

MODELLAZIONE NUMERICA DELLA FRANA DEL VAJONT SULLA BASE DI NUOVI DATI

Vengono esposti i risultati della modellazione numerica eseguita su due sezioni rappresentative della frana del Vajont utilizzando un codice di calcolo basato sul Metodo degli Elementi Distinti (UDEC).

Allo scopo di completare i dati geologici esistenti è stato preliminarmente eseguito uno studio geomeccanico dell'ammasso roccioso in frana ed al di fuori dell'area di frana.

Una completa revisione bibliografica ha permesso di evidenziare come siano stati affrontati, nel corso di quasi 30 anni, i molteplici aspetti che caratterizzano il fenomeno franoso: alcuni di questi, come quelli geologici e stratigrafici sono stati esaurientemente descritti, mentre altri risultano non ancora del tutto compresi: tra questi si possono ricordare i problemi relativi alla situazione idrogeologica del versante settentrionale del Monte Toc e quello fondamentale della comprensione del meccanismo di rottura.

La ricerca condotta ha come finalità una possibilmente nuova interpretazione della meccanica e della dinamica del complesso fenomeno franoso.

PAROLE CHIAVE: *Frana, meccanica delle rocce, modellazione numerica.*

KEY WORDS: *Landslide, geomechanics, numerical analysis.*

Introduzione

Il 9 ottobre 1963 circa 270 milioni di metri cubi di roccia si sono staccati dal versante settentrionale del Monte Toc e sono scivolati verso Nord per circa 300-400 m, coinvolgendo uno spessore complessivo di rocce di 250 m, appartenenti in prevalenza alla formazione del Calcare di Socchér, dell'Ammonitico Rosso e di Fonzaso. Entro quest'ultima formazione, sottilmente stratificata e caratterizzata dalla presenza di numerosi interstrati argillosi di spessore fino ai 10 cm, si colloca la parte principale della superficie di rottura. La massa ha raggiunto, con velocità altissime e con un movimento prevalentemente in blocco, il fondovalle del Vajont ed è risalita sul fianco destro della valle per alcune decine di metri. L'onda, che si è formata in seguito alla caduta della massa nel bacino artificiale si è propagata verso monte e verso valle fino alla quota massima di 935 m; parte dell'acqua ha poi superato la diga, precipitando verso Longarone. Nel disastro hanno perso la vita 2043 persone, più altre 45 in servizio alla diga.

La superficie di rottura, nella sua parte affiorante, è rappresentata da due estesi lastroni con immersione verso Nord e inclinazione di 30°-40° che tendono a seguire la stratificazione; tuttavia, andando da Ovest verso Est, la superficie di rottura taglia gli strati, risalendo la serie di circa 25-30 m attraverso dei gradini subverticali e di direzione variabile. La maggior parte della massa scivolata ha conservato nel complesso la forma e le strutture originarie presenti sul versante prima del franamento.

Lineamenti geologici

La serie stratigrafica presente sul versante settentrionale del Monte Toc è data da formazioni rocciose di età compresa tra il Trias superiore e il Paleocene inferiore. Il più antico termine affiorante è rappresentato dalla formazione della Dolomia Principale del Triassico superiore, costituita da dolomie massicce a Megalodonti, dolomie stromatolitiche e sottili livelli marnosi verdi. Lo spessore è di circa 1000 m. Alla Dolomia Principale fa seguito la formazione di Soverzene del Lias inferiore e medio p.p. rappresentata da micriti grigie o marroni, talvolta bituminose, in strati di 20-40 cm di spessore con giunti ondulati. Sono comuni interstrati marnosi centimetrici e letti o noduli di selce nera, lo spessore della formazione è di circa 600 m. Al Lias medio e superiore appartiene la formazione di Igne il cui spessore varia da 0 a 150 m; è costituita da alternanze cicliche di micriti compatte con giunti ondulati in strati da 5 a 10 cm, di scisti organici neri e di calcari nodulari verdi e rossi in facies di Ammonitico Rosso. Alla formazione di Igne fa seguito la formazione del Calcare del Vajont del Dogger, il cui spessore è circa 450 m. Si tratta di calcareniti oolitiche nocciola, massicce o stratificate in grossi banchi (50-100 cm di spessore). La serie prosegue con la Formazione di Fonzaso del Malm-Cretacico inf. di spessore variabile da 0 a 40 m, sottilmente stratificata (in strati di 5-10 cm) e costituita da calcari micritici bruni a selce bruna con interstrati marnoso-argillosi di colore verde con spessore dai 3 ai 10 cm. Ad essa fa seguito la Formazione di Socchèr del Cretacico inf.-

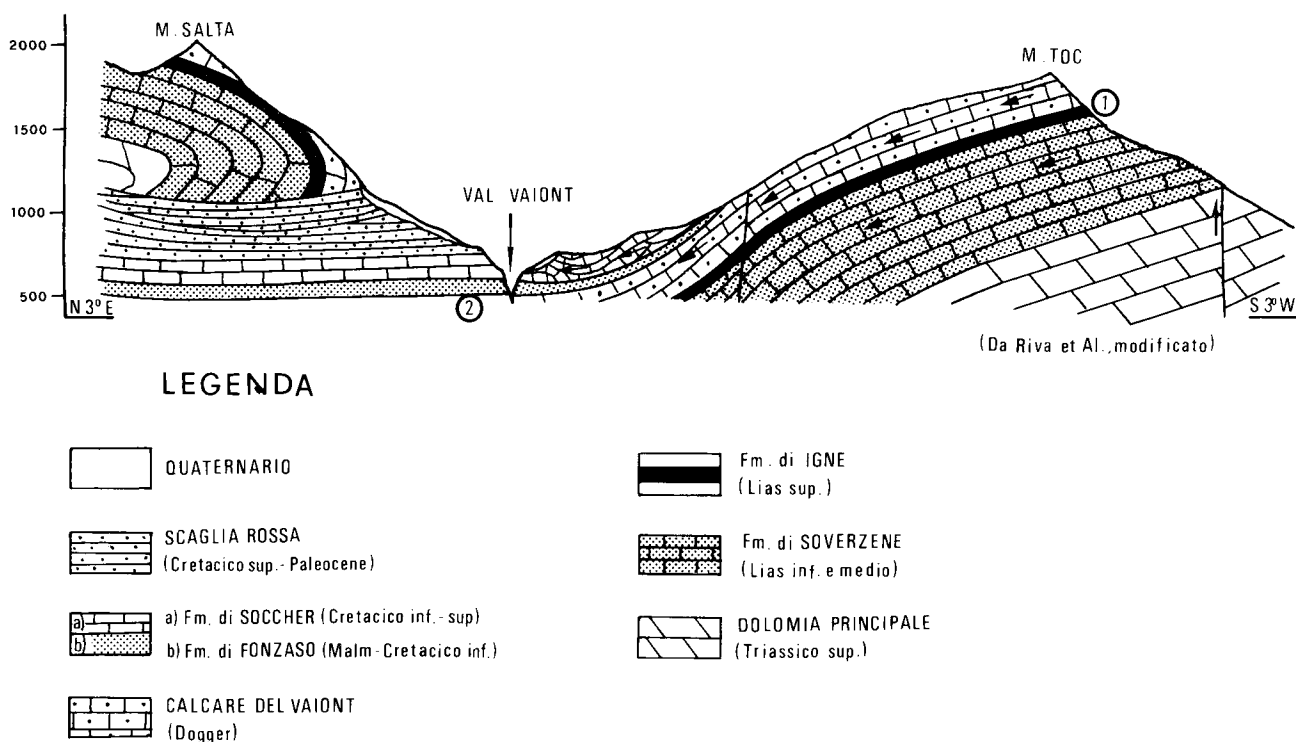


FIG. 1 — Sezione geologica della Val Vajont e schema dell'assetto idrogeologico del versante settentrionale del Monte Toc con indicazione delle principali linee di flusso. Con 1 e 2 sono indicati i livelli da scarsamente permeabili ad impermeabili (da Riva *et alii*, modificato).

— Geological section of the Vajont Valley and hydrogeological sketch, with the main flow directions. 1 and 2 are the levels from poorly permeable to impermeable (from Riva *et alii*, modified).

Cretacico sup., alternanza eterogenea di calcareniti, calcari micritici con selce dello stesso colore, con micriti marnose e marne grigie, rosse o verdastre. Lo spessore della formazione è di circa 150 m.

La struttura geologica della Val Vajont in corrispondenza della diga è riportata in Fig. 1. La Val Vajont è stata erosa lungo l'asse di una sinclinale (Sinclinale di Erto) avente direzione E-W ed immersione ad Est. Il versante sinistro è caratterizzato da una flessura monoclinale il cui asse è allineato subparallelamente al T. Vajont ed in cui gli strati descrivono una caratteristica forma a sedile. Sul versante destro si trova il lembo del Monte Borgà.

Analisi dei caratteri geomeccanici

Le analisi condotte preliminarmente alla modellazione numerica sono state finalizzate alla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso interessato dalla frana del Vajont. Il rilevamento geomeccanico è stato eseguito su 58 "scan lines" (Piteau, 1973) in tutti i termini della serie, dal Dogger al Cretacico inf., costituenti la struttura geologica sia all'interno del corpo di frana (superficie di rottura ed accumulo), sia al di fuori dell'area in frana; le caratteristiche rilevate sono quelle indicate dalle norme I.S.R.M. (1978).

Le misure rilevate lungo la superficie di rottura possono essere considerate rappresentative delle condizioni mesostrutturali dell'ammasso roccioso prefrana, mentre quelle rilevate nell'ammasso di frana riflettono quelle che sono state le direzioni del movimento ed indicano i processi deformativi della massa come risposta al movimento stesso. Il confronto di tali dati con quelli relativi a zone non coinvolte nel movimento franoso ha permesso di escludere l'esistenza di strutture peculiari e caratteristiche della zona di frana. L'elaborazione dei dati geomeccanici ha permesso di individuare le principali famiglie di discontinuità e di attribuire loro i valori di orientazione, di spaziatura, di lunghezza, di apertura, di resistenza alla compressione semplice delle pareti del giunto (JCS) e di angolo di attrito residuo dei giunti (Barton & Choubey, 1977). In particolare, il confronto degli stereodiagrammi cumulativi (Fig. 2) per le tre zone definite in precedenza, mostra tre famiglie a direzione NE-SW, NW-SE ed E-W, subverticali ed una quarta a direzione N-S meno inclinata. A scala mesoscopica il set a direzione N-S caratterizza i limiti occidentali ed orientali della frana mentre i sets a direzione NE-SW e NW-SE possono identificarsi con i gradini attraverso cui la superficie di rottura sale nella serie andando da Ovest verso Est.

Analisi del fenomeno franoso

Caratteristiche del Metodo degli Elementi Distinti e di UDEC

Il Metodo degli Elementi Distinti (Cundall, 1971) è un mezzo utilizzabile per l'analisi del comportamento meccanico di un sistema composto da blocchi discreti: l'ammasso roccioso è considerato quindi come un sistema discontinuo soggetto a condizioni quasi-statiche o dinamiche. La formulazione teorica del metodo è stata codificata per l'analisi di problemi bidimensionali nel programma di calcolo UDEC (Itasca, 1990) le cui principali caratteristiche sono:

a) il sistema è costituito da un insieme di blocchi che interagiscono lungo i contatti: i blocchi hanno la possibilità di compenetrarsi e di sovrapporsi;

b) le discontinuità sono considerate come zone di interazione tra i blocchi: è prescritto un modello di comportamento per tali interazioni;

c) il metodo utilizza un algoritmo esplicito nel tempo che permette grandi rotazioni e spostamenti e relazioni costitutive lineari o non-lineari sia per la matrice rocciosa, sia per le discontinuità;

d) il codice include la simulazione del flusso nelle fratture di un sistema costituito da blocchi impermeabili in condizioni di regime stazionario e transitorio.

Le equazioni fondamentali utilizzate dal codice sono la legge forza-spostamento che specifica le forze di interazione tra i blocchi e la legge del moto che impone al sistema forze non bilanciate. Gli spostamenti di ogni blocco vengono calcolati indipendentemente ad ogni sequenza di calcolo e, con l'iterazione di tale processo, si ottiene la configurazione all'equilibrio o alla rottura.

Modellazione del versante. La modellazione con UDEC è stata eseguita sulla base dei profili geologici 2 e 10A di Rossi & Semenza (1981) (Fig. 3), profili utilizzati da Hendron & Patton (1985) per analisi di stabilità, e sulla base dei dati geomeccanici elaborati e confrontati con quelli di Broili (1967).

La complessa successione stratigrafica è stata semplificata con la definizione di 4 livelli corrispondenti ad altrettanti insiemi litologici con caratteristiche fisico-meccaniche diverse. Ai materiali che costituiscono i blocchi è stato attribuito un comune comportamento di tipo elastico-lineare, ma diversi valori di densità, Modulo Elastico e angolo d'attrito. Per quanto riguarda le superfici di discontinuità è stato introdotto nel modello numerico un sistema di giunti subverticali definito dall'intersezione delle due famiglie (a direzione NE-SW e NW-SE) che rappresentano i gradini attraverso cui viene interrotta la continuità stratigrafica della superficie di rottura. Tali discontinuità sono state considerate, in questa prima analisi, continue (si estendono cioè dalla superficie topografica sino alla superficie di rottura) e con spaziatura ele-

vata (50 metri): tali approssimazioni da un lato non inducono modificazioni sostanziali nel comportamento deformativo dell'intero sistema e, dall'altro, implicano tempi di calcolo notevolmente ridotti. All'insieme delle discontinuità, subverticali e suborizzontali, che concorrono a formare l'ammasso roccioso è stato assegnato il criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Alla superficie di rottura sono state attribuite le caratteristiche fisico-meccaniche definite da Hendron & Patton (1985) ad eccezione del valore di angolo d'attrito per la sezione 10A. Si è infatti attribuito un valore di ϕ di 12° nella sezione 2 e di 21° nella sezione 10A con una relazione costitutiva che è in grado di simulare il meccanismo di rottura progressiva del giunto e che tiene conto del valore dell'angolo d'attrito, della rugosità del giunto, della dilatanza e delle rigidità normali e di taglio dei giunti (Continuously Yielding Joint Model).

Nell'eseguire la modellazione numerica lungo la sezione 10A (orientale) si è cercato di tenere conto della presenza della faglia diretta che limita ad Est la frana. Hendron e Patton hanno più volte sottolineato il ruolo che essa ha avuto per l'attivazione del movimento: la loro analisi di stabilità tridimensionale ha evidenziato come circa il 40% delle resistenze totali agenti sulla massa fosse fornito dalla parete che limita ad Est la frana ed a questo limite hanno attribuito un ϕ di 36° . Per tenere quindi conto dell'influenza di tale faglia il problema è stato trattato come lo scivolamento di un cuneo i cui due piani interni possedessero valori diversi dell'angolo d'attrito ($\phi = 36^\circ$ per il piano di faglia e $\phi = 12^\circ$ per il piano corrispondente alla superficie di rottura). L'attrito mobilizzato lungo la direzione del movimento, data dalle strie rilevate, è stato calcolato graficamente ed il valore così ottenuto ($\phi = 21^\circ$) è stato attribuito all'intera superficie di scivolamento. In tal modo si è, almeno in prima approssimazione, considerato l'effetto tridimensionale dovuto alla presenza della faglia, effetto che il codice di calcolo non ha la possibilità di simulare. Infine, sempre riguardo alla sezione 10A, sono state introdotte alcune superfici di rottura interne, secondo quanto ipotizzato da Rossi & Semenza (1990).

Sequenze di calcolo. A tale sistema, definito nelle sue caratteristiche geometriche e fisico-meccaniche, sono state successivamente imposte condizioni di flusso differenti e corrispondenti a valori di alta piovosità, alla presenza o meno del bacino (in regime stazionario o transitorio), alle variazioni del livello del lago. Le analisi sono state condotte in condizioni di flusso stazionario per permettere l'assestamento della massa nelle condizioni idrauliche imposte, ed in condizioni di flusso transitorio per tenere conto delle variazioni istantanee delle condizioni al contorno. L'analisi eseguita ha preso in considerazione 3 condizioni idrauliche corrispondenti a:

1) assenza del bacino artificiale;

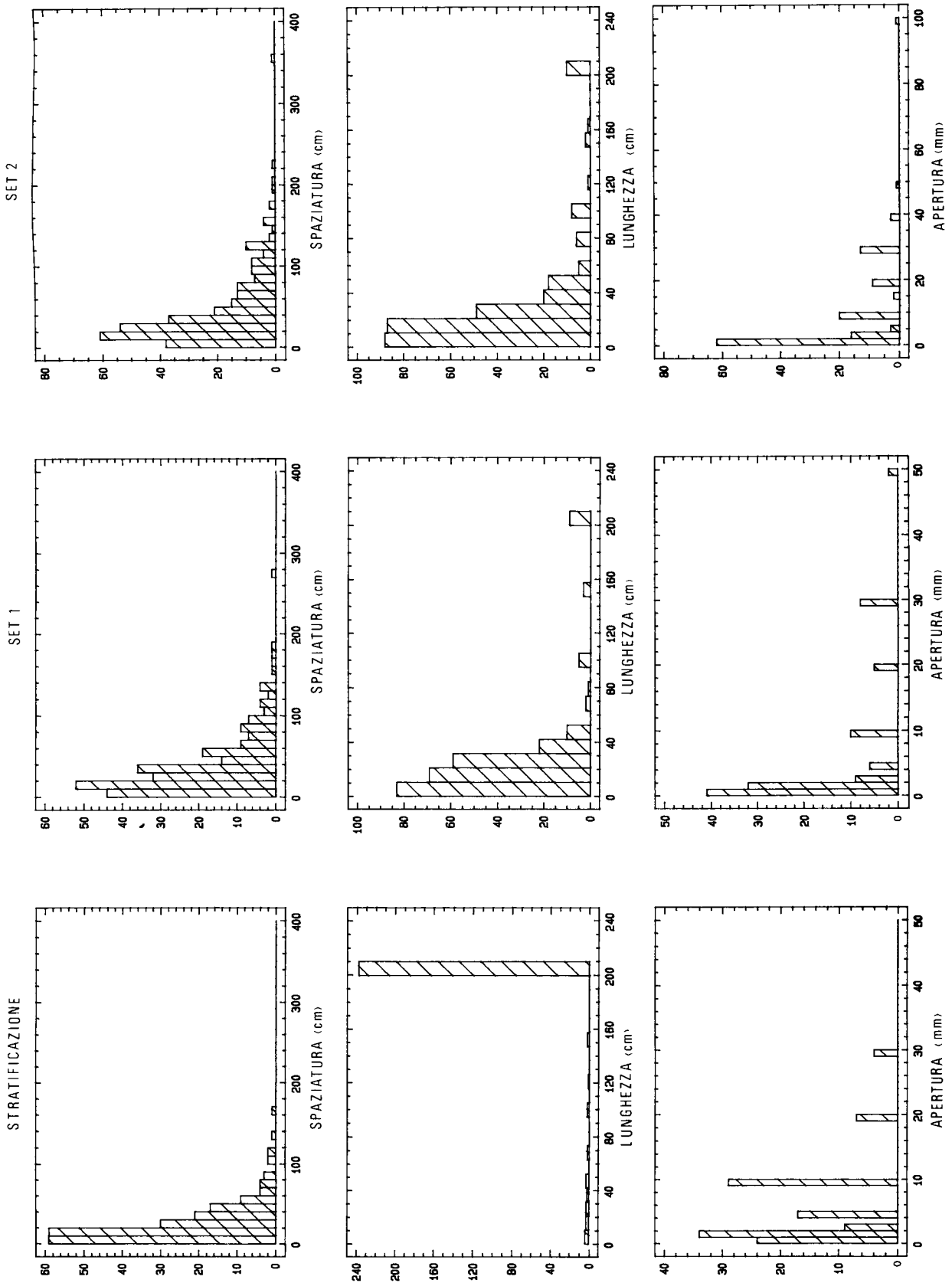


FIG. 2a — Istogrammi delle spaziatore, delle lunghezze e delle aperture delle principali famiglie di discontinuità rilevate. — Frequency histograms of spacing, length and aperture of the main sets.

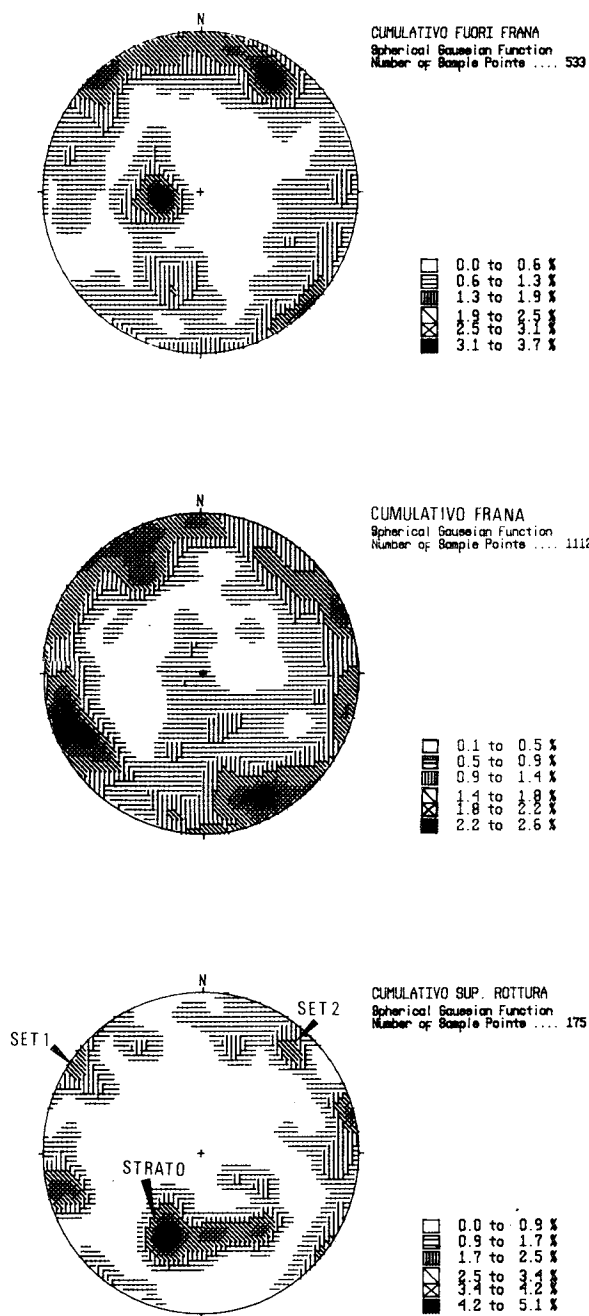


FIG. 2b — Proiezione stereografiche (reticolo equiareale, emisfero inferiore) dei dati strutturali.

— Equal area, lower hemisphere stereographic projection of structural data (bedding planes and joints).

- 2) bacino a quota 710 m (massimo livello di invaso);
- 3) bacino a quota 700 m (livello del lago al momento della frana).

La modellazione numerica ha cercato di seguire la "storia idraulica" della frana ripercorrendone i momenti principali (Semenza, 1965). Per tutti i casi considerati sono state assunte condizioni di falda nel ver-

sante corrispondenti a periodi di alta piovosità, secondo quanto calcolato da Hendron & Patton (1985).

Il comportamento deformativo della massa modellata sotto l'azione della gravità e delle condizioni di flusso imposte può essere seguito attraverso le "time histories" di punti particolarmente significativi. L'analisi dei percorsi deformativi, idraulici e tensionali ha mostrato il raggiungimento di condizioni critiche per la stabilità in entrambe le sezioni.

Sezione 2 (Occidentale)

Nella prima condizione di flusso, dopo aver permesso al versante una sorta di consolidazione sotto il proprio peso, la presenza di una falda ai massimi livelli produce un generale assestamento della struttura che risulta "sedersi" sulla preesistente superficie di rottura con spostamenti millimetrici. L'introduzione del lago alla quota 710 m e di una falda alla conseguente posizione induce nella massa spostamenti di un ordine di grandezza superiore rispetto alle condizioni iniziali: le deformazioni sono comunque limitate in valore assoluto ed il sistema, con la prosecuzione dei cicli di calcolo, mostra l'arrivo ad una condizione di equilibrio. Al successivo abbassamento del lago a quota 700 m, il sistema risponde istantaneamente con un forte incremento degli spostamenti in direzione orizzontale sia lungo la superficie di rottura, sia sulla superficie topografica; contemporaneamente, la massa in frana non risponde più alle sollecitazioni imposte deformandosi in modo continuo, ma accelera bruscamente raggiungendo successive posizioni di equilibrio metastabile. Infine, gli spostamenti di taglio dei giunti si manifestano lungo tutta la superficie di rottura e raggiungono, come valore massimo, quasi i 2 metri (Fig. 4). La massa si muove in blocco con fenomeni di apertura e chiusura dei giunti e rotazioni dei blocchi.

Al sistema che ha già raggiunto condizioni critiche per la stabilità sono state successivamente imposte condizioni al contorno di velocità costante che hanno reso graficamente evidente il collasso dell'intero versante (Fig. 5).

Sezione 10A (Orientale)

La modellazione di tale sezione ha mostrato una generale instabilità già nelle condizioni idrauliche precedenti alla realizzazione dell'invaso con spostamenti elevati distribuiti sia all'interno della massa, sia lungo la superficie di rottura. In base a questi risultati la sezione è stata successivamente modellata in assenza d'acqua: in queste condizioni la zona instabile è risultata limitata alla sola parte superficiale del versante. La riduzione delle resistenze disponibili lungo la superficie di rottura preesistente ed il raggiungimento

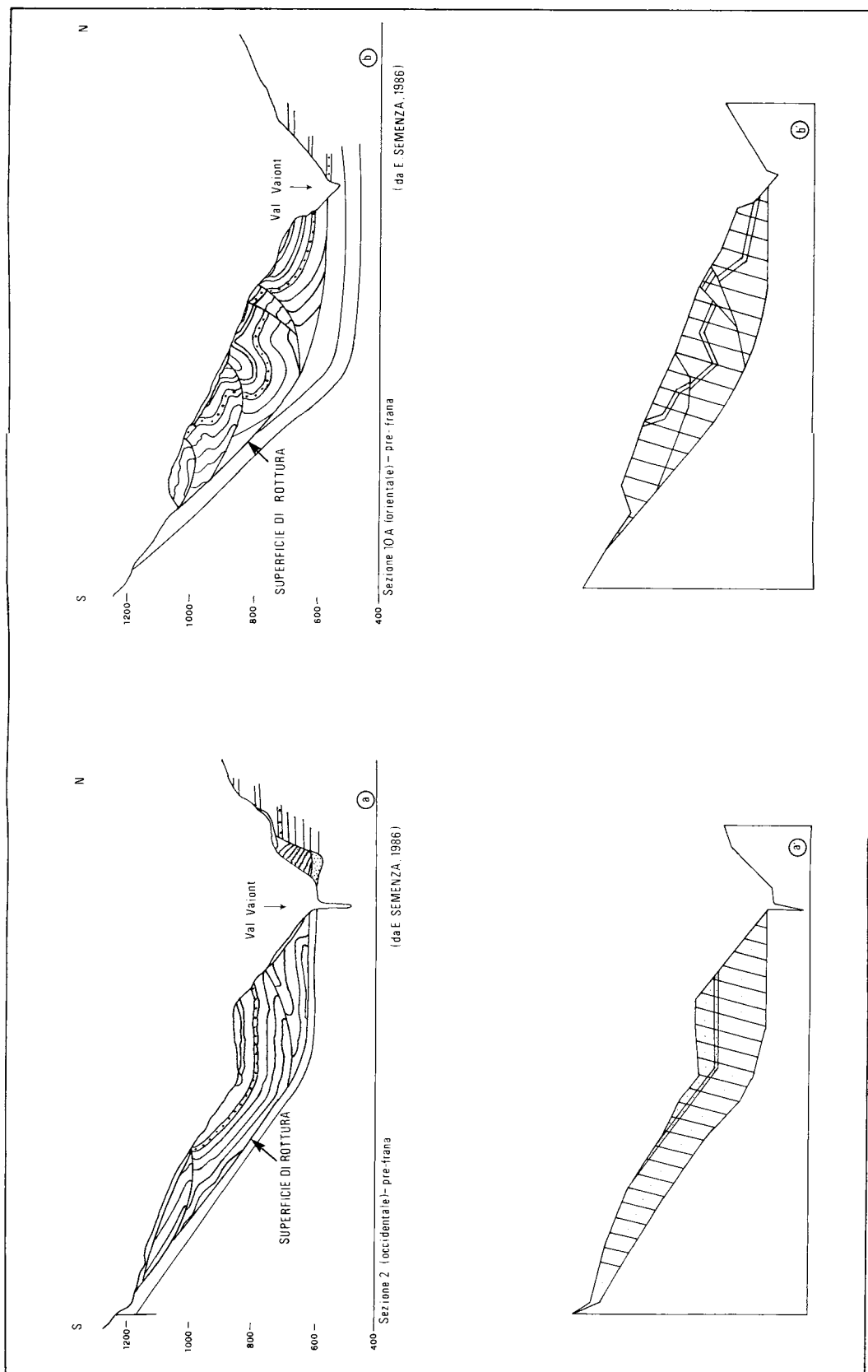


FIG. 3 — Profili geologici e corrispondenti sezioni modellate per l'analisi.

— Geological cross sections and corresponding modelled sections.

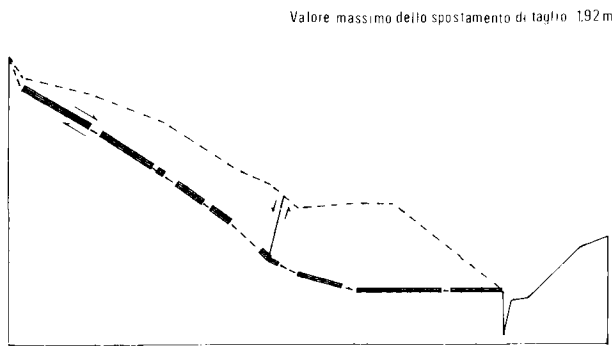


FIG. 4 — Sezione 2: spostamenti di taglio nei giunti.

— Section 2: joint shear displacements.

delle condizioni di instabilità risultano quindi imputabili alla presenza dell'acqua. Tuttavia, i carichi idraulici considerati e coerenti con quelli applicati alla sezione 2, inducono in questa parte di versante deformazioni e spostamenti non compatibili con gli eventi reali: si è quindi riconsiderato il modello idrogeologico dell'intera struttura del Monte Toc.

Considerazioni conclusive

Dall'esame delle caratteristiche di permeabilità attribuibili alle differenti formazioni, risulta che possono esistere almeno tre differenti falde e cioè che la struttura del Monte Toc costituisce verosimilmente un multiacquifero: le possibili direzioni di flusso sono riportate in Fig. 1. In tale sezione si può osservare che la base della successione stratigrafica, immergente verso NE nella realtà, è formata da materiali permeabili (Dolomia Principale e Form. di Soverzene) costituenti un acquifero la cui alimentazione avviene per

infiltrazione dal versante meridionale del Monte Toc. Tale acquifero è limitato al tetto da livelli di micriti e di scisti a permeabilità ridotta (Form. di Igne) che rappresentano il letto dell'acquifero contenuto nei sovrastanti Calcari del Vajont ed alimentato dall'intero versante settentrionale del Monte Toc sin praticamente al coronamento della frana. Quest'ultimo acquifero, in relazione all'assetto strutturale ed alle quote delle zone di alimentazione, può anche assumere una condizione confinata al di sotto dei livelli impermeabili della Form. di Fonzaso al cui interno si pone gran parte della superficie di scivolamento della frana. Il corpo di frana infine, viene a rappresentare un altro possibile acquifero, isolato dal sottostante dai livelli impermeabili della Form. di Fonzaso e contenuto principalmente nei livelli più permeabili della Form. di Socchér, ma che può essere considerato unico, visto l'elevato grado di fratturazione conseguente al movimento franoso preistorico. Per quanto riguarda quindi, le pressioni idrauliche da considerare per l'analisi del fenomeno di instabilità del 1963 è evidente che debba essere considerato solo quest'ultimo acquifero, gli altri non avendo molto probabilmente nessuna connessione diretta con il corpo di frana.

Se ora si considera l'estensione dell'ammasso roccioso in frana nella direzione E-W, la situazione precedentemente descritta non può essere riportata similmente nelle varie sezioni trasversali (ed in particolare nella sezione 2 e 10A considerate) per le differenti condizioni idrauliche al contorno esistenti sul lato Est e sul lato Ovest dello stesso corpo di frana. In effetti verso Oriente la faglia che costituisce il lato destro della frana, dato il suo carattere prevalentemente trascorrente, può essere considerata una struttura drenante di collegamento con i livelli permeabili sottostanti la base impermeabile (Form. di Fonzaso). Inoltre, si deve considerare che ad Est della faglia si trova sempre la Form. di Socchér, non coinvolta dal feno-

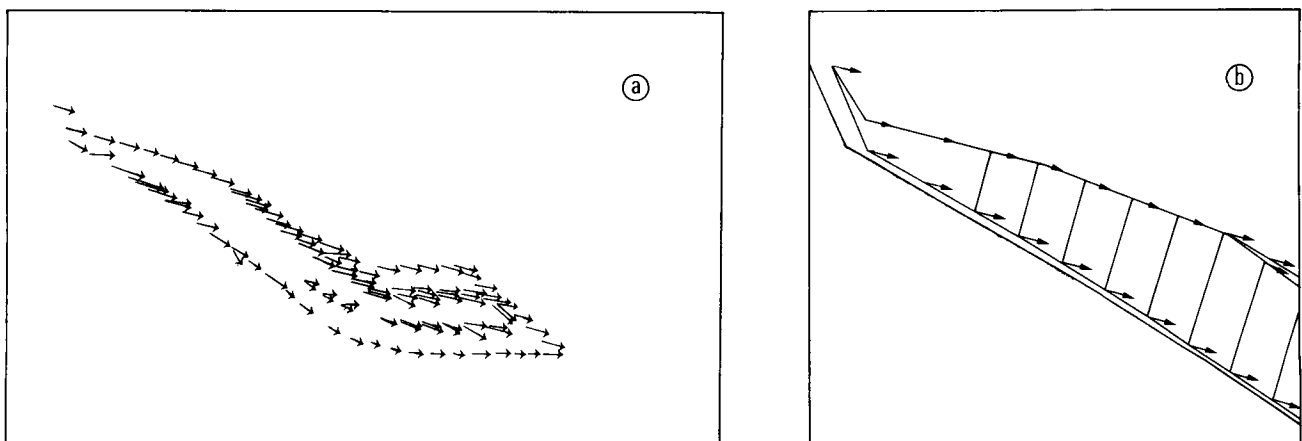


FIG. 5 — Sezione 2: a) vettori spostamento risultanti dall'imposizione di velocità al contorno; b) particolare della parte alta della frana.

— Section 2: a) displacement vectors due to velocity boundary conditions; b) a detail of the upper part of the slide mass.

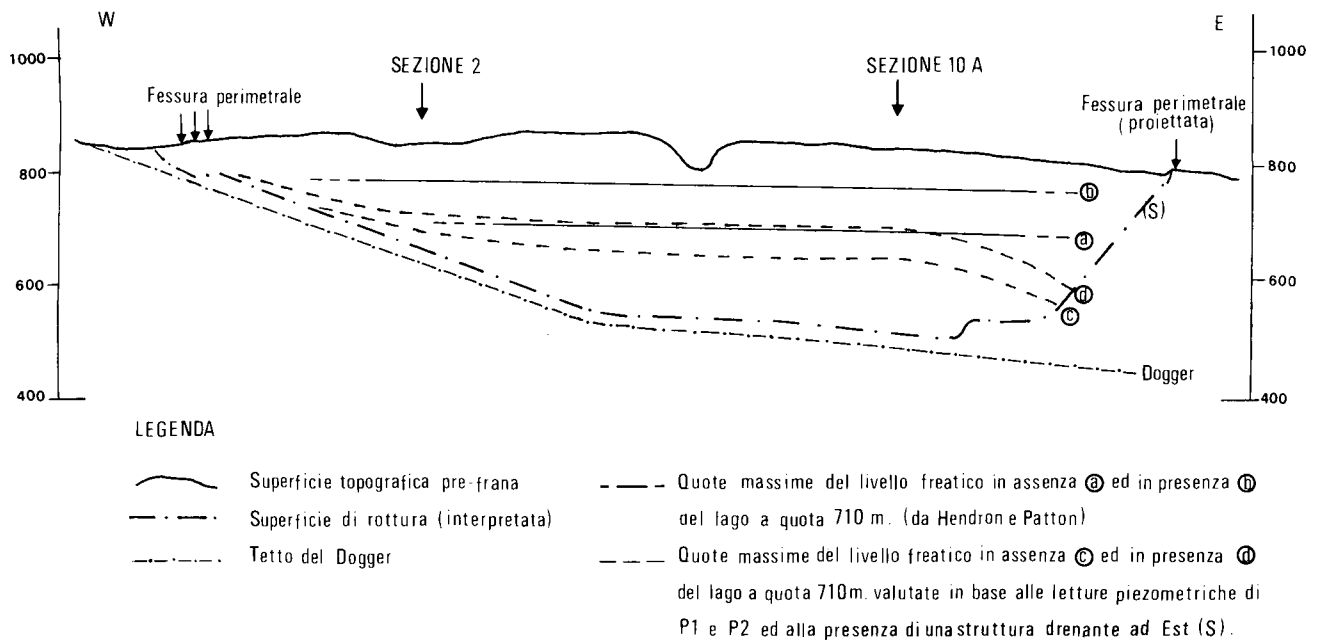


FIG. 6 — Sezione E-W: profilo topografico pre-frana con indicazione dei livelli freatici valutati da Hendron & Patton in assenza (a) ed in presenza (b) del lago a quota 710 m e dei massimi probabili livelli freatici corrispondenti alle due precedenti condizioni (c e d) valutati in base alle letture piezometriche di P1 e P2 ed alla presenza di una struttura drenante ad Est.

— Section E-W: pre-landslide section with maximum phreatic levels (Hendron & Patton) without (a) and in presence (b) of the basin at 710 m and with probable maximum phreatic levels at the same conditions (c and d) but obtained from the data of the two piezometers P1 and P2 and on the presence of a drained structure at East.

meno franoso e quindi con caratteristiche di permeabilità relativamente mediocri, almeno nella direzione ortogonale alla stratificazione. La faglia costituisce quindi un limite di permeabilità ma solo nella parte corrispondente allo "schienale", mentre in corrispondenza del "sedile", il corpo di frana è a contatto con una parte della Form. di Socchér costituita da micriti e calcareniti, caratterizzata quindi da permeabilità relativamente più elevate. Da un punto di vista generale quindi la falda contenuta nel corpo di frana presentava una pendenza complessiva verso NE (corrispondente alla giacitura della stratificazione) ma, avvicinandosi al suo lato destro, doveva inflettersi verso Est con una progressiva ed accentuata diminuzione delle quote piezometriche.

In conclusione, facendo anche riferimento alla Fig. 6, i livelli freatici considerati da Hendron & Patton in assenza ed in presenza dell'invaso, non sembrano corrispondere alla situazione reale effettivamente presente prima ed al momento del fenomeno franoso: essi sono infatti orizzontali nella sezione riportata, mentre avrebbero dovuto presentare un progressivo incremento dei gradienti verso Est a partire almeno dalla posizione della sezione 10A. Inoltre, si deve sottolineare che Hendron & Patton hanno artificiosamente incrementato le quote dei livelli piezometrici considerando la massima differenza di quota piezometrica registrata tra i piezometri P1 e P3 ed il P2. Se

invece si considerano effettive le letture di P1 e P3, la configurazione della falda nella sezione di Fig. 6, sempre considerando la presenza o meno dell'invaso e delle strutture drenanti ad Est, risulta essere a quote molto più basse da Ovest sino alla sezione 10A ed ancora più basse tra la sezione 10A ed il limite destro del corpo di frana.

Sulla base di questa ricostruzione della situazione idrogeologica presente possono trovare una giustificazione i risultati ottenuti dall'analisi della sezione 10A in presenza dei livelli freatici considerati. Infatti, il livello freatico minimo considerato nell'analisi corrisponde in verità ai massimi livelli che la falda avrebbe potuto raggiungere in presenza del lago a quota 710 m, mentre in assenza del lago le massime quote piezometriche inducevano pressioni dell'acqua sulla superficie di rottura notevolmente più basse. È quindi concepibile che prima della realizzazione dell'invaso in tutto il settore di frana tra la sezione 10A ed il suo lato destro si sviluppasse sul piano di scivolamento pressioni estremamente modeste e soprattutto limitate al sedile della frana, risultando pertanto condizioni generali di stabilità per l'intera massa. L'innalzamento dell'acqua nell'invaso comporta una condizione critica senza che vi sia la necessità di considerare livelli dell'acqua particolarmente ed artificialmente elevati come proposto da Hendron & Patton. Se queste considerazioni, relative alla sezione 10A, si riportano alla

sezione 2, la dinamica osservata del fenomeno franoso appare più comprensibile. In effetti le condizioni di stabilità della sezione 2 in connessione con il minimo livello della falda considerato (corrispondente in effetti ai massimi livelli possibili) risultano dall'analisi alquanto buone e quindi è stata la instabilità del settore orientale del corpo di frana a provocare la concomitante o immediatamente successiva instabilità del settore occidentale.

L'ipotesi sopra descritta, sulle condizioni idrogeologiche esistenti, pur se più aderenti alla realtà geologica ed ai dati piezometrici disponibili, necessiterebbe di una conferma tramite un'indagine sperimentale diretta delle caratteristiche di permeabilità delle differenti formazioni presenti, coinvolte e non nel fenomeno, e la ricostruzione, almeno teorica, della falda freatica contenuta nel corpo di frana prima dell'evento disastroso dell'ottobre 1963.

SUMMARY

A new interpretation of the composite aspects characterizing the Vajont landslide is presented. We focus on the results obtained by numerical modelling applied to two representative sections of the Vajont landslide (Fig. 3). Processing routines based on UDEC have been performed. In order to complement the geological data a geomechanical analysis has been carried out both within and outside the landslide area (Fig. 2). A complete bibliographic study led to

the identification of the various features characterizing this landslide. Among these the geological and stratigraphic ones are fully described. Some questions still remain mainly regarding the mechanism of failure and the hydrogeological framework of the northern side of Mt. Toc.

Manoscritto presentato il 28 ottobre 1992.

BIBLIOGRAFIA

- BARTON N. & CHOUBEY V. (1977) - The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, **10**: 1-54.
- BROILI L. (1967) - New Knowledge on the Geomorphology of the Vajont Slide Slip Surface. *Rock Mechanics*, **5** (1): 38-88.
- CUNDALL P.A. (1971) - A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. *Proc. Int. Symp. on Rock Fractures*, **2-8**, Nancy.
- HENDRON A.J. & PATTON F.D. (1985) - The Vajont Slide, a geotechnical analysis based on new geological observations of the failure surface, *Technical Report GL-85*, **5**, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- I.S.R.M. (1978) - Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **16**: 195-214.
- ITASCA CONS. GROUP. (1990) - UDEC: Universal Distinct Element Code (Version ICG 1.6), (I-II). *Itasca Cons. Group. Minneapolis*, Minnesota.
- PITEAU D.R. (1973) - Characterizing and extrapolating rock joint properties in engineering practise. *Rock Mechanics*, **2**: 5-31.
- RIVA M., BESIO M., MASETTI D., ROCCATI F., SAPIGNI M. & SEMENZA E. (1990) - Geologia delle valli Vajont e Gallina (Dolomiti Orientali). *Ann. Sc. della Terra, Univ. di Ferrara*, **2** (4): 53-76.
- ROSSI D. & SEMENZA E. (1981) - Carte geologiche del versante settentrionale del Monte Toc e zone limitrofe, prima e dopo il fenomeno di scivolamento del 9 Ottobre 1963, scala 1:5000. *Ist. Geologia Univ. Ferrara*, Ferrara.
- SEMEZZA E. (1965) - Sintesi degli studi geologici sulla frana del Vajont dal 1959 al 1964. *Mem. Museo Tridentino di Sc. Naturali*, **A.XXIX-XXX**, **16** (1): 1-52, Trento.