EVOLUZIONE DINAMICA DELLA RUPE DI ROCCAMONTEPIANO (ABRUZZO): PARAMETRIZZAZIONE STATISTICA E MODELLAZIONE **3D**

CALISTA M., MANGIFESTA M., PASCULLI A. & SCIARRA N. Dipartimento di Scienze della Terra – Università di Chieti

RIASSUNTO

In questo lavoro si presenta uno studio sull'evoluzione cinematica di una placca di travertino che caratterizza il territorio comunale di Roccamontepiano. Innanzitutto è stato eseguito un rilevamento geologico di dettaglio dell'area, per evidenziare le principali unità litologiche presenti. Successivamente sono state eseguite indagini geoelettriche al fine di poter ricostruire i rapporti stratigrafici tra le formazioni. Sovrapponendo i dati del rilevamento geologico e quelli delle indagini geofisiche, è stato possibile individuare il modello fisico, sufficientemente approssimato, della placca di travertino. Oltre alle indagini di campagna, sono state eseguite analisi di laboratorio su campioni prelevati in sito allo scopo di stabilire le caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi.

Inoltre, per studiare l'evoluzione cinematica dell'area da un punto di vista numerico, è stato utilizzato un codice di calcolo tridimensionale alle differenze finite (FLAC^{3D}). In particolare è stata introdotta, mediante algoritmi statistici sviluppati da alcuni degli autori del presente articolo, la variabilità spaziale, dovuta alle eterogeneità di alcuni parametri.

Termini chiave: Abruzzo, modellazione numerica, frane, FLAC^{3D}.

ABSTRACT: Dynamic evolution of the Rupe di Roccamontepiano (Abruzzi): statistical parametrization and 3D modelling

In this job the cinematic evolution of a travertine plate, characterising the territory of Roccamontepiano (CH, Italy), has been studied. In order to specify the main lithological units of the entire area, the first step was a detailed geologic survey. The subsequent target was the reconstruction of stratigraphic relationships among the formations through geoelectrical surveying. Then, overlapping both the data of the first and of the second kind of surveying, an enough satisfactory physical model of the travertine plate was obtained. Besides, laboratory tests of in situ samples were carried out to define physic-mechanical parameters of lithotypes. Furthermore, a three dimensional, finite difference computer code (FLAC3D) was employed to analyse the plate cinematic evolution by a numerical point of view. In particular parameters spatial variability, due to heterogeneity, was introduced by statistical algorithms developed by some of the authors.

KEY WORDS: Abruzzi Region, numerical modelling, landslides, $Flac^{3D}$

INTRODUZIONE

L'area oggetto di studio è situata al confine tra due comuni della Regione Abruzzo, il paese di Roccamontepiano, in provincia di Chieti, e il paese di Serramonacesca, in provincia di Pescara.

Tale area si estende nella fascia pedemontana orientale del Massiccio della Maiella, è quasi interamente circondata da due fiumi, il Foro a sud e l'Alento a nordovest, nord. La caratteristica principale è data dalla presenza di un altopiano travertinoso, denominato Montepiano, che sovrasta e domina, sia topograficamente che morfologicamente, il succedersi dei rilievi collinari, che caratterizzano l'intero territorio (Fig. 1). L'altopiano, di forma subrettangolare allungato in direzione appenninica, presenta una lunghezza massima di circa 2.3 Km (in direzione NW – SE) e una larghezza massima di 700 m; è situato a quote comprese tra i 610 e i 650 m s.l.m. e si presenta debolmente inclinato verso NE.

I bordi di questa estesa placca di travertino sono interessati da fenomeni franosi diffusi, talora di grandi dimensioni e che, in passato, sono stati causa anche di eventi particolarmente calamitosi, come quello verificatosi nel giugno del 1765 che causò la distruzione dell'intero centro abitato. Di conseguenza il rilievo è circondato, quasi interamente, da corpi detritici di grandi dimensioni che caratterizzano buona parte del territorio meridionale del comune.

Il settore orientale, invece, è caratterizzato da blandi rilievi collinari costituiti prevalentemente da sedimenti argilloso-sabbiosi plio-pleistocenici.

GEOLOGIA

Per giungere ad un'analisi accurata della geologia dell'area è stato eseguito un rilevamento geologico di dettaglio in scala 1:5000 (Fig. 1).

I litotipi affioranti nella zona sono costituiti sia da termini marini che continentali (CRESCENTI *et alii*, 1987); in particolare troviamo:



Fig. 1 – Carta geologica dell'area di Montepiano: 1) Detriti di frana, 2) Travertini, 3) Limi argillosi (a) con intercalazioni sabbiose (b), 4) Serie della Maiella, 5) Lineazioni di frattura. *Geological map of Montepiano's area: 1) landslide detritus; 2) Travertine; 3) clayly lime (a) with sandy lens (b); 4) Maiella series; 5) fractures.*

Formazione Mutignano (Pliocene superiore)

Questa formazione affiora estesamente su tutto il territorio oggetto di studio. È rappresentata da argille grigio-azzurre in livelletti e strati centimetrici passanti verso l'alto a strati e banconi sabbiosi, anche dello spessore di alcuni metri. Questi affiorano nel versante nord-occidentale dell'altopiano di travertino e lungo la SS 539 in direzione di Serramonacesca e Manoppello nel versante sudorientale.

Sabbie e conglomerati continentali

Si tratta di una formazione continentale, di probabile origine fluviale. È visibile in affioramento solo in

corrispondenza della porzione basale della placca travertinosa, in particolare è stata osservata nel versante a NW e in quello a SE. Nel versante a SE la formazione è rappresentata da conglomerati eterometrici costituiti da ciottoli, ben arrotondati dalle dimensioni massime di circa 4 cm, con un grado di cementazione molto forte. Gli spessori massimi riscontrati in affioramento sono di circa 1.5-2 m. Al di sopra della facies conglomeratica è presente quella sabbiosa, di colore variabile dal rosso al grigio; al suo interno sono presenti ghiaie con dimensioni medie di 1-3 mm, a spigoli vivi o leggermente arrotondati. Lo spessore è, in questo caso, variabile (20-90 cm). Nel versante a NW il conglomerato è costituito da ciottoli più grandi rispetto all'altro versante, ben classati e poco cementati. La formazione sabbiosa sovrastante è qui costituita da sabbie di colore giallo ocra, con spessori di circa 2 m.

Travertini di Montepiano (Pleistocene medio)

Tali depositi costituiscono l'intero tavolato di Montepiano. Sono presenti diverse facies: travertini sabbiosi, travertini fitoclastici, travertini fitotermali. È difficile riuscire ad individuare una geometria precisa delle diverse facies; per questo l'aspetto complessivo è quello di una formazione estremamente disomogenea. Lo spessore del travertino si presenta notevolmente variabile, si passa da uno spessore minimo di 1 m nel versante occidentale, ad uno spessore massimo di circa 40 m nel versante nord-orientale.

Detriti di frana

Questi depositi, insieme con i depositi di Travertino caratterizzano l'intero settore meridionale del territorio comunale. Sono però estremamente ridotti e concentrati nel versante occidentale. La genesi di questi depositi è complessa in quanto deriva dalla sovrapposizione di corpi di frane avvenute in tempi diversi. Sono costituiti da un'associazione di frammenti lapidei eterogenei e caotici, con dimensioni anche di svariati metri cubi.

Il rilevamento di campagna è stato, inoltre, supportato dall'analisi fotogeologica che si è dimostrata particolarmente utile per l'individuazione e la classificazione di diversi elementi tettonici. Per l'individuazione e lo studio di questi sono stati utilizzati aerofotogrammi a scale differenti, in modo da ottenere una visione multiscalare dell'area e mettere in evidenza le caratteristiche peculiari delle principali discontinuità e fratture.

In particolare sono stati utilizzati i fotogrammi 8380 e 8382 della strisciata 14L del Volo Regione Abruzzo – CGR del 1986 in scala 1:33000 e i fotogrammi 5730 e 5731 della strisciata 14 del Volo Provincia di Pescara – SARA del 1993 alla scala 1:12.500.

Analizzando le foto aeree è stato possibile riscontrare la presenza di numerose lineazioni nella placca di travertino.

Dalla carta geologica di fig. 1 è possibile osservare che la famiglia principale di lineazioni è prevalentemente allineata in direzione NE-SW; esiste però, un'altra famiglia ad andamento NW-SE.

La zona più settentrionale della placca di travertino risulta maggiormente interessata da fratture, tanto che non

è stato possibile riprodurre in carta tutte quelle riconoscibili ma sono state riportate solo le principali. Queste non risultano parallele alle altre, ma le direzioni predominanti sono NNE-SSW e ENE-WSW.

Esistono, inoltre, anche altre discontinuità che interessano i bordi esterni del travertino e che non è stato possibile introdurre nella carta allegata per problemi di scala. In particolare nel bordo della placca situato a N-W sono state individuate diverse fratture ad andamento arcuato. Queste interessano l'intero spessore della placca di travertino isolando, così, un blocchi di grandi dimensioni (Fig. 2)

RICOSTRUZIONE DEL MODELLO FISICO

Il rilevamento di superficie ci ha permesso di evidenziare le principali unità caratterizzanti l'area, tuttavia non ci ha permesso di ricostruire i rapporti stratigrafici tra le varie formazioni. Tanto più che, essendo in presenza di depositi continentali, questi possono presentare grandi variabilità sia di geometria che di spessore.

Per ovviare a tale problema si è pensato di eseguire nell'area indagini geofisiche. In particolare è stata utilizzata la metodologia geoelettrica. A tal proposito sono stati eseguiti nell'area di Montepiano svariati Sondaggi Elettrici Verticali (SEV), realizzati con varie aperture interelettrodiche (Fig. 3) in modo da cercare di incontrare sempre il contatto tra le formazioni continentali e le argille sottostanti. Diversi problemi sono stati affrontati per la realizzazione dei SEV, sia per l'inaccessibilità dei luoghi sia per l'elevato contrasto di resistività tra i due materiali, che ha portato ad aumentare fino al massimo possibile l'apertura tra gli elettrodi di corrente. Inoltre, per poter analizzare anche le zone più esterne dell'altopiano sono stati eseguiti dei SEV con una disposizione tripolare degli elettrodi. I SEV sono stati tarati sulla base dei dati relativi ad alcuni sondaggi geologici a carotaggio continuo realizzati nell'area.

I risultati ottenuti dall'interpretazione di tutti i SEV eseguiti nell'area di Montepiano sono stati utilizzati per ricostruire la morfologia del tetto della formazione argillosa (Fig. 3).



Fig. 2 – Blocchi di grandi dimensioni relativi alla placca di travertino. *Large dimension blocks of travertine plate*

Dopo aver definito la geometria del modello e dopo aver generato una griglia il più possibile aderente con la realtà è stato necessario scegliere il modello costitutivo che meglio simulasse il comportamento dei litotipi presenti. Nel FLAC è prevista una notevole variabilità di modelli costitutivi, tuttavia nello studio dell'area di Montepiano, è stato utilizzato il modello plastico di Mohr-Coulomb. Utilizzando tale modello costitutivo occorre assegnare ad ogni litotipo alcune proprietà fisicomeccaniche, quali: densità, angolo di attrito, coesione, resistenza a trazione, modulo di compressibilità volumetrica e modulo di elasticità tangenziale, questi ultimi funzione del modulo elastico e del coefficiente di Poisson. La parametrizzazione dei valori è stata basata su numerevoli prove di laboratorio effettuate su campioni sia di travertino sia di argilla, appositamente prelevati al fine di poter elaborare una loro variabilità statistica (tab. 1).

Tab. 1 – Valori dei parametri fisico meccanici ricavati da prove di laboratorio. *Physical and mechanical parameters from laboratory tests*

	Travertino	Argilla
Densità (Kg/m ³)	2000 - 2400	2000 - 2100
Angolo di attrito (°)	35° - 45°	23° - 24°
Mod. Elastico (GPa)	4 - 10	0.05 - 0.36
Coesione (Kpa)	0 - 200	10 - 35

RICOSTRUZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Particolare attenzione è stata posta nella ricostruzione del modello tridimensionale dell'area oggetto di studio.

I dati a disposizione sono: la carta topografica a scala 1:5000, la carta geologica a scala 1:5000 (Fig. 1) e la carta relativa al tetto delle argille ricavata mediante le indagini geofisiche (Fig.3). La carta topografica è stata interamente digitalizzata ed i dati ottenuti sono stati elaborati con un codice di calcolo in grado di ricostruire, secondo un'interpolazione di tipo Kriging, modelli tridimensionali. Per ottenere il 3D è stata utilizzata una griglia di interpolazione piuttosto fitta, al fine di ottenere una maggiore precisione nella ricostruzione, costituita da maglie quadrate con lato di 3 m.

I risultati ottenuti sono congruenti con i dati originali della carta topografica. Il modello tridimensionale ricostruito è ben riconoscibile dalla fig. 4, dove le gradazioni di grigio e i giochi di luce ci permettono di avere un'idea della morfologia dell'area.

Dopo aver effettuato la ricostruzione stereoscopica tridimensionale dell'area, è stato ricostruito il modello fisico tridimensionale. Date le dimensioni del modello e la complessità litologica, si è ritenuto di dover semplificare il modello fisico considerando la presenza di due soli litotipi: i travertini, nei quali sono stati inglobati tutti i litotipi ad essi riferibili (di incrostazione, detritici, sabbie travertinose, ecc.), e le argille nelle quali sono state inglobate le coltri superficiali. Il passo successivo è stato quello di riprodurre le superfici di contatto tra le argille ed il travertino. Per fare questo è stata ricostruita la carta del top del substrato con i dati ottenuti dall'indagine geofisica. Nella fig. 5 viene riportata la restituzione stereoscopica del tetto della formazione argillosa per meglio visualizzare le morfologie relitte.



Fig. 3 – Ubicazione dei SEV con indicazione delle aperture interelettrodiche e ricostruzione del tetto delle argille mendiante interpolazione dei dati SEV. *SEV location with interelectrodes faults and clay top reconstruction through SEV data interpolation.*



Fig. 4 – Modello stereoscopico tridimensionale dell'area di Montepiano. *Tridimensional stereoscopic model of Montepiano area*

È stato già detto che i maggiori problemi legati alla stabilità dalla placca di travertino sono localizzati principalmente nel settore settentrionale. Per tale motivo, considerando anche le notevoli dimensioni dell'intera area studiata, si è pensato di suddividere il modello generale in due blocchi e di analizzarli separatamente. Osserviamo dalla fig. 6a le dimensioni e la morfologia relativa al settore settentrionale di Montepiano.

La figura riporta la griglia ricostruita, questa presenta una larghezza lungo l'asse x di 970 m ed una lunghezza lungo l'asse y di 1190 m.

2500 2000 1500 1000 500 500 1000

Fig. 5 – Modello stereoscopico tridimensionale del top della formazione argillosa. *Tridimensional stereoscopic model of the top of clay formation*

Per ricostruire la griglia da utilizzare nel codice di calcolo FLAC sono state utilizzate sezioni tra loro parallele e normali all'asse longitudinale della placca di travertino. Si è scelta una campionatura ogni 10 m per ovvi motivi di grandezza dell'algoritmo finale di calcolo. La nuova griglia, così ricostruita (Fig. 6b), presenta maglie con dimensioni 10m*10m lungo le direzioni x ed y, ed un'altezza variabile da circa 10 m in superficie fino a circa 40 m in profondità. Il *FLAC^{3D}* è un programma tridimensionale prodotto

Il *FLAC^{3D}* è un programma tridimensionale prodotto come un'estensione della versione bidimensionale per lo studio del comportamento di terreni secondo limiti e

condizioni applicate. Il terreno viene rappresentato secondo elementi poliedrici che costituiscono una griglia. La costruzione della griglia consiste nel connettere tra loro poliedri semplici e regolari a diversa dimensione tali da creare un modello geometrico complesso aderente al sistema da analizzare. Ciò nonostante, gli algoritmi intrinseci del codice di calcolo hanno rivelato una mancanza di flessibilità e di adeguatezza per la complessità delle caratteristiche geometriche della zona in esame, vista la presenza oltre che di un andamento topografico abbastanza complesso, anche di un contatto litologico argilla-travertino molto articolato. Questi problemi sono stati risolti compilando uno specifico programma scritto in linguaggio *FISH* (interno al *FLAC*^{3D}) in grado di rigenerare un modello di superficie tridimensionale. Il programma compilato ha come base di riferimento due blocchi di sezioni (x,z) perpendicolari all'asse longitudinale della placca di travertino, relative alla topografia e all'andamento del tetto delle argille.



Fig. 6 – Riproduzioni 3D della zona settentrionale dell'area studiata con modellazione numerica: a) modello ottenuto tramite interpolazione tipo Kriging dei dati topografici disponibili; b) modello ricavato dall'implementazione in linguaggio FISH dei dati ottenuti da (a) con indicate le sezioni riportate in fig. 10. 3D sketches of the northern area studied by numerical modeling: a) model obtained from Kriging interpolation of topographical data; b) model obtained from implementation by FISH language of data produced from (a) with indicated sections of fig. 10.

Il processo calcola in sequenza le coordinate spaziali x,y,z dei vertici di ogni singolo elemento volumetrico (otto per ogni poliedro), eseguendo una interpolazione lineare progressiva dei valori presenti nelle sezioni di riferimento più vicine.

Il risultato finale vede la realizzazione di una griglia tridimensionale perfettamente aderente alle condizioni topografiche e alle esigenze geologiche dell'area (fig. 6b).

VARIABILITÀ ED ETEROGENEITÀ SPAZIALE DEL SUOLO: CALCOLO DELLA DISTRIBUZIONE DEI PARAMETRI FISICI

La variabilità spaziale di un suolo comporta la necessità di una descrizione più accurata delle caratteristiche fisiche dei materiali che compongono i diversi strati. Usualmente a ciascun strato si associa un valore numerico medio del parametro fisico utilizzato, per esempio, nei modelli costitutivi. In condizioni di non linearità questo approccio semplificato potrebbe comportare anche una sottostima dei risultati ottenuti rispetto ai valori effettivi (KAGGWA, 2000). Pertanto, in letteratura, sono stati proposti diversi approcci stocastici per la distribuzione spaziale delle eterogeneità nei suoli. Tra questi si colloca anche quello introdotto da alcuni di noi (PASCULLI & SCIARRA, 2002°; 2002b) ed applicato in questo lavoro. Nei lavori citati si propone e si discute, anche con esempi, la seguente espressione:

$$Phys(x_g, y_g) = Phys_r(x_g, y_g) + + [\mu(x_g, y_g) - Phys_r(x_g, y_g)].$$

$$[mean + \sigma \cdot G_norm] \cdot e^{-\left[\frac{f(x_g, y_g)}{s}\right]^2}$$
(1)

dove $Phys(x_g, y_g)$ è il valore del parametro fisico nel punto di considerato coordinate (x_g, y_g) ; *Phys_r* (x_g, y_g) è un valore "estratto" in maniera random (o meglio pseudo-random), secondo la metodologia riportata in particolare in (PASCULLI & SCIARRA, 2002b), da un "ensemble" di numeri casuali appartenenti ad una statistica selezionata; $\mu(x_g, y_g)$ è il valore medio della "forzante stocastico deterministica"

$$\left[\frac{f(x_g, y_g)}{g}\right]^2$$

funzione del punto; $[mean + \sigma \cdot G_norm] \cdot e^{\lfloor s \rfloor}$ è un valore numerico puro che costituisce una perturbazione gaussiana (determinata dal termine G_{norm}) di media *mean*, deviazione standard σ e

fattore di localizzazione $e^{-\left[\frac{f(x_g, y_g)}{s}\right]^2}$. Il rapporto $\frac{f(x_g, y_g)}{s}$ indica di quanto il punto $P(x_g, y_g)$ "dista" dalla curva f(x, y).

Pertanto $Phys(x_g, y_g)$, $Phys_r(x_g, y_g)$ e $\mu(x_g, y_g)$ sono termini che descrivono grandezze fisiche, come per esempio la densità, il modulo di Young, l'angolo di attrito, l'indice dei vuoti. Potrebbero possedere, quindi, anche una dimensionalità, ma non necessariamente, infatti l'indice dei vuoti, per esempio, pur essendo un parametro fisico è adimensionale. Invece il termine [mean + $\sigma \cdot G$ _norm] è sempre un numero puro ed è legato alla distribuzione

gaussiana. Anche il termine $e^{-\left[\frac{f(x_g, y_g)}{s}\right]^2}$ è un numero puro, sempre positivo e minore o uguale ad uno. Il termine $\frac{f(x_g, y_g)}{s}$ è il rapporto tra due quantità geometriche omogenee e quindi è un numero puro. Le coordinate (x_g, y_g) sono espresse nell'unità di misura adottate per l'intera elaborazione numerica.

Nel presente lavoro non sono state considerate le "localizzazioni" per cui è stato posto $\frac{f(x_g, y_g)}{s} = 0.$

I materiali presi in considerazione sono stati essenzialmente il travertino e l'argilla. In entrambi i casi abbiamo supposto, sia per la caratterizzazione dell' insieme dei dati fisici random sia per la perturbazione stocastica, una distribuzione statistica gaussiana, generata ogni volta in modo indipendente.

A tale scopo è stato utilizzato l'algoritmo di Box G. E. P., Muller, M. E. 1958, introdotto nel FLAC3D mediante il linguaggio FISH.

L'algoritmo calcola distribuzione una standard normalizzata, ossia di media zero e deviazione standard pari ad uno:

• si estraggono da due ensemble, calcolati preventivamente con routines intrinseche al codice i due numeri casuali non correlati y1_casual e y2_casual appartenenti ad una statistica uniforme nell'intervallo (0,1);

 $G_norm = \sqrt{\left[-2 \cdot \ln(y1_casual)\right]} \cdot \cos(2\pi \cdot y2_casual).$

Infine si calcola la variabile casuale che appartiene ad una distribuzione gaussiana con media mean e deviazione standard σ :

$$V_{gauss}(x_g, y_g) = mean + \sigma \cdot G_norm$$
(2)

La variabile V gauss, come già discusso a riguardo della formula (1), può assumere il significato di un numero puro o di una grandezza fisica. Il valore di mean, come discuteremo, può variare anche con la profondità.

Il metodo dei "campi random con forzante stocastico deterministica" è stato applicato per la determinazione della variabilità spaziale di tutti i parametri richiesti del modello costitutivo utilizzato (densità, angolo di attrito, modulo elastico e coesione), utilizzando una funzione di controllo che rendesse congruenti tra loro i valori calcolati.

11 modello matematico numerico proposto in PASCULLI & SCIARRA (2002b) prevede l'estrazione random di un indice che individua un dato numerico appartenente all'ensemble relativo e la sua associazione ad un nodo geometrico individuato indipendentemente (ossia senza alcuna correlazione statistica), ma con la stessa tecnica. Nel presente lavoro i dati random dei parametri fisici sono stati associati in modo sequenziale (e non random) alle zone caratteristici della griglia numerica. Per il travertino, si è supposto un "campo stocastico deterministico" così debole da potersi considerare ininfluente sulla distribuzione spaziale dei valori di densità.

Dal punto di vista del modello utilizzato questa assunzione implica porre *mean* = 0. e σ = 0. nell'espressione (1). Ossia si considera solo il campo random senza alcuna "forzante" (PASCULLI & SCIARRA, 2002b).

Pertanto, da quanto discusso, dall'espressione (1) e dall'espressione (2) consegue:

$$Phys(x_g, y_g) \equiv Phys_r(x_g, y_g) \equiv V_gauss(x_g, y_g)$$
(3)

ossia in definitiva inserendo i valori numerici:

$$\rho(x_g, y_g) = 2200.+50. \cdot G_{norm}$$
(4)

dove $\rho(x_g, y_g)$ è espresso in $kg \cdot m^{-3}$.

Per l'argilla, invece, si è supposto che il valore della densità aumenti con la profondità con una "forzante stocastica deterministica".

La seguente espressione definisce il "campo random" associato alla densità con variabilità compresa tra i valori 2000 e 2100 in $kg \cdot m^{-3}$:

$$Phys_r(x_g, y_g) \equiv \rho \ (x_g, y_g) = 2050 + (12.5 \cdot G \text{ norm1}) \ (5)$$

Notiamo che porre $\sigma = 12.5$ implica, da ben note considerazioni statistiche su distribuzioni gaussiane, che oltre il 99.9% degli elementi appartenenti all'ensemble definito dalla (5) assume un valore compreso tra: $2050.-4\sigma \le \rho \le 2050.+4\sigma$ ossia il range di variabilità richiesto per la densità. Come "forzante stocastica deterministica" abbiamo considerato l'effetto del peso proprio del suolo.

Il termine $\mu(x_g, y_g)$, valore medio della "forzante stocastico deterministica", è stato costruito in modo tale da assumere il valore minimo nella zona superiore dello strato di argilla e, con variazione lineare, il valore massimo nella parte più bassa considerata nel modello (350 m s.l.m.). Consegue la seguente espressione:

$$\mu(x_g, y_g) = \frac{(2100. - 2000.)}{(y \max - 350.)} \cdot z + 2000.$$
(6)

dove z costituisce la quota all'interno dello strato: $0. \le z \le (y \max - 350.)$.

Il fattore random associato alla "forzante" è stato posto uguale a:

$$\varepsilon = 1. + 0.125 \cdot G _ norm2, \quad 0.4 \le \varepsilon \le 1.6 \tag{7}$$

Si sottolinea che i due insiemi di dati "pseudo random" G_norm1 e G_norm2 non sono correlati tra loro e sono stati ottenuti mediante l'utilizzo indipendente dei relativi algoritmi. Ovviamente esiste una probabilità finita che i valori numerici dei dati calcolati nella maniera precedentemente descritta siano fuori "range"; in questi rari casi abbiamo posto il valore pari al loro valore medio. Si ritiene opportuno, successivamente, svolgere calcoli parametrici per verificare gli effetti a grande scala della variabilità a scale inferiori di più grandezze fisiche.

ANALISI DEI RISULTATI

Le analisi svolte hanno permesso di ricostruire la cinematica evolutiva del sistema travertino-argilla. Si presentano in questo articolo, i risultati ottenuti relativamente alla parte settentrionale, che ha i maggiori problemi di frana e per la quale sono stati ricavati i dati più signifgicativi. La risposta del modello, visibile nelle successive figure allegate, propone l'andamento degli spostamenti dei nodi delle maglie lungo l'asse z (fig. 7), lungo l'asse y (fig. 8), gli incrementi di deformazione al taglio (fig. 9) e la localizzazione delle maglie soggette a possibile plasticizzazione (fig. 10).

In tutte le figure si osserva una zona (A) maggiormente interessata da fenomeni di abbassamento ed ubicata nelle aree attualmente soggette ad interventi di consolidamento consistenti in risagomature del versante. Le dislocazioni sono comunque concentrate nelle aree marginali della piattaforma di travertino. Un'altra zona (B) presenta anch'essa importanti segni di cedimento. Le zone interessate da attuale disturbo sono meglio evidenziate nella figura mostrante le massime deformazioni di taglio. Una ulteriore informazione può essere ricavata dalla fig. 9 in cui è rappresentata la tipologia di sforzo che procura o procurerebbe la rottura in quella particolare maglia; sono chiaramente visibili le zone alla sommità delle scarpate nella parte nord-est tutte interessate da fenomeni di trazione.

Si riporta, infine, in fig. 10 l'andamento dei vettori di spostamento lungo due sezioni (ubicate in fig. 6) per meglio visualizzare il comportamento nelle zone a più elevata pericolosità. Si nota chiaramente l'andamento rototraslativo delle parti più esterne.



Fig. 7 - Spostamenti lungo l'asse z. Displacements along z axis.



Fig. 8 - Spostamenti lungo l'asse y. Displacements along y axis.



Fig. 9 - Massimi shear strains. Maximun shear strain.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato presentato uno studio sull'evoluzione cinematica di una placca di travertino che caratterizza la sommità del territorio comunale di Roccamontepiano (Chieti). Sono state eseguite indagini geoelettriche al fine di poter ricostruire i rapporti stratigrafici tra le formazioni. Sovrapponendo i dati del rilevamento geologico e quelli delle indagini in situ, è stato possibile individuare il modello fisico e geometrico della placca di travertino.

Al fine di studiare l'evoluzione cinematica dell'area, è stato utilizzato un codice di calcolo tridimensionale alle differenze finite (FLAC^{3D}) introducendo, mediante algoritmi statistici, la variabilità spaziale dovuta alle eterogeneità, di alcuni parametri fisico-meccanici. I risultati confermano la precarietà di alcune zone al limite delle condizioni di rottura, in particolare i fronti NW e NE della placca di travertino. Inoltre, si ravvisano in sommità zone con stati di stress di tipo distensivo tipico di situazioni che precedono lo snervamento a trazione. Tali risultati possono essere utilizzati allo scopo di fornire, soprattutto, elementi di pericolosità dell'area. È possibile affermare che la situazione analizzata offre un quadro

molto chiaro dell'evoluzione futura della zona, permettendoci, quindi, anche l'eventuale possibilità di una zonazione .



Fig. 10 – Sezioni come da fig. 6 con riportati i vettori di spostamento. Sections from fig. 6 with explained displacements vectors.

RINGRAZIAMENTI

Lavoro stampato con fondi MURST-COFIN (prof. Uberto Crescenti) anno 2000. Si ringraziano la Dott.ssa Loredana Ferracuti ed il Sig. Gabriele Toro per la esecuzione delle prove di laboratorio indispensabili alla parametrizzazione dei terreni indagati.

BIBLIOGRAFIA

- Box G. E. P. & MULLER M. E. (1958) A note on generation of random normal deviates. Ann. Math. Statist. 29, 610-611
- CRESCENTI U., D'ALESSANDRO L. & GENEVOIS R. (1987) La ripa di Montepiano (Abruzzo): un primo esame delle caratteristiche geomorfologiche in rapporto alla stabilità. – Mem. Soc. Geol. It., **37**,
- FLAC^{3D} ITASCA CONSULTING GROUP, INC. 2000, 2.1 Release Manual. Minneapolis, Minnesota.
- KAGGWA W. S. (2000) Determination of spatial variability of soil design parameters and its significance in geotechnical engineering analyses - Developments in Theoretical Geomechanics, Smith &Carter (eds) Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 158 9 681-703

- PASCULLI A. & SCIARRA N. (2002a) A 2D Mathematical and Statistical Modelling of Soils Structures - Proceedings of 8th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, September 15-20 2002 Berlin Germany, **1**, 111-116
- PASCULLI A. & SCIARRA N. (2002b) Nodalizzazione ed interpolazione agli elementi finiti di eterogeneità strutturali in terreni granulari. Applicazione ai pendii- Atti Convegno AIGA-2003, 19-20 febbraio Chieti (in stampa)