analisi sono gli spostamenti superficiali, le piogge e le pressioni neutre nel sottosuolo.

1. Premessa

Sul territorio nazionale sono ampiamente diffusi pendii soggetti a movimenti molto lenti o estremamente lenti (rispettivamente $v < 1,6$ m/anno e $v < 0,016$ m/anno, secondo CRUDEN e VARNES, 1994) che non inducono apprezzabili variazioni morfologiche nel versante. A volte tali pendii sono attraversati da infrastrutture (strade, ferrovie, acquedotti, gasdotti, ...) che, pur continuando a rimanere in esercizio, subiscono danni per effetto di tali spostamenti ed hanno bisogno di controllo e manutenzione. In talune circostanze potrebbe risultare necessario intensificare i controlli nei periodi critici o addirittura interrompere il servizio in attesa di un evento di particolare intensità, se prevedibile.

D'altro canto il prolungarsi dei movimenti nel tempo può di per sé determinare il raggiungimento di valori critici dello spostamento, non ammissibili per alcune delle strutture presenti sul pendio.

Nel contesto geologico dell'Italia Centrale e Meridionale le frane di questo tipo sono essenzialmente rappresentate dagli scorrimenti traslativi in

terreni argillosi, definiti da VARNES [1978] come movimenti lungo una superficie più o meno piana, senza rotazioni apprezzabili, e quindi incapaci di produrre variazioni di geometria del corpo di frana (e di ripristinare l'equilibrio attraverso questo meccanismo).

L'analisi cinematica di queste frane è molto complessa ed i pochi modelli disponibili in letteratura sono largamente insufficienti rispetto agli obiettivi enunciati.

Lo stato delle conoscenze è tale da consentire al più una descrizione qualitativa dei principali aspetti meccanici di tali fenomeni e di definire un quadro di osservazioni da cui partire per la modellazione.

Gli aspetti tipici degli scorrimenti traslativi sono i seguenti:

- il profilo verticale di velocità nel corpo di frana è pressoché costante; gli scorrimenti sono concentrati sulla superficie di scorrimento o in una sottile banda di taglio alla base del corpo di frana;
- la superficie di scorrimento è localizzata in strati più deboli, o lungo contatti stratigrafici o vecchie superfici di taglio;
- gli spostamenti si ripetono ciclicamente; in alcuni casi le misure protratte per decenni hanno dato conto del lungo periodo di vita di tali movimenti, che è lecito ritenere ampiamente maggiore del periodo di osservazione;
- l'accumulo di spostamenti, per decenni o centinaia di anni, produce la riduzione della resistenza disponibile lungo la superficie di scorrimento ad un valore prossimo a quello residuo;
- le velocità di spostamento sono strettamente correlate alle variazioni di pressione neutra nel corpo di frana, che a loro volta possono essere messe in correlazione con le piogge;
- gli spostamenti, non sempre simultanei nel corpo di frana, sono caratterizzati da accelerazioni ridottissime; spesso essi risultano di entità variabile lungo l'asse longitudinale della frana a causa della deformazione dei terreni coinvolti nel fenomeno.

Gli ultimi due aspetti sono particolarmente importanti per l'elaborazione di un modello finalizzato alla previsione degli spostamenti, pertanto essi vengono affrontati più in dettaglio nel seguito.

2. Cinematismi

Sono stati esaminati alcuni casi della letteratura per i quali erano disponibili misure di spostamento eseguite con frequenza almeno mensile. I dati sono stati raccolti ed elaborati per ottenere le velocità e le accelerazioni medie sul periodo di tempo intercorrente fra una misura e la successiva.

Ovviamente ciò significa far riferimento ad un moto fittizio equivalente; il moto reale potrebbe

* Ricercatore - Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università di Napoli

** Ricercatore - Dipartimento di Ingegneria Geotecnica Università di Napoli Federico II

essere invece caratterizzato da movimenti concentrati nel corso di qualche giorno e non uniformemente distribuiti fra due misure successive. È evidente però che in entrambi i casi, al termine di ciascun intervallo di tempo, si verifica lo stesso spostamento.

In Fig. 1 sono riportati in un diagramma bi-logaritmico le accelerazioni e le velocità di 6 casi tratti dalla letteratura (l'accelerazione è adimensionalizzata rispetto a quella gravitazionale). Si osserva, in accordo a quanto anticipato al punto 1.f, che l'accelerazione è estremamente ridotta ($a/g < 10^{-12}$); essa risulta ben correlata ($r^2=0.86$) alla velocità, attraverso una funzione del tipo potenza [VOIGHT, 1988]:

$$\frac{a}{g} = A \cdot v^\beta \quad (1)$$

La relazione ritrovata è già stata usata in letteratura per la previsione dei cinematismi di alcune frane. In questo lavoro si intende esaminare la sua natura e ricondurla all'interpretazione fisica del fenomeno (paragrafo 4).

3. Fattori di instabilità: le pressioni neutre

Come anticipato al punto 1e, è opportuno ribadire che per le frane esaminate in questo lavoro è stata ritrovata una forte correlazione fra la velocità di spostamento e le pressioni neutre nel sottosuolo.

In Fig. 2 viene riproposto a titolo di esempio il caso di Fosso S. Martino [BERTINI *et al.*, 1986] in cui è stato possibile istituire due correlazioni fra velocità di spostamento e pressioni neutre (espresse attraverso la distanza dal p.c. del livello d'acqua in un

piezometro), valide rispettivamente per la fase di risalita e di abbassamento della falda. I dati sperimentali individuano due curve ben definite ed incoraggiano quindi all'uso delle correlazioni.

Perché la previsione degli spostamenti risulti utile da un punto di vista tecnico, è necessario che sia fatta con sufficiente anticipo rispetto all'evento atteso, in modo da consentire i provvedimenti di emergenza. Per tale motivo è necessario non solo istituire una correlazione fra velocità di spostamento e pressioni neutre, ma anche fra queste ultime e le piogge. Infatti è noto che nei terreni argillosi la falda risponde con ritardo agli eventi meteorici, per cui sulla base delle piogge cadute è possibile, in linea di principio, fare previsioni sulle pressioni neutre.

Purtroppo la risposta del regime delle pressioni neutre alle piogge è estremamente complessa in quanto è condizionata da numerosi fattori, esterni al sistema scheletro solido-acqua che, tra l'altro, variano sensibilmente con la stagione (temperatura, evapotraspirazione, insolazione diretta, presenza di vegetazione stagionale,...).

Poiché tali complessità sfuggono ad una corretta modellazione analitica, la relazione piogge-pressioni neutre viene spesso trattata con metodi empirico-statistici basati su un'accurata descrizione dei comportamenti osservati. A questo scopo vari studi riportati in letteratura [PELLEGRINO, 1988; URCIOLI, 1997] hanno evidenziato alcuni caratteri tipici del regime delle pressioni neutre nei pendii in Argille Varicolori:

- il livello d'acqua raggiunto nelle coppie di piezometri sulla stessa verticale è più alto in quelli superiori; esiste quindi una componente di flusso verso il basso, probabilmente legata all'infiltrazione di acqua piovana;
- nei periodi di massima risalita il pelo libero della falda (inteso come l'involuppo dei livelli d'ac-

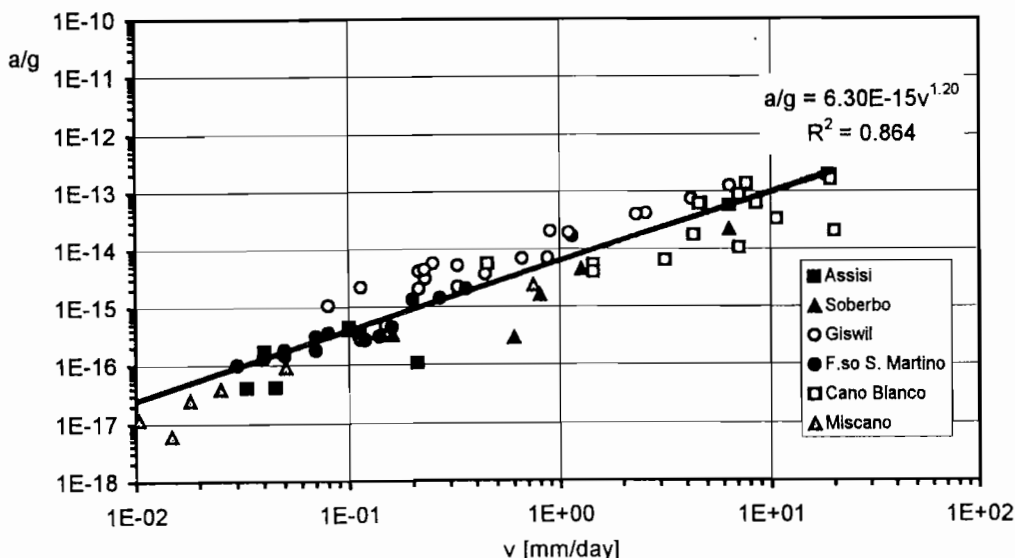


Fig. 1 - Caratteristiche cinematiche (accelerazione, velocità) di alcuni scorrimenti traslativi, riportati in letteratura.
Fig. 1 - Kinematic features (acceleration, rate of displacement) of some translational slides, taken from literature.

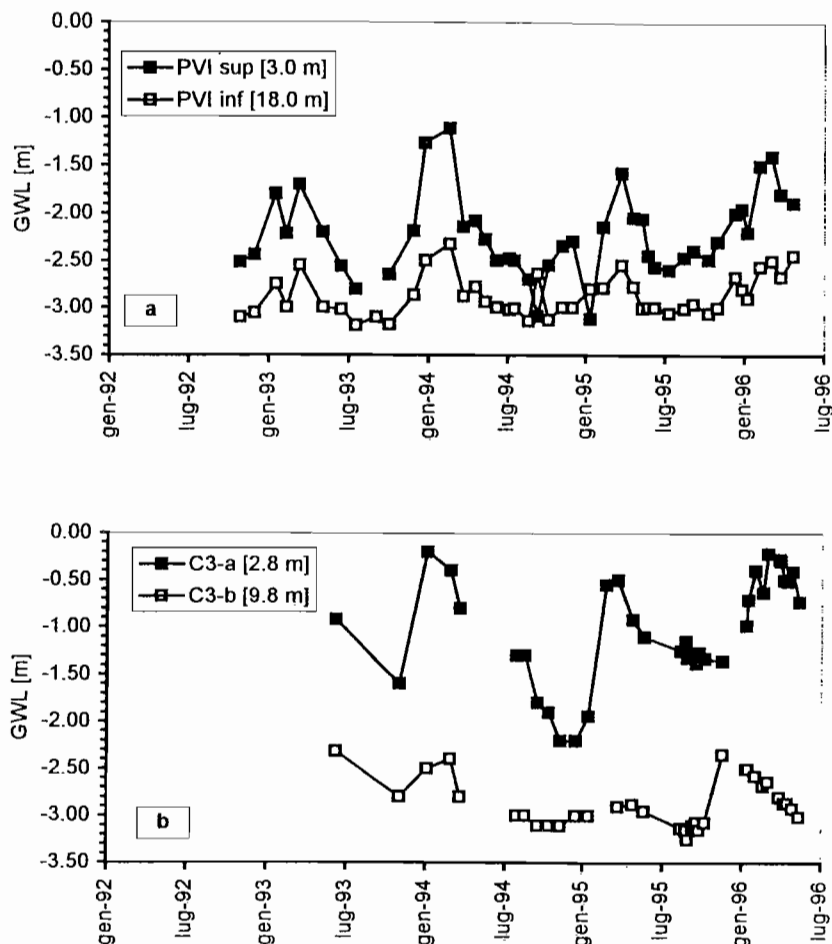


Fig. 3 – Escursioni stagionali del livello d'acqua nei piezometri, misurate in due celle installate sulla stessa verticale a profondità diverse: a) Valle del Basento, b) valle del Miscano.

Fig. 3 – Seasonal fluctuations of the water level measured in a couple of piezometers, installed at different depths: a) Valle del Basento, b) Valle del Miscano.

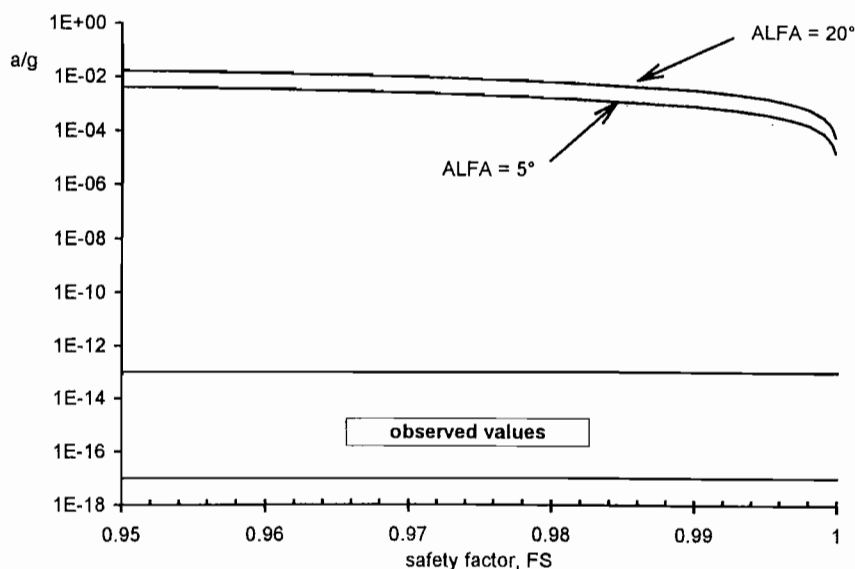


Fig. 4 – Modello del blocco rigido su piano inclinato: accelerazioni assunte dal blocco in funzione del coefficiente di sicurezza. Le accelerazioni previste dall'analisi per due diversi valori dell'inclinazione α del piano sono significativamente maggiori di quelle osservate e riportate in Fig. 1.

Fig. 4 – "Rigid block" model resting on an inclined plane: values of derived acceleration as function of the safety factor FS . The predicted acceleration by the analysis carried out for two different values of the slope angle α are extremely larger than the observed one, shown in Fig. 1.

zione, consentendo solo spostamenti modesti, dovuti alla deformazione del corpo di frana.

Lo studio dell'interazione del blocco col resto della frana è complesso e dipende dalla legge costitutiva del materiale, dalle condizioni al contorno, dalla geometria del problema e può essere sviluppato solo con l'ausilio di codici di calcolo numerico [PICARELLI *et al.*, 1995; RUSSO e URCIOLI, 1997].

In alternativa, per fini tecnici è possibile far ricorso a modelli empirico-statistici in cui uno dei parametri del moto è correlato alla causa innescante, nel caso in esame le pressioni neutre nel sottosuolo.

Il parametro scelto non può essere l'accelerazione, perché in questo caso si istituirebbe una relazione del tipo (2bis) di cui si è già fatta osservare l'inadeguatezza. Tanto meno può essere lo spostamento; infatti la correlazione sarebbe equivalente all'equazione di una molla elastica e prevederebbe il recupero dello spostamento durante il periodo di riduzione delle pressioni neutre, cioè la risalita della frana verso monte.

Da queste osservazioni e dalle esperienze riportate in letteratura la correlazione fra intensità della causa innescante e velocità di spostamento appare la più razionale.

Per questo motivo hanno trovato impiego in letteratura metodi di calcolo "equivalenti" che trattano il terreno come fluido viscoso, idonei a simulare un moto di tipo stazionario in cui la velocità di spostamento è univocamente collegata allo stato di sollecitazione; in tal modo il movimento della frana viene assimilato a quello di una corrente a pelo libero in un canale. In effetti il ricorso a tali metodi non ha significato fisico ed equivale ad istituire una correlazione fra velocità di spostamento e fattore solleciti-

tante i cui parametri possono facilmente essere ritrovati statisticamente.

Nel presente lavoro è stato adottato quest'ultimo approccio.

5. Previsione statistica

Il modello di previsione consta in due fasi: nella prima le pressioni neutre vengono correlate alle piogge, nella seconda vengono stimate le velocità attese in funzione delle pressioni neutre previste.

Il modello è stato applicato al caso di un pendio ubicato nel Sannio, del quale in Fig. 5 è riportata una sezione con la strumentazione installata; tutte le misure disponibili (piogge, pressioni neutre e spostamenti) sono state suddivise in due gruppi; nel primo, di "taratura", sono state istituite le correlazioni e stimati statisticamente i parametri del modello, nel secondo, di "proiezione", sono stati estrapolati i risultati ottenuti ad un intervallo temporale successivo, per verificare la qualità della simulazione.

Nella previsione delle pressioni neutre sono state adottate due leggi di variazione, valide rispettivamente per la fase di risalita e di abbassamento; la distanza del pelo libero della falda dal p.c. (G.W.L._i) è stata correlata alla misura precedente (G.W.L._{i-1}) ed alla quantità di pioggia caduta, cumulata per vari periodi: dall'8° al 14° giorno precedente la data della i-ma misura (P₁₄), dal 15° al 21° (P₂₁) e dal 22° al 28° (P₂₈).

Il programma di elaborazione calcola automaticamente i pesi di ciascun termine (G.W.L._{i-1}, P₁₄, P₂₁, P₂₈) nel periodo di taratura, col criterio di minimizzare la sommatoria degli scarti quadratici medi fra

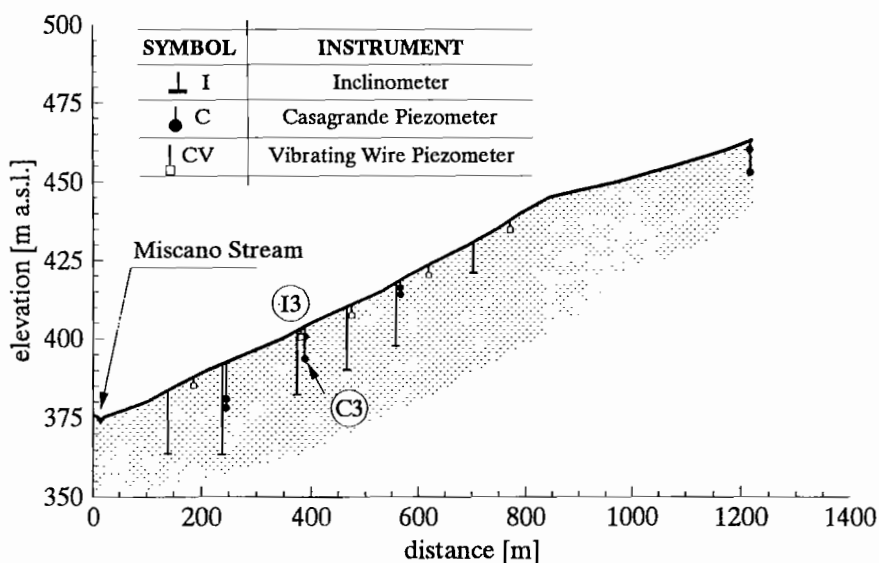


Fig. 5 - Sezione longitudinale della frana della Valle del Miscano con la strumentazione installata.

Fig. 5 - Cross section of the Valle del Miscano landslide with all instruments installed.

dati reali e previsti; la relazione così determinata viene estrapolata al periodo di proiezione (Fig. 6).

In definitiva i valori attesi del pelo libero della falda nel piezometro C3 sono forniti dalle due seguenti relazioni, valide rispettivamente per il periodo di abbassamento (primavera, estate) e di risalita (autunno, inverno):

$$\begin{aligned} \text{GWL}_i &= \text{GWL}_{i-1} \cdot 0.65 + 0.0045 \cdot P_{21} + 0.002 \cdot P_{28} - 0.66 \\ \text{GWL}_i &= \text{GWL}_{i-1} \cdot 0.76 + 0.02 \cdot P_{14} + 0.015 \cdot P_{21} + 0.01 \cdot P_{28} - 0.84 \end{aligned} \quad (3)$$

Dalle precedenti relazioni si osserva che i pesi delle piogge sono modesti nel periodo estivo e decisamente più significativi nel periodo invernale; ciò è in accordo col fatto che esistono fattori tipicamente stagionali, come la temperatura, l'insolazione diretta del piano campagna, il tipo di pioggia (intensità e durata), il grado di saturazione della coltre più superficiale che regolano la quantità di acqua che riesce effettivamente ad infiltrarsi nel sottosuolo (essa è decisamente maggiore in autunno ed in inverno).

Per la previsione delle velocità di spostamento (v) del pendio sono state istituite due correlazioni empiriche fra G.W.L. ed il rapporto $v/\text{G.W.L.}$, valide rispettivamente nel periodo di abbassamento ed innalzamento del pelo libero della falda. Anche in questo caso si è reso necessario individuare due diverse relazioni, per i seguenti motivi:

- durante la fase di risalita gli spostamenti derivano dalla deformazione elasto-plastica del corpo di frana e dallo scorrimento alla base e sono dovuti all'aumento del livello di sollecitazione; ad essi si sommano gli spostamenti viscosi del terreno;

- durante la fase di abbassamento si verificano essenzialmente solo deformazioni viscosi.

Il legame velocità-pressioni neutre per la fase di risalita (Fig. 7) è di particolare importanza in quanto descrive il comportamento cinematico del pendio al peggiorare delle condizioni di stabilità; le velocità attese si ottengono invertendo la relazione empirica riportata in Fig. 7 e risultano funzione esponenziale della profondità del pelo libero della falda dal p.c.; sembra esistere una soglia (-2.2 m circa) al di sotto della quale la velocità di spostamento è nulla.

Nella Fig 8 è riportato il confronto fra le velocità misurate e quelle previste in funzione del tempo; i risultati sono confortanti e sembrano utilizzabili ai fini tecnici.

6. Conclusioni

Sulla base di vari casi esposti in letteratura sono stati individuati alcuni aspetti degli scorrimenti traslativi nei terreni argillosi dell'Appennino dell'Italia Meridionale: l'entità estremamente modesta delle velocità di spostamento (alcuni cm o decine di cm all'anno) ed il carattere stagionale dei movimenti che risultano strettamente correlati alla profondità del pelo libero della falda.

L'analisi del moto ha mostrato che l'approccio più razionale per giustificare i cinematismi descritti è ritenerli conseguenza delle deformazioni del corpo di frana (ipotizzato globalmente stabile, $FS > 1$), in cui si verificano variazioni di stato tensionale in conseguenza delle variazioni del regime delle pressioni neutre nel sottosuolo. Questo modello consen-

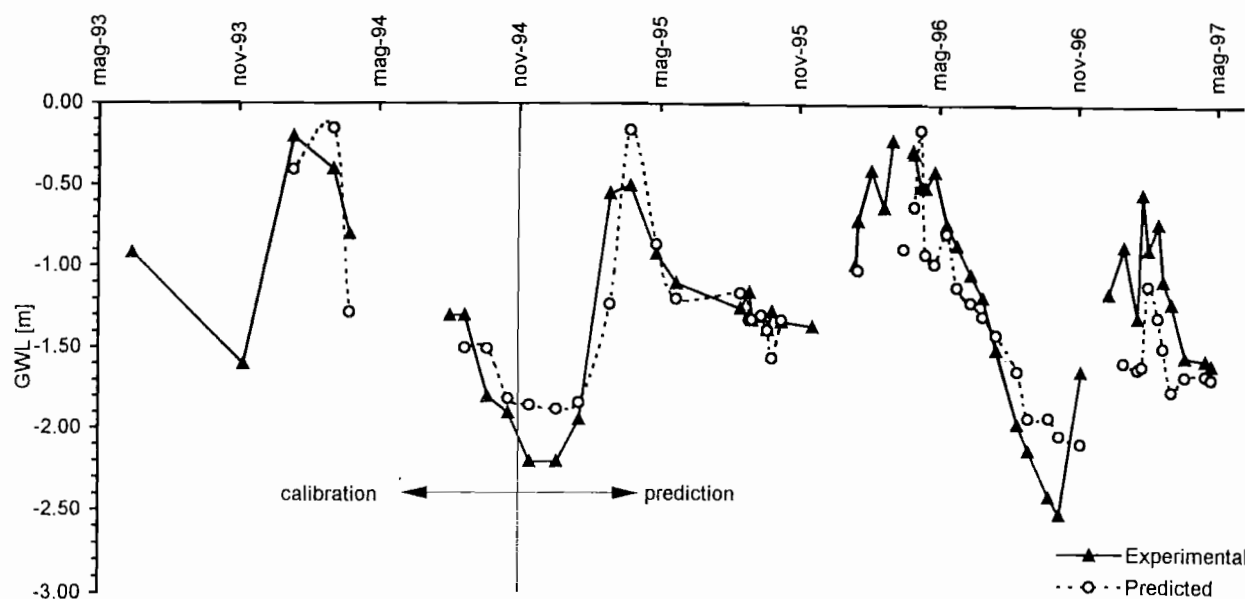


Fig. 6 - Confronto fra i valori del pelo libero della falda, misurati e previsti dal modello statistico; il periodo a sinistra della linea verticale è stato utilizzato per tarare la correlazione.

Fig. 6 - Comparison between predicted and observed ground water level at Valle del Miscano, The time period on the left of the vertical line has been used to calibrate the correlation.

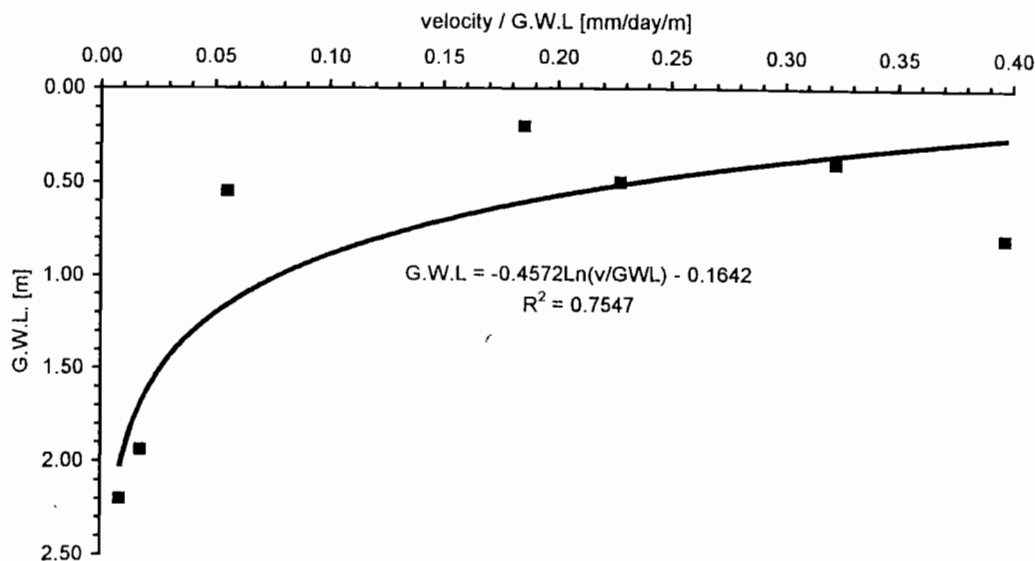


Fig. 7 – Correlazione statistica fra la velocità di spostamento della frana e la profondità del pelo libero della falda, per una sezione del corpo di frana. La correlazione vale per la fase di aumento delle pressioni neutre.

Fig. 7 – Statistical correlation between rate of displacement of the landslide and water level measured in a piezometer at Valle del Miscano, to be used for the period of rising water level.

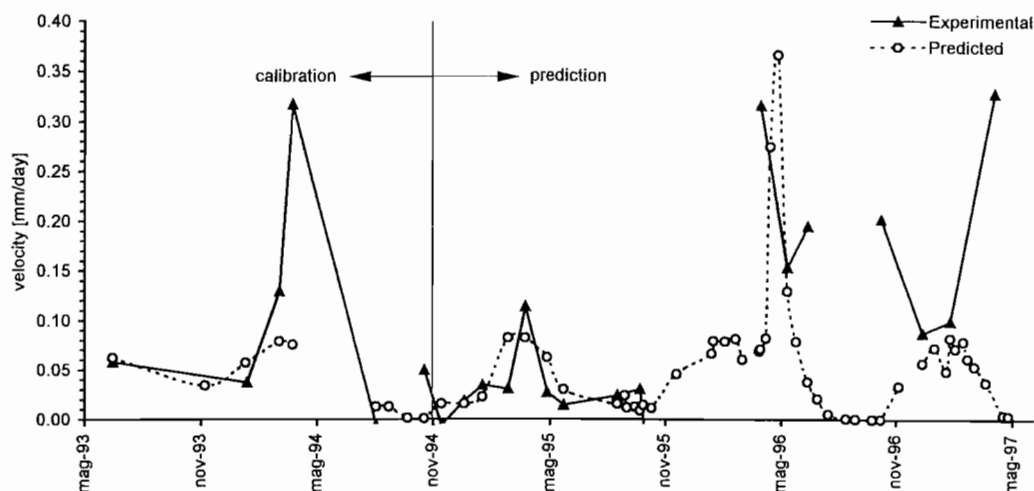


Fig. 8 – Confronto fra le velocità di spostamento misurate e quelle previste dal modello statistico.

Fig. 8 – Comparison between predicted and observed rate of displacement at Valle del Miscano.

te di escludere la possibilità che il corpo di frana si muova di moto accelerato, mentre è compatibile con un moto di tipo stazionario.

Nel presente lavoro si è però rinunciato ad analizzare il problema per via deterministica, preferendo in modo più agile l'istituzione di correlazioni empirico-probabilistiche.

Con riferimento ad un sito tenuto sotto osservazione è stato possibile correlare le piogge con la profondità del pelo libero della falda e quest'ultima con le velocità di spostamento. La procedura, che nel caso in esame ha dato risultati soddisfacenti, è di significativa utilità nella gestione di pendii per i quali si disponga di misure piezometriche e di spostamento per un congruo periodo di tempo.

Bibliografia

- BERTINI T., CUGUSI F., D'ELIA B., ROSSI-DORIA M. (1986) – *Lenti movimenti di versante nell'Abruzzo Adriatico: caratteri e criteri di stabilizzazione*. AGI, Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, pp. 91-100.
- CANUTI P., MARCUCCI E., TRASTULLI S., VENTURA P., VINCENTI G. (1986) – *Studi per la stabilizzazione della frana di Assisi*. A.G.I., Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, pp. 165-174.
- CRUDEN V.N., VARNES D.J. (1994). *Landslides Types and Processes*. In "Landslides: Investigation and Mitigation", Transportation research Board, National Academy of Sciences.

- HUNGR O. (1981) – *Dynamics of rock avalanches and other types of mass movements*. Ph.D. Thesis, University of Alberta.
- HUTCHINSON N.J. (1986) – *A sliding-consolidation model for flow slides*. Canadian Geotechnical Journal, vol. XXIII, n. 2, pp. 115-126.
- PEDROSA M.G.A., SOARES M.M., LACERDA W.A. (1988) – *Mechanism of movements in colluvial slopes in Rio de Janeiro*. Proc. V Int. Symp. on Landslides, Lausanne, vol. II, pp. 1211-1216.
- PELLEGRINO A. (1988) – *Misura dell'abbassamento della falda in presenza di aste drenanti*. Convegno C.N.R. sul tema "Cartografia e Monitoraggio", sessione Monitoraggio, Bologna pp. 157-166.
- PICARELLI L., RUSSO C., URCIUOLI G. (1995) – *Modeling earthflow movement based on experiences*. Proc. of the XI ECSMFE, Copenhagen, vol. VI, pp. 157-162.
- RUSSO C., URCIUOLI G. (1999) – *Influenza delle variazioni di pressioni neutre sugli spostamenti di frane lente*. Rivista Italiana di Geotecnica, vol. XXXIII, n. 1, pp. 47-55.
- TRÂN VÕ NIEM J., GUILLOX A., D'APOLITO P. (1988) – *Analyse et suivi d'un grand glissement de versant dans les Andes colombiennes*. Proc. V. Int. Symp. on Landslides, Lausanne, vol. I, pp. 783-788.
- URCIUOLI G. (1997) – *Studio delle falde in alcuni pendii instabili in Argille Varicolori*. Atti della Riunione annuale del G.N.C.S.I.G. del C.N.R., Roma (in press).
- VARNES D.J. (1978) – *Slope movements types and processes*. Landslides: Analysis and Control Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report.
- VOIGHT B. (1988) – *Materials science law applies to time forecasts of slope failure*. Proc. V Int. Symp. on Landslides, Lausanne, vol. III, pp 1471-1472.
- WILDBERGER A. (1988) – *The landslide of September 8th, 1986, near Giswil (Obwalden, Switzerland)*. Proc. V. Int. Symp. on Landslides, Lausanne, vol. II, pp. 1381-1384.

Prediction of slope movements by means of statistical analysis

Summary

In some cases, slopes are moving so slowly that infrastructures crossing them are not necessarily out of service. Nevertheless, it becomes essential to control the magnitude of the displacements to evaluate their admissibility.

To this aim, predictive methods allowing for the assessment of the expected velocity of displacement are particularly requested, especially if correlating it to some "triggering" factor under monitoring.

In this paper, a case-history concerning a gas pipeline crossing a slope having a seasonal movements of some cm/year due to rainfall regime is presented; finally the measured surface displacements, rainfall and pore pressure are used as a statistical tool for prediction.