

MACEO-GIOVANNI ANGELI,  
PAOLO GASPARETTO, ALESSANDRO PASUTO, SANDRO SILVANO

---

ANALISI DI UN CASO DI FRANA  
IN MATERIALI MORENICI  
(VAL FIORENTINA, BELLUNO)

---

*(con 34 figure e 2 tabelle)*

---



MACEO-GIOVANNI ANGELI \*,  
PAOLO GASPARETTO \*\*, ALESSANDRO PASUTO \*\*, SANDRO SILVANO \*\*

## ANALISI DI UN CASO DI FRANA IN MATERIALI MORENICI (VAL FIORENTINA, BELLUNO)

### INDICE

ABSTRACT . . . . .	129
RIASSUNTO . . . . .	129
INTRODUZIONE . . . . .	129
UBICAZIONE GEOGRAFICA E CLIMA . . . . .	130
INQUADRAMENTO GEOLOGICO E MORFOLOGICO . . . . .	133
NOTIZIE STORICHE E SCHEMA EVOLUTIVO DEL MOVIMENTO FRANOSO . . . . .	135
INDAGINI GEOGNOSTICHE . . . . .	139
CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DEI TERRENI . . . . .	142
LA STRUMENTAZIONE DI CONTROLLO DEL PENDIO . . . . .	142
RILIEVI PIEZOMETRICI . . . . .	145
RILIEVI TOPOGRAFICI . . . . .	145
RILIEVI INCLINOMETRICI . . . . .	146
ANALISI E DISCUSSIONE DELLE SITUAZIONI CRITICHE REGISTRATE . . . . .	147
VERIFICHE DI STABILITÀ . . . . .	151
CONCLUSIONI . . . . .	152
RINGRAZIAMENTI . . . . .	153
BIBLIOGRAFIA . . . . .	154

*Key words:* Landslide, monitoring, survey.

### ABSTRACT

This paper presents the results of geological and geotechnical studies carried out on a case of landslide affecting a slope of morainic materials. The surveys began in 1981 and were kept on till 24<sup>th</sup> April 1988, which is the date of the complete landslide collapse. The paper also deals with the landslide monitoring carried out by means of an automatic recording system.

### RIASSUNTO

La presente nota riguarda gli studi geologici e geotecnici condotti su un caso di frana in materiali morenici. Tali studi, iniziati nel 1981, proseguirono sino al 24 aprile del 1988, data del definitivo collasso. L'utilizzo di un sistema automatico per la registrazione dei dati ha permesso di seguire tutte le fasi dell'evoluzione del fenomeno franoso.

### INTRODUZIONE

Nell'ambito di una ricerca sulle condizioni di dissesto idrogeologico della Val Fiorentina, e più in generale del bacino idrografico del torrente Cordevole (Provincia di Belluno), è stato condotto uno studio di dettaglio su un caso di frana soggetta a riattivazioni periodiche del movimento (ANGELI *et al.*, 1984; ANGELI e SILVANO, 1987).

L'area di frana è localizzata in prossimità di Passo Giau, lungo l'asta del torrente Codalonga, alla confluenza con il torrente Zonia. Il fenomeno interessava un cordone morenico che tuttora costituisce lo spartiacque fisico tra i bacini dei due torrenti, nonostante che il collasso del pendio

\* CNR - IRPI, Località Madonna Alta, I-06100 PERUGIA (Italia).

\*\* CNR - Istituto di Geologia Applicata - Corso Stati Uniti 4, I-35020 PADOVA (Italia).

(avvenuto nell'aprile 1988) ne abbia notevolmente ridotto le dimensioni.

Già dal primo sopralluogo effettuato all'inizio del 1981 la frana si presentava come un caso di "frana composta", caratterizzata da una estesa area di *graben* nella parte sommitale e da un movimento di traslazione della massa principale, in accordo con la classificazione di SKEMPTON e HUTCHINSON (1969).

Da informazioni raccolte sembra che il fenomeno sia stato innescato dall'erosione al piede operata dal torrente Codalonga durante la disastrosa alluvione del novembre 1966.

Allo scopo di interpretare correttamente i fenomeni di riattivazione periodica di questo caso di frana tipologicamente ben definito e al fine di creare un "laboratorio *in situ*" per la sperimentazione di nuove soluzioni tecnologiche, si stabilì di installare una adeguata strumentazione di controllo.

Alla fine del 1982 furono eseguiti i primi sondaggi geognostici equipaggiati con tubi inclinometrici e celle piezometriche di tipo Casagrande. Contemporaneamente fu installato un pluviografo e vennero ubicati alcuni caposaldi per il rilievo topografico degli spostamenti.

I dati raccolti in 4 anni di osservazioni evidenziarono che i movimenti della frana avvenivano principalmente nel periodo primaverile, in occasione dello scioglimento della neve (ANGELI *et al.*, 1988).

L'andamento intermittente dei movimenti pose il problema del rilevamento dei dati ad intervalli di campionamento adeguati alla scala temporale dei fenomeni.

L'installazione nell'autunno del 1986 di un sistema automatico per l'acquisizione dei dati con possibilità di elevate frequenze di campionamento fornì la soluzione del problema (ANGELI, 1987). Infatti il sistema adottato, oltre a consentire la registrazione dell'andamento temporale dei movimenti in relazione a rapide variazioni delle condizioni idrauliche nel corpo di frana, permise di seguire in maniera completa l'evoluzione dell'evento di collasso avvenuto tra il 22 e il 24 aprile 1988 (ANGELI *et al.*, 1989).

Il presente lavoro riporta in dettaglio le varie fasi dello studio, dalle prime indagini eseguite alla definizione del meccanismo di frana.

## UBICAZIONE GEOGRAFICA E CLIMA

L'area in esame è situata all'interno della regione dolomitica orientale a circa 20 Km da Cortina d'Ampezzo in prossimità della strada statale 638 del Passo Giau (Fig. 1). Essa ricade nei territori comunali di Selva di Cadore e Colle S. Lucia (BL).

La frana, altimetricamente compresa tra le isoipse 1560 e 1650, si sviluppava alla confluenza del torrente Zonia nel Codalonga (Figg. 2, 3), interessando un apparato morenico laterale destro e

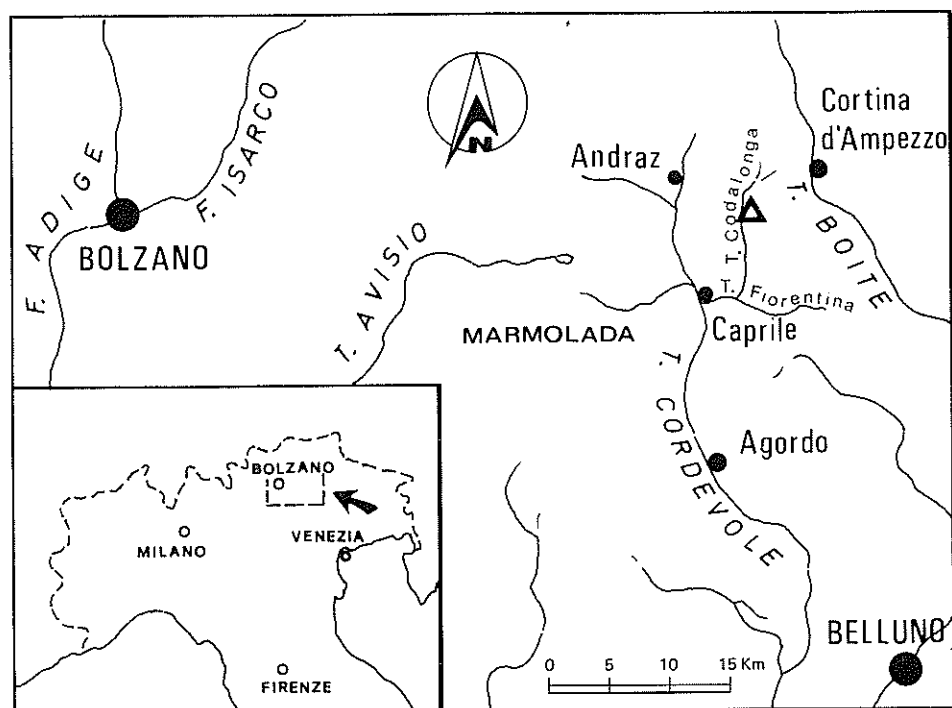


FIG. 1 - Inquadramento geografico e ubicazione dell'area in studio (Δ).

frontale, attribuibile al ghiacciaio che occupava la valle del torrente Zonia durante le fasi di espansione stadiali.

Dal punto di vista idrografico l'area in esame fa parte del bacino del torrente Fiorentina, affluente di sinistra del torrente Cordevole (Fig. 1).

Allo scopo di caratterizzare l'andamento climatico dell'area sono stati utilizzati dati relativi ad alcune stazioni meteorologiche presenti nell'alto bacino del Cordevole.

L'esame comparato dei dati ha rivelato la sostanziale omogeneità della distribuzione spaziale e temporale delle precipitazioni di lunga durata, particolarmente per quanto riguarda il periodo autunnale. Tale esame ha però anche mostrato che lo spessore del manto nevoso varia sensibilmente con la quota delle stazioni considerate.

Quest'ultimo fatto ha suggerito di assumere come rappresentativa dell'andamento climatico dell'area in esame la stazione di Andraz che, oltre

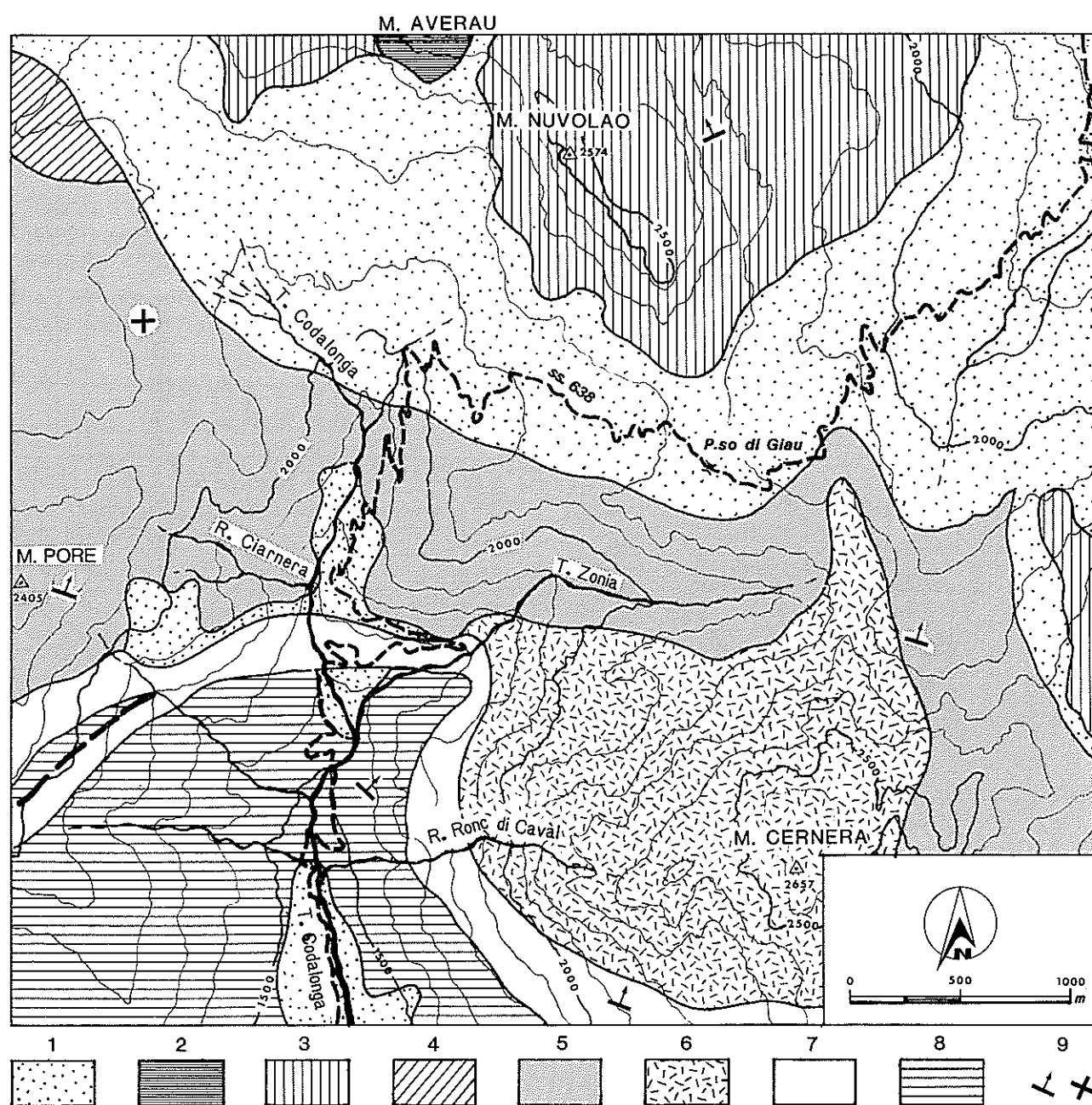


FIG. 2 - Schema geologico del bacino del torrente Codalunga: 1) Depositi quaternari: morene, detriti di falda e di frana; 2) Dolomia Principale (Norico); 3) Dolomia dello Sciliar (Carnico); 4) Formazione di S. Cassiano (Carnico); 5) Formazione di Wengen *anct.* (Ladinico-Carnico); 6) Formazione di Livinallongo (Ladinico); 7) Calcarei e dolomie (Anisico); 8) Formazione di Werfen (Scitico); 9) Giacitura degli strati.

ad essere posta nella stessa fascia altimetrica (1520 m s.l.m.), dispone di un periodo di osservazioni sufficientemente ampio (1925-1983).

La tabella 1 riassume le caratteristiche delle precipitazioni. L'esame dei dati evidenzia l'ampia variabilità delle precipitazioni calcolate su base annua. Lo spostamento del loro valore medio verso il minimo denuncia che la frequenza di annate con precipitazioni elevate è piuttosto bassa.

La figura 4 riporta l'andamento dei valori medi mensili delle precipitazioni totali, delle percentuali delle precipitazioni nevose rispetto alle precipitazioni totali e delle temperature. L'esame delle curve mostra due massimi delle precipitazioni totali, di cui quello primaverile più elevato di quello autunnale. Le maggiori precipitazioni nevose avvengono nei mesi di gennaio e febbraio, mentre le temperature medie si mantengono al di sotto dello zero da dicembre a marzo.

La maggior frequenza di eventi pluviometrici estremi (Fig. 5) di durata da 1 a 5 giorni si verifica nei mesi autunnali e non nel periodo primaverile, durante il quale si raggiunge il massimo assoluto di precipitazioni totali (GATTO *et al.*, 1984).

L'andamento climatico generale non si discosta quindi da quello continentale-alpino, caratterizza-

to da due distinti periodi stagionali e da due massimi di piovosità in primavera ed in autunno.

TAB. 1 - Tabella riassuntiva dei dati delle precipitazioni dal 1925 al 1983 (stazione di Andraz)

	MIN.	MED.	MAX.
Precipitazioni totali (mm)	699 (1943)	1060	1621 (1926)
Precipitazioni piovose (mm)	484 (1962)	745	1191 (1926)
Equivalente in acqua della neve (mm)	95 (1974)	315	710 (1979)
Giorni piovosi (n. di gg. con altezze di pioggia >1 mm)	48 (1962)	78	103 (1960)
Giorni nevosi (n. di gg. con precipitazioni nevose di spessore >1 cm)	10 (1973)	33	64 (1979)

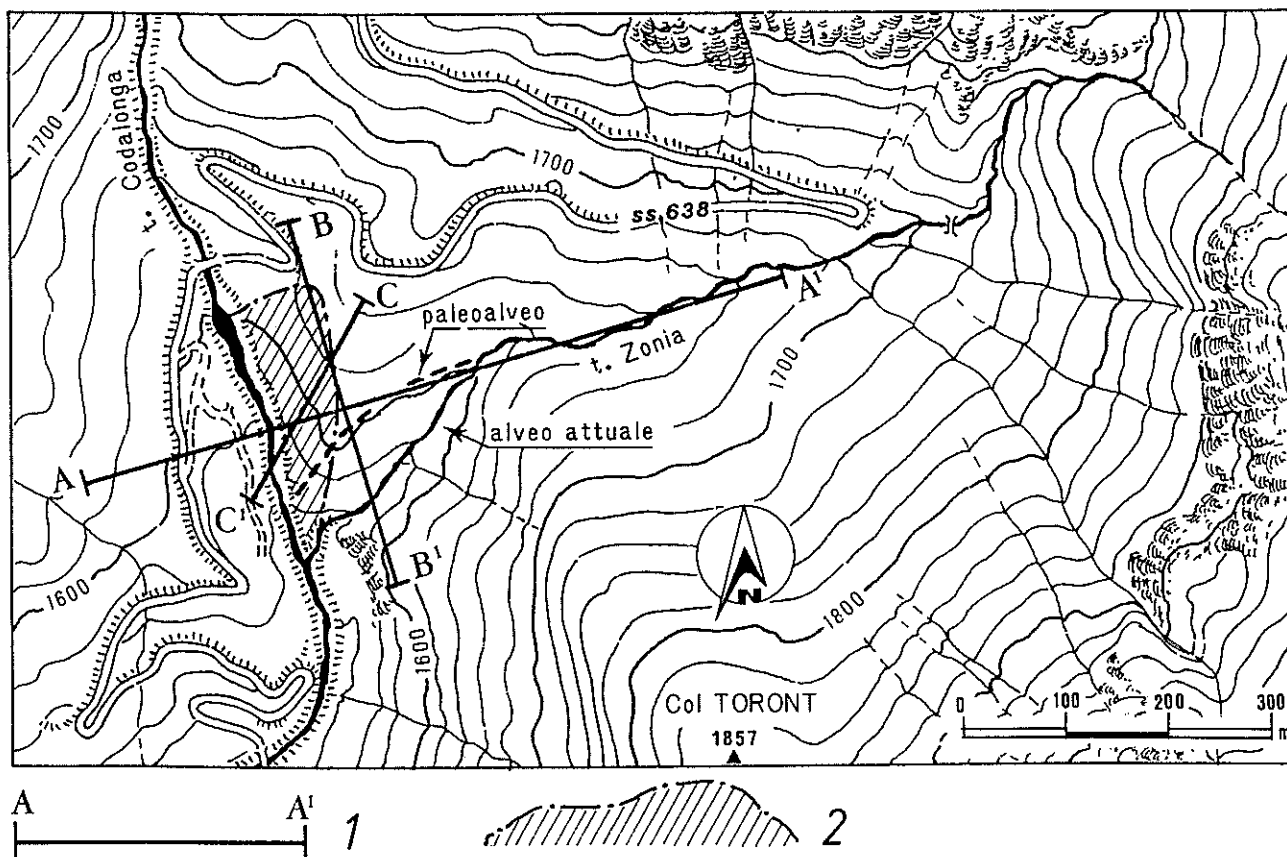


FIG. 3 - Mappa topografica dell'area: 1) traccia di sezione; 2) corpo di frana.

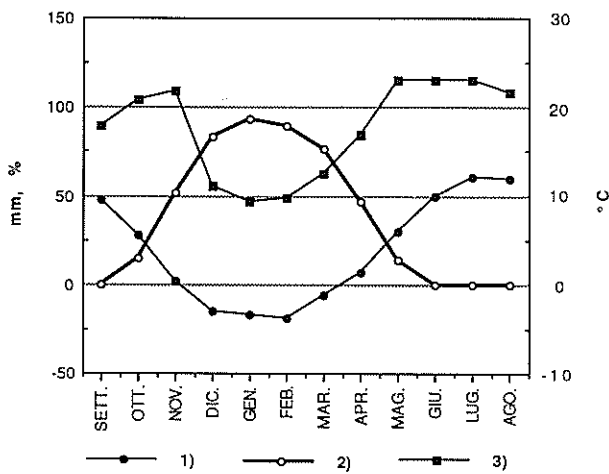


FIG. 4 - Stazione di Andraz: 1) temperature; 2) percentuali di precipitazioni nevose rispetto alle precipitazioni totali; 3) precipitazioni totali (valori medi mensili).

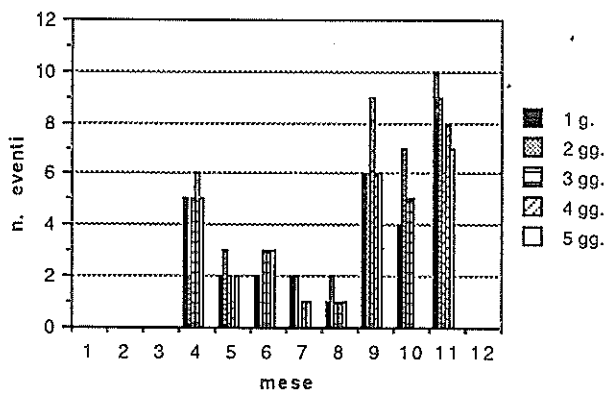


FIG. 5 - Stazione di Andraz: frequenza delle precipitazioni massime con durata da 1 a 5 gg (da GATTO *et al.*, 1984).

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO E MORFOLOGICO

Dal punto di vista geologico i litotipi affioranti nell'area circostante la frana appartengono alla Formazione di Werfen, ascrivibile al Trias Inferiore (Scitico). Tale formazione è costituita da un insieme di membri e orizzonti ben caratterizzati e delimitati nettamente da brusche variazioni litologiche; si tratta in particolare di calcari marnosi di colore rossastro intercalati a marne e arenarie fini sottilmente stratificate. A questa formazione è sovrapposto il deposito morenico interessato dal franamento.

Le giaciture, per la elevata plasticità dei litotipi, possono essere localmente variabili con prevalente immersione a Nord Est.

Dal punto di vista tettonico tale andamento si inserisce in una struttura omoclinale molto più

ampia avente la stessa immersione, caratterizzata da alcune variazioni locali dovute a dislocazioni di ordine minore.

In dettaglio (Fig. 6) la Formazione di Werfen affiora sia lungo il corso del torrente Zonia e sul versante sinistro del suo bacino, sia lungo l'alveo del torrente Codalonga a partire da quota 1540 verso valle ed ancora da quota 1630 verso monte. Affioramenti si ritrovano anche a monte della strada statale 638 del Passo Giaù, lungo il versante destro del torrente Codalonga.

La serie triassica, a volte localmente complicata da motivi tettonici, prosegue poi verso le parti sommitali del bacino fino ad arrivare alla Dolomia Principale del Norico che costituisce il rilievo del M. Averau (Fig. 2).

I depositi quaternari sono rappresentati da morene stadiali e subordinatamente da depositi torrentizi e da coperture detritiche.

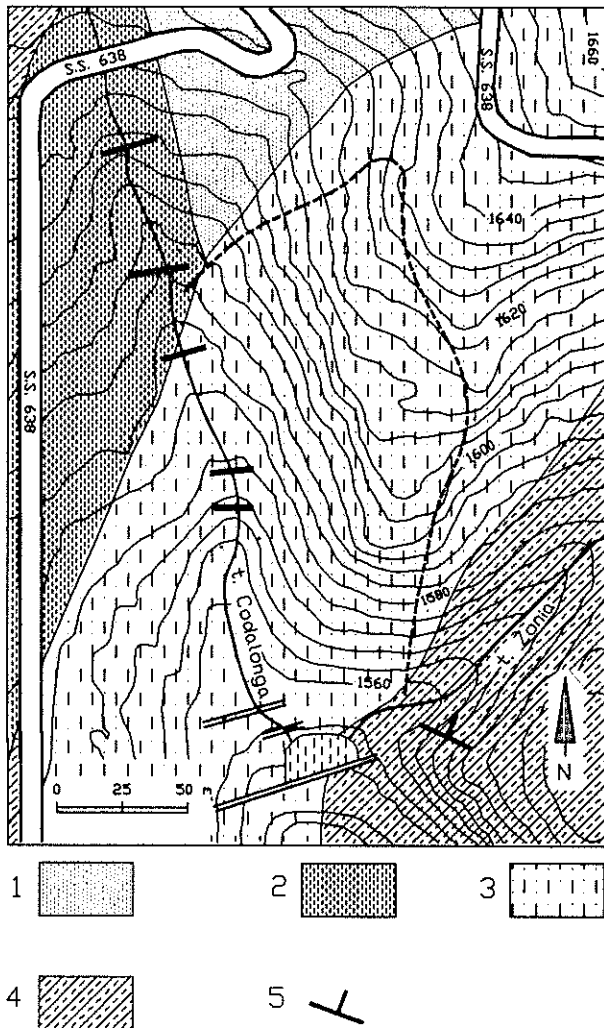


FIG. 6 - Schema geologico dell'area: 1) detritico; 2) depositi torrentizi tardoglaciali; 3) deposito morenico; 4) Formazione di Werfen (Scitico); 5) giacitura degli strati.

La morena è principalmente costituita da matrice fine a prevalente componente limoso-sabbiosa, inglobante ghiaia, ciottoli e blocchi di non elevate dimensioni. Sono frequenti, inoltre, lenti e livelli di materiali sabbiosi e argillosi, che hanno condizionato in maniera notevole il flusso idrico all'interno del corpo morenico.

A monte di questo è presente una conoide ormai incisa (formatasi in epoca tardoglaciale a causa dello sbarramento del torrente operato dal ghiaccio appartenente al bacino dello Zonia) che presenta i caratteri tipici del deposito torrentizio (Fig. 6), con in più abbondante matrice fine limoso-argillosa. Tale conoide è costituita prevalentemente da materiale tufaceo la cui origine è individuabile nella zona della Val Ciarnera (Fig. 2), valle che ospita un tributario di destra del torrente Codalonga. In questa valle infatti, dove affiorano quasi esclusivamente tufi e tufiti jaloclastitiche del Trias Superiore, sono presenti vaste aree in erosione accelerata, le quali anche attualmente danno luogo ad abbondanti quantità di materiale detritico. Tale materiale, in occasione di eventi piovosi di una certa intensità, viene mobilitato e trasportato a valle.

Oltre a ciò sono presenti nell'area in studio sia lembi di copertura detritica, derivanti principalmente dallo smantellamento operato dagli agenti esogeni sulle pareti rocciose sovrastanti, che alluvioni recenti del torrente Codalonga.

Per la comprensione dei fenomeni in atto, oltre alla caratterizzazione geologica dell'area si è reso necessario lo studio dei processi geomorfologici (legati alla presenza dei ghiacciai) che portarono alla formazione del dosso morenico (allungato in direzione NNE-SSW) su cui è impostata la frana.

I bacini dello Zonia e del Codalonga ospitavano, durante le espansioni glaciali e stadiali, altrettanti ghiacciai che scendevano lungo le aste torrentizie modellandone il fondo. La differente orientazione delle testate dei due bacini (Fig. 2)

condizionò enormemente lo sviluppo di tali ghiacciai, specie nelle fasi stadiali, quando il limite delle nevi permanenti si trovava ad una quota inferiore di 500-1000 m rispetto a quella attuale.

Il bacino dello Zonia, con direzione E-W doveva ospitare, durante lo stadiale dello Sciliar, un apparato glaciale la cui lingua scendeva molto più a valle di quella presente nel bacino del Codalonga orientato prevalentemente a Sud. In quest'ultimo erano presenti, molto probabilmente, solo alcune vedrette che avrebbero redistribuito il materiale franato dalle pareti dolomitiche, attualmente ben visibile in località Fedare. Esistevano quindi le condizioni per la formazione dell'apparato morenico che separa attualmente i due bacini, il quale è interpretabile non come una morena mediana, ma piuttosto come una morena laterale destra e frontale.

La formazione di questo argine avrebbe poi da un lato costretto il torrente Zonia a scavarsi un alveo epigenetico a ridosso del versante sinistro del bacino, nelle alternanze di arenarie e marne della Formazione di Werfen (Fig. 7), dall'altro sbarrato il corso del torrente Codalonga, innalzandone il livello di base con la conseguente formazione della conoide torrentizia a monte, poi re-incisa una volta sfondato il setto morenico (CASTIGLIONI, 1979).

È evidente quindi che la confluenza tra i due corsi d'acqua, prima e durante le glaciazioni pleistoceniche, doveva avvenire secondo un angolo meno acuto dell'attuale (Fig. 3).

Si deve quindi postulare la presenza di un paleoalveo dello Zonia sepolto al di sotto della copertura morenica, che avrebbe condizionato lo sviluppo del corpo franoso (Figg. 3, 8).

Dai profili topografici dei due corsi d'acqua (Fig. 9) si individua per il Codalonga un andamento pressoché normalizzato nel tratto compreso tra la confluenza dello Zonia (quota 1540 m s.l.m.) e il torrente Fiorentina. Nella parte più a

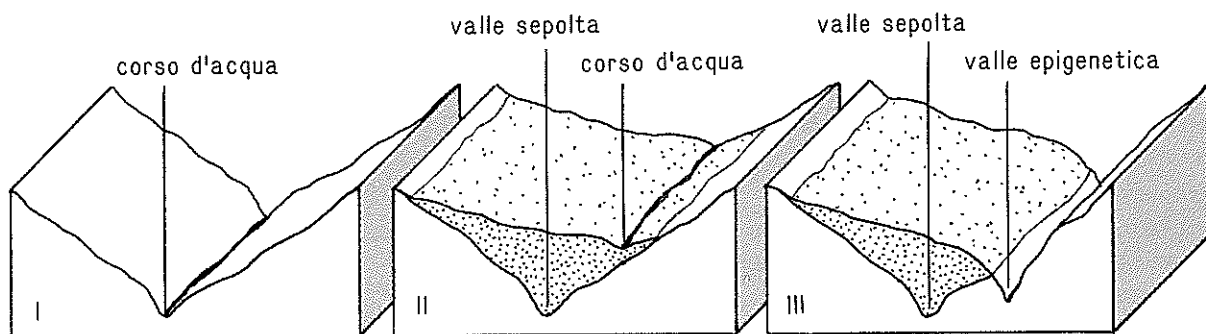


FIG. 7 - Schema evolutivo di un alveo epigenetico (da CASTIGLIONI, 1979, modificato).

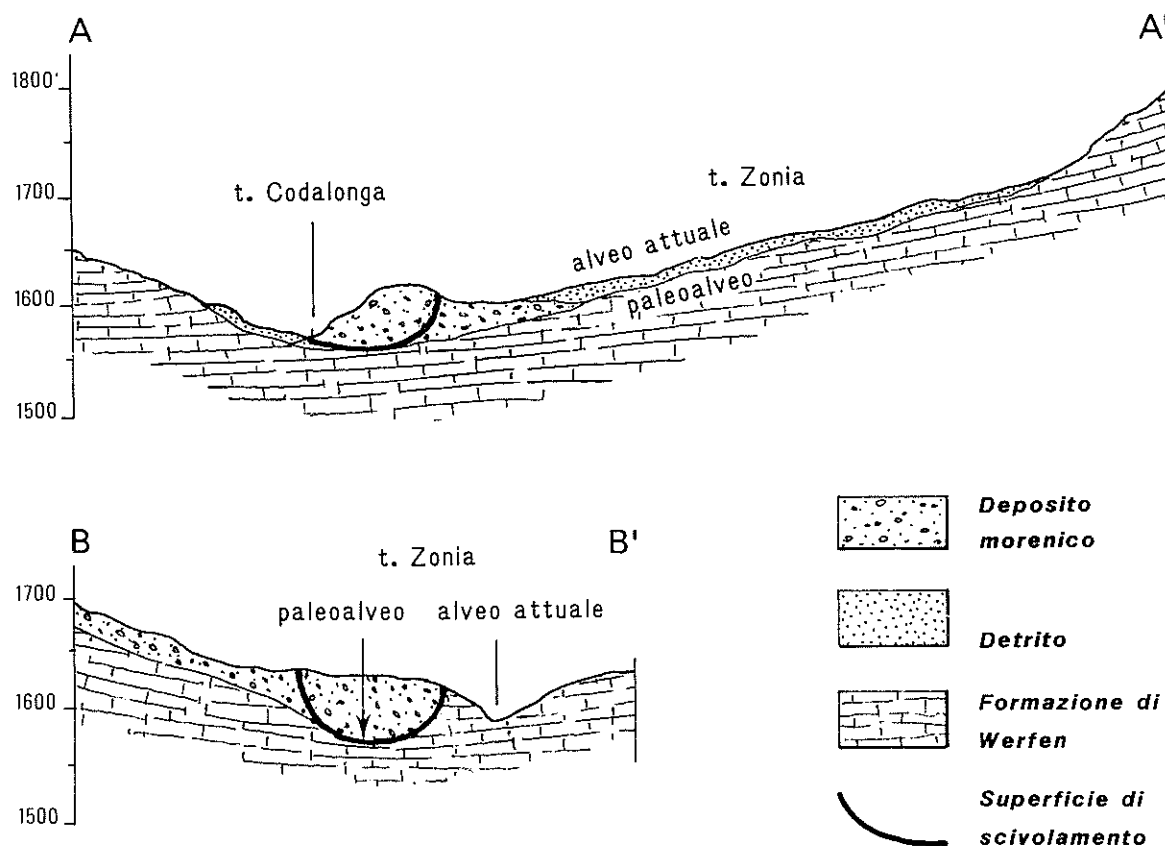


FIG. 8 - Sezioni geologiche (A-A' e B-B').

monte sono presenti alcune irregolarità legate soprattutto a litotipi meno erodibili quali i calcari e le dolomie dell'Anisico. La costruzione dopo il 1966 di numerose briglie ne ha senza dubbio condizionato l'evoluzione determinando, in alcuni tratti, abbondanti sovralluvionamenti.

Lo Zonia mostra invece un profilo piuttosto giovane e in alcuni tratti anche molto ripido; esso è caratterizzato, nella parte sommitale, da alcuni

gradini morfologici, testimonianza di fasi di stagnazione del ghiacciaio durante il ritiro.

Entrambi i corsi d'acqua presentano alla testata dei loro bacini chiari segni di erosione regressiva molto attiva.

#### NOTIZIE STORICHE E SCHEMA EVOLUTIVO DEL MOVIMENTO FRANOSO

Le prime informazioni sul fenomeno franoso fanno riferimento alla presenza di alcune fratture di trazione nel pendio, formatesi a seguito dell'alluvione del novembre 1966. In questa occasione si verificò anche un approfondimento dell'alveo del torrente Codalonga stimato in circa 2 metri.

Tuttavia sembra che già nei decenni precedenti l'area interessata dal franamento non venisse più utilizzata per il pascolo a causa della presenza di numerose fessure nel terreno.

Nel 1970 vennero realizzate dal Corpo Forestale dello Stato numerose briglie in calcestruzzo lungo il torrente Codalonga per limitarne l'azione erosiva. Alcune di queste cominciarono poco dopo a lesionarsi a causa della spinta esercitata dal corpo di frana (Fig. 10).

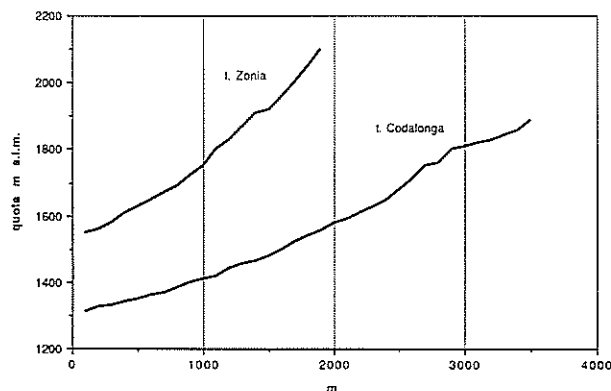


FIG. 9 - Profili topografici dei torrenti Codalonga e Zonia.



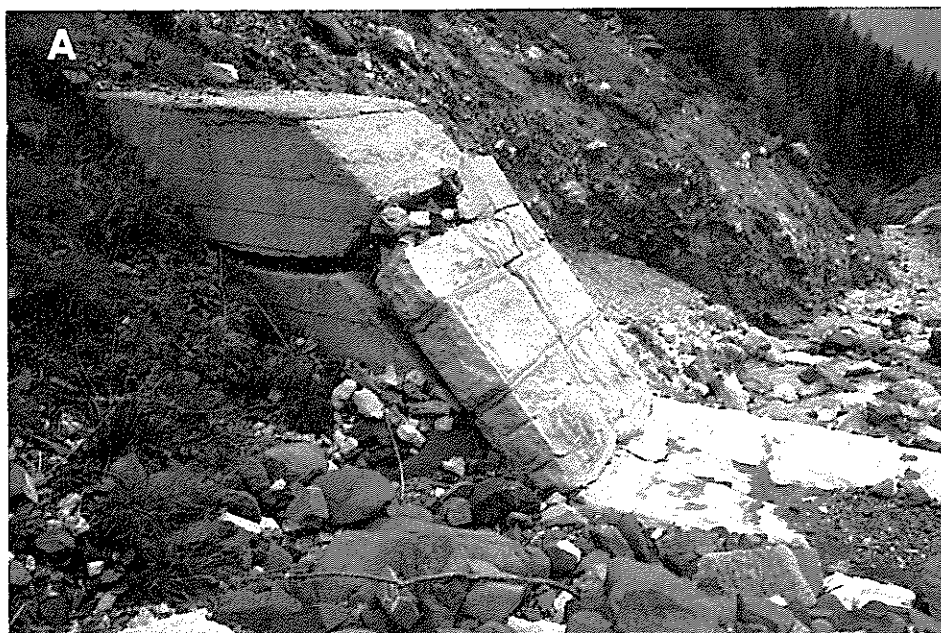


FIG. 10 - Progressione dei dissesti in corrispondenza dell'ala sinistra di una briglia: A) estate 1981; B) ottobre 1981 (Foto FENTI).

I primi movimenti di cui si ha ufficialmente notizia risalgono però al novembre 1976 quando, a seguito di un intenso evento piovoso, si ebbe la rottura delle tubazioni dei 2 acquedotti che attraversavano il corpo di frana.

Questi movimenti e i conseguenti danni continuarono a verificarsi periodicamente in occasione

dello scioglimento delle nevi e, in alcuni casi, nei mesi autunnali (Fig. 11).

Nell'estate del 1981 la frana presentava già una scarpata principale alta circa 2.5 m ed estesa per circa 100 m.

Alla fine di ottobre dello stesso anno la rimobilizzazione del corpo di frana determinò un ulterio-

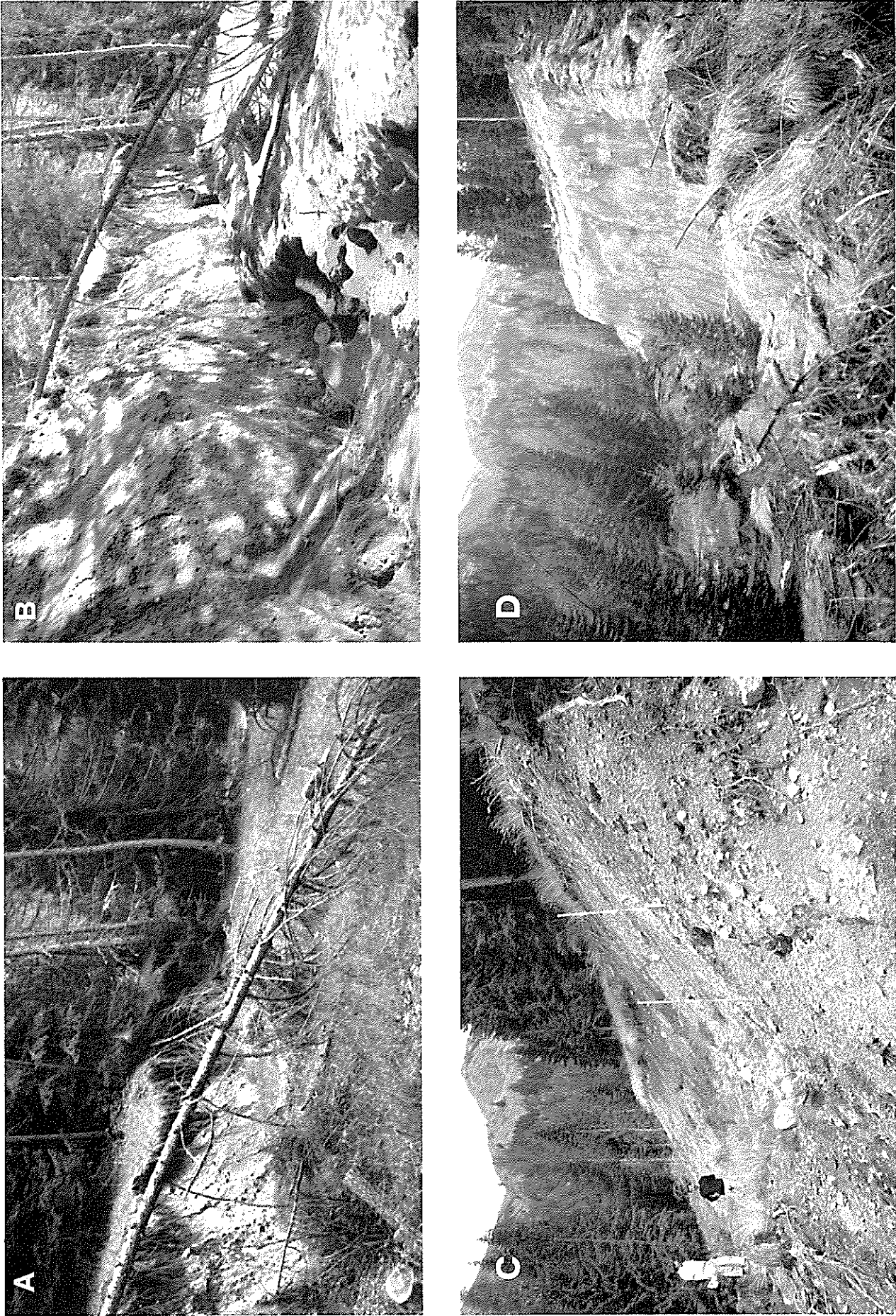


Fig. 11 - Evoluzione della scarpata principale: A) estate 1981; B) aprile 1982; C) luglio 1985; D) aprile 1988.

re sviluppo della scarpata che raggiunse un'altezza massima di circa 6 m e una lunghezza di 250-300 m. L'assetto morfologico del pendio cambiò profondamente, con la formazione di un'area di *graben* e di numerosi *trench* a ridosso della scarpata principale. Cinque delle briglie realizzate lungo il torrente Codalonga risultarono seriamente danneggiate.

A seguito di quest'ultimo evento l'Istituto di Geologia Applicata del CNR di Padova, che già operava in Val Fiorentina, intraprese lo studio di questa frana.

Nel 1985 venne realizzata dal Corpo Forestale dello Stato, alla confluenza tra i torrenti Codalonga

ga e Zonia (piede della frana), una grande opera di regimazione in conglomerato cementizio armato.

Il 24 aprile del 1988 si ebbe il completo collasso del corpo di frana i cui effetti possono essere così sintetizzati:

- traslazione del corpo di frana di circa 20 m con ulteriore sviluppo della scarpata principale che raggiunse in alcuni tratti l'altezza di 16 m;
- ostruzione del torrente Codalonga per un tratto di un centinaio di metri, con deviazione e innalzamento dell'alveo (Fig. 12);
- completa rovina delle opere di regimazione presenti lungo il torrente Codalonga, compresa la

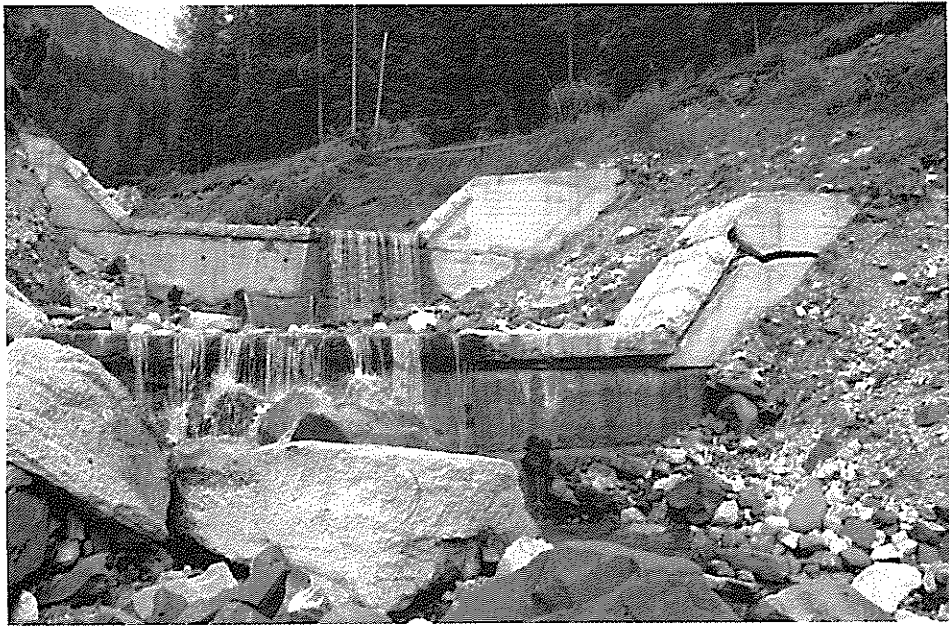


FIG. 12 - Veduta dello stesso tratto di alveo del torrente Codalonga prima e dopo il collasso del 24 aprile 1988 (Foto FENTI).

grande briglia in conglomerato cementizio armato posta alla confluenza dei due bacini.

È importante notare che l'evoluzione del fenomeno franoso, dai primi movimenti al definitivo collasso, non fu determinata esclusivamente dall'azione del torrente Codalonga. Infatti, se da un lato il movimento fu verosimilmente innescato dall'erosione al piede da parte di quest'ultimo, la successiva evoluzione sembra essere stata prevalentemente legata all'azione del bacino dello Zonia.

Il torrente Zonia, con i suoi apporti idrici superficiali e sotterranei, avrebbe determinato le successive riattivazioni del movimento, fino al definitivo collasso.

In figura 13 è schematizzata l'evoluzione del fenomeno. La sezione del pendio riportata in figura corrisponde alla sezione C-C' di figura 3.

La figura 13A mostra il pendio nelle condizioni iniziali, precedenti l'innescio del fenomeno franoso.

Il processo di erosione al piede e la conseguente diminuzione delle forze resistenti (Fig. 13B) hanno determinato la formazione di una serie di fratture di trazione nel pendio.

Il riempimento di queste fratture dovuto, oltre che agli apporti idrici superficiali, anche a quelli profondi provenienti dal bacino del torrente Zonia (questi ultimi legati alla presenza del suo paleoalveo), ha determinato una sovrappressione idrostatica a tergo del potenziale corpo di frana. L'incremento delle forze agenti ha comportato un ulteriore sviluppo delle fratture di trazione, che hanno poi raggiunto il substrato (Fig. 13C).

La fase successiva è rappresentata dal completo sviluppo della superficie di scivolamento al contatto tra roccia in posto e materiale morenico e dalla dislocazione dell'intero corpo di frana.

Contemporaneamente a ciò si sono sviluppate fratture antitetiche, che hanno portato alla formazione di un *graben* nella parte sommitale della frana (Fig. 13D).

A questo punto le numerose fratture presenti nell'area di *graben* hanno costituito una via preferenziale per la infiltrazione dell'acqua, consentendo variazioni anche rapide del regime delle pressioni a tergo del corpo di frana.

La figura 13E si riferisce alla configurazione assunta dal corpo di frana dopo il collasso avvenuto il 24 aprile 1988 in conseguenza di un rapido innalzamento del livello di falda.

In seguito a tale evento la scarpata principale si è approfondita di circa 16 m e il corpo di frana ha subito una traslazione di circa 20 m (Fig. 14).

## INDAGINI GEOGNOSTICHE

A seguito dei primi sopralluoghi effettuati nel 1981 si decise di intraprendere uno studio geologico e idrogeologico e una campagna di indagini geognostiche e controlli topografici per poter

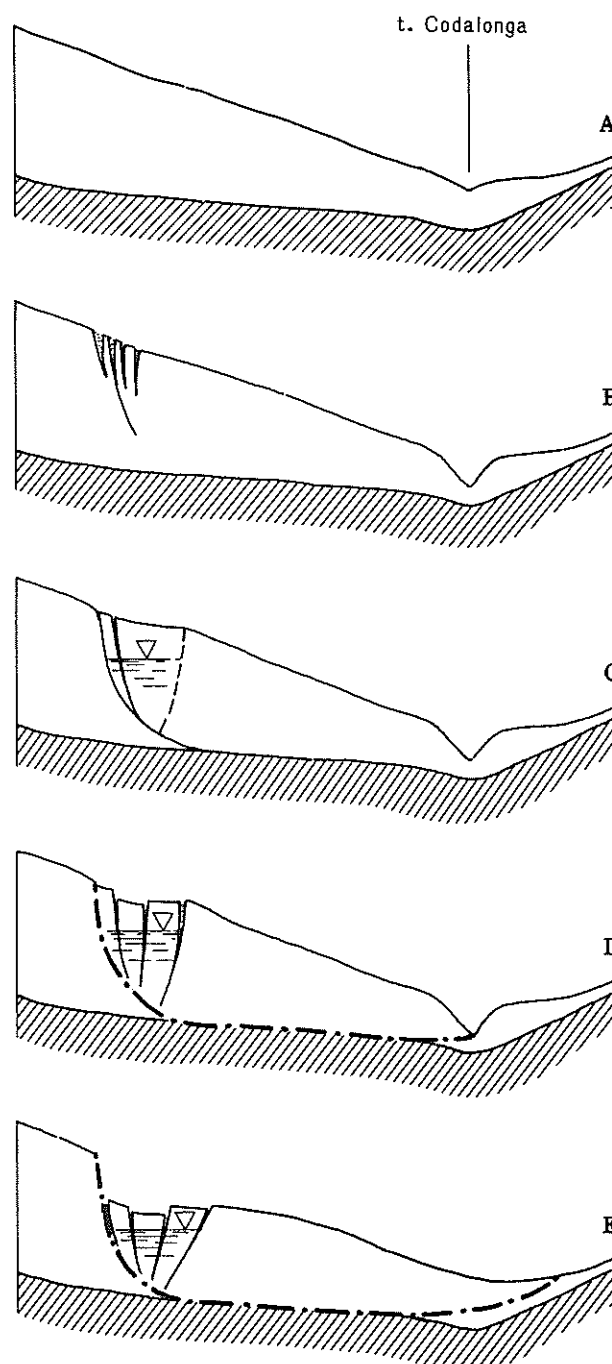


FIG. 13 - Rappresentazione schematica del pendio nelle successive fasi evolutive (sez. C-C'): A) condizioni iniziali; B) erosione al piede con formazione di fratture di trazione; C) sviluppo delle fratture di trazione sino al raggiungimento del substrato; D) formazione contemporanea di una superficie di scorrimento continua e della struttura di *graben*; E) configurazione assunta dal pendio dopo l'evento di collasso.

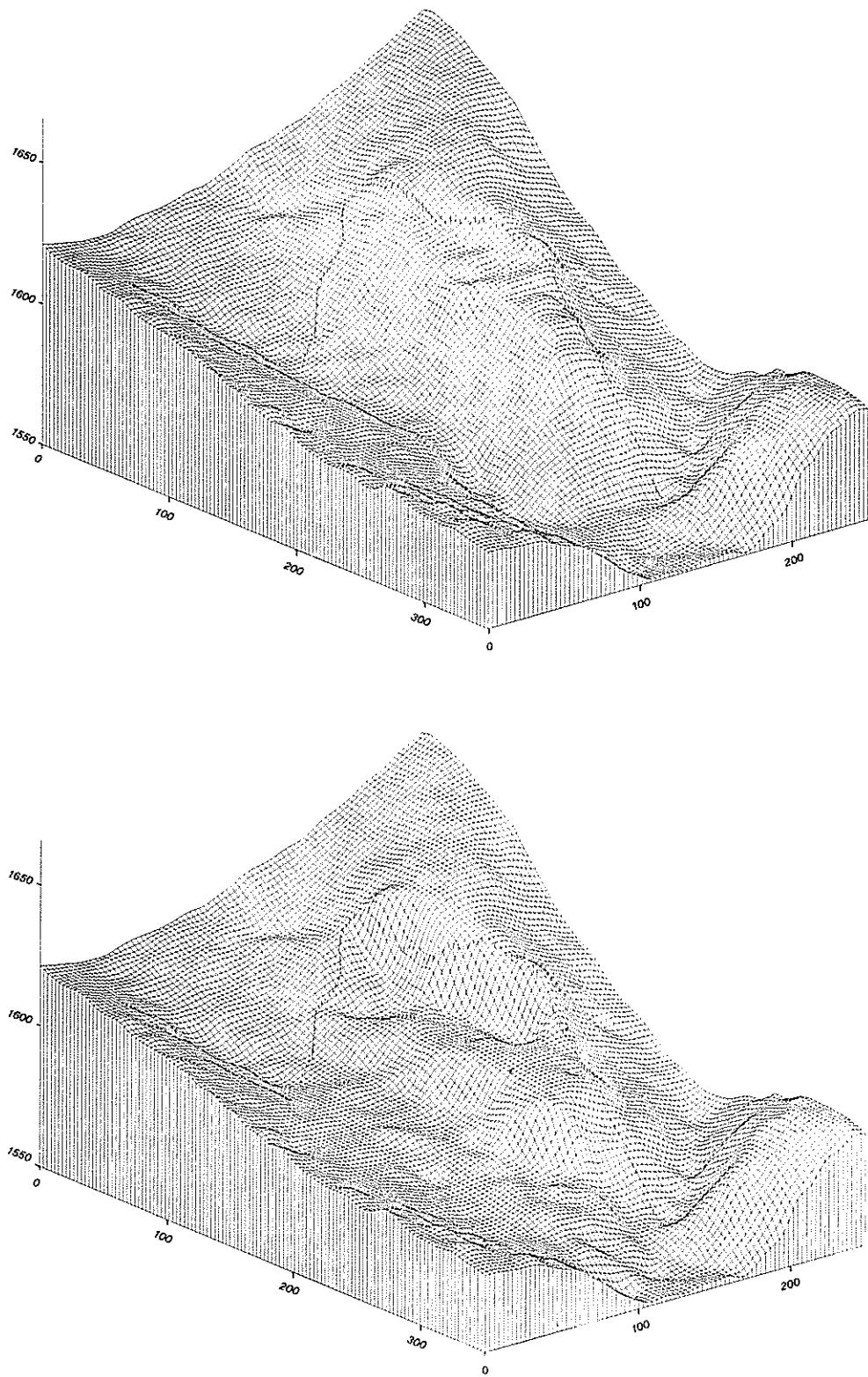


FIG. 14 - *Block diagram* della frana prima e dopo il collasso.

meglio definire le caratteristiche del movimento (Fig. 15).

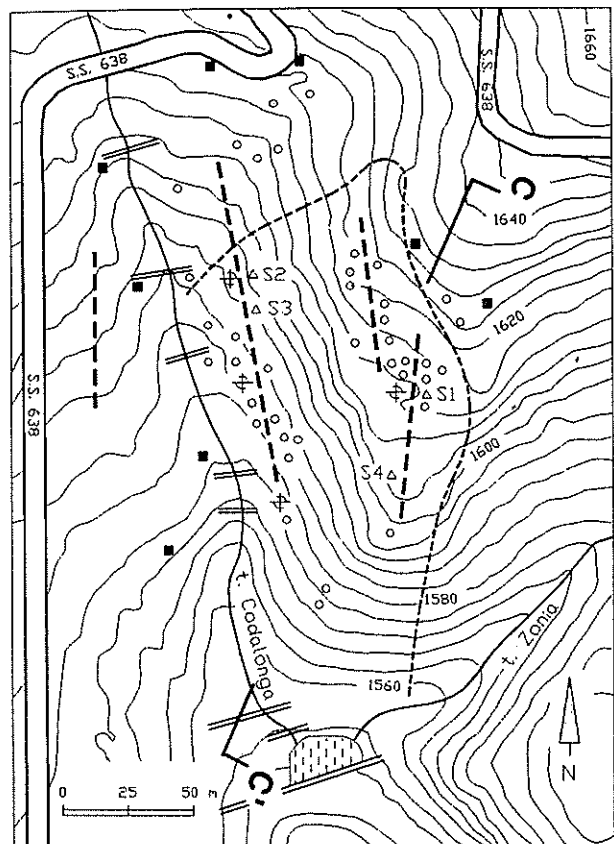
Tali indagini si svilupparono per fasi successive dal novembre 1981 al 24 aprile del 1988, data dell'evento di collasso.

La prima fase consistette in rilievi topografici e

indagini sismiche ed elettriche, ripetute nel tempo, e nell'esecuzione di 4 sondaggi meccanici equipaggiati con tubi inclinometrici e piezometri di tipo Casagrande, ubicati nell'area di *graben* ed in prossimità del torrente Codalonga.

Per ampliare il numero dei punti di controllo e

migliorare le conoscenze stratigrafiche, nel 1985 furono eseguiti due nuovi sondaggi meccanici, equipaggiati con tubi inclinometrici. L'anno successivo vennero installati alcuni sensori per la misura automatica degli spostamenti e dei livelli piezometrici e una stazione meteorologica per la registrazione dei dati climatici.



■ stazione topografica    △ sondaggio meccanico  
○ caposaldo                    ⊕ sondaggio elettrico verticale  
- - - sezione sismica

FIG. 15 - Ubicazione dei punti di indagine geognostica, geofisica e topografica.

C'è da osservare che la campagna geognostica risentì di alcune limitazioni derivanti dall'eterogeneità granulometrica dei materiali morenici e dall'elevata acclività di gran parte dell'area in frana.

Infatti la presenza di trovanti non permise l'esecuzione di sondaggi profondi a costi accettabili, mentre la notevole acclività dell'area limitò l'indagine alle sole zone di *graben* e di piede.

Per quanto riguarda l'area di *graben*, dove gli indizi morfologici facevano supporre la presenza della superficie di scorrimento ad una profondità

non inferiore ai 45 m, e l'esistenza di numerosi *trench* avrebbe ben presto compromesso la continuità delle misure inclinometriche, si privilegiò l'esecuzione di fori non molto profondi da utilizzare per il controllo dei livelli di falda.

Al piede della frana invece, dove il tipo di rottura delle briglie faceva supporre una superficie di scivolamento poco profonda, si privilegiò l'installazione di tubi inclinometrici.

Si ottenne così una sensibile riduzione della lunghezza totale e quindi dei costi di perforazione. Ciò non impedì di raggiungere l'obiettivo primario costituito dalla caratterizzazione del corpo di frana dal punto di vista cinematico e idraulico.

L'esame delle carote provenienti dai vari sondaggi denunciò la presenza di materiali assai monotoni rappresentati da morene a frazione grossolana di sabbia, ghiaia (costituita da elementi calcarei e tufacei) con trovanti di varie dimensioni in matrice limoso-sabbiosa).

Dal solo esame delle carote non fu possibile definire la profondità della superficie di scivolamento, determinata in seguito con misure inclinometriche.

Durante la perforazione furono comunque individuati due livelli distinti all'interno del materiale morenico.

Un livello superiore (fino a quota -17 m nei sondaggi S1 e S1 bis) risultò per la presenza di numerose fratture molto permeabile, con perdita totale dell'acqua di perforazione.

Un livello inferiore, da quota -17 m a quota -24 m, nel quale l'acqua veniva completamente recuperata, si dimostrò estremamente più compatto, causando notevoli difficoltà nell'avanzamento del tubo di rivestimento.

Le prove di permeabilità in foro, effettuate sia a carico costante che a carico variabile, confermarono l'esistenza dei due differenti livelli. Nel livello superiore, per l'impossibilità di saturare il materiale, non si ottennero valori di permeabilità attendibili. Le misure effettuate all'interno del livello inferiore fornirono valori di  $K$  dell'ordine di  $10^{-7}$  m/sec.

A completamento delle indagini geologiche e geognostiche furono eseguite due campagne geofisiche, la prima nel 1983 e la seconda nel 1988, successivamente all'evento di collasso.

La presenza di un'abbondante copertura boschiva, insieme alla marcata irregolarità della superficie topografica, condizionò sensibilmente i risultati della prima campagna di indagini geofisiche.

L'impossibilità di effettuare punti di scoppio sufficientemente distanti e la scarsa estensione

degli stendimenti non permisero infatti di definire con precisione la forma del substrato e la profondità della superficie di scivolamento. La seconda campagna, eseguita successivamente all'evento di collasso della frana e al taglio completo della copertura boschiva, fornì risultati più soddisfacenti.

## CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DEI TERRENI

Il materiale morenico interessato dalla frana risultò costituito da ciottoli, ghiaia e sabbia in matrice generalmente limoso-sabbiosa e da trovanti di varie dimensioni.

Alcuni campioni di materiale furono raccolti sia durante l'esecuzione dei sondaggi meccanici sia lungo i tratti di superficie di scorrimento messi a nudo dall'evento di collasso. Sottoposti ad analisi granulometriche, fu possibile classificarne la matrice come sabbia limosa con argilla.

TAB. 2 - Caratteristiche geotecniche di alcuni campioni prelevati durante i sondaggi meccanici e lungo la superficie di scivolamento

Zona di prelievo dei campioni	Prof. (m)	W <sub>L</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)	φ <sub>R</sub> (°)	Passante D <sub>200</sub> (%)
S1	1.0	40.0	8.0		4.0
S1	1.3	32.0	7.8		4.0
S1	5.0				7.0
S1	6.7				5.0
S1	8.7				4.0
S1	11.7				5.0
S1	16.5	22.0	3.7		
S1	17.1	27.0	7.0		
S1	17.3				6.5
S1	22.2	35.0	15.3		19.0
S1	22.8	34.5	15.3		16.0
S1	23.7	36.3	17.2		16.0
S2	8.0	25.5	4.9		
S2	9.5	24.3	4.3		
S2	10.1	24.0	8.0		
S2	10.6	24.3	4.3		
S2	17.1	27.0	7.0		
S3		28.3	11.8	35	
S4	15	21.5	6.6	39	
Sup. Sciv.		42.5	22.4	15	22.5
Sup. Sciv.		32.0	15.4		
Sup. Sciv.		32.9	16.4	17	18.0

Le prove di classificazione e le prove di resistenza al taglio con scatola di Casagrande (Tab. 2) mostrarono che i campioni appartenevano a due distinte categorie di materiale (argille inorganiche di bassa plasticità e argille inorganiche di media plasticità), come evidenziato nella figura 16.

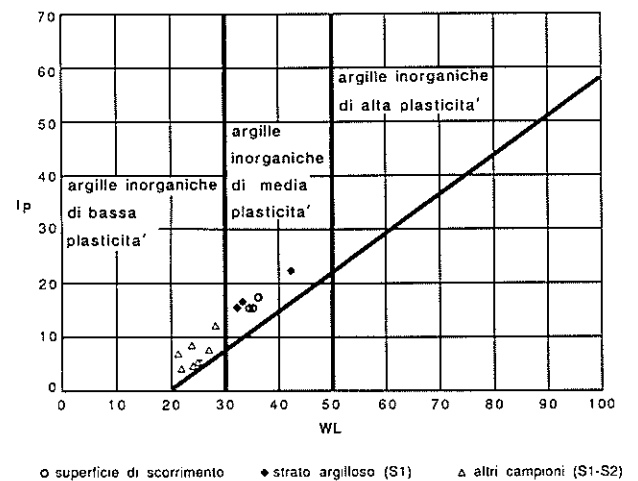


FIG. 16 - Diagramma di plasticità.

I campioni di materiale provenienti dalla generalità delle carote prelevate durante l'esecuzione dei sondaggi furono classificati come argille inorganiche di bassa plasticità (IP = 3.7-11.8%). Prove di taglio diretto eseguite su due provini di materiale rimaneggiato passante al setaccio n. 20, fornirono angoli di resistenza al taglio superiori ai 35°.

I campioni prelevati invece durante l'esecuzione del sondaggio S1, tra -22 m e -24 m, furono classificati come argille inorganiche a media plasticità (IP = 15.3-17.2%).

Di caratteristiche molto simili a questi ultimi furono i campioni raccolti dopo l'evento di collasso dell'aprile 1988 lungo la superficie di scorrimento. Detti campioni risultarono costituiti da una frazione piuttosto grossolana in abbondante matrice limoso-argillosa. La matrice fu classificata come argilla inorganica di media plasticità (IP = 15.4-22.4%) e, sottoposta a prove di taglio diretto, presentò angoli di resistenza al taglio residuo di 15° e 17°.

## LA STRUMENTAZIONE DI CONTROLLO DEL PENDIO

Come già detto nell'Introduzione, la strumentazione di controllo fu installata allo scopo di ottenere un inventario di situazioni critiche ed interpretare così i fenomeni di riattivazione del movimento.

In una prima fase, dal 1982 al 1986, la frana fu tenuta sotto controllo con metodi di rilevazione di tipo ordinario quali:

— rilievi topografici periodici della posizione di alcuni caposalda posti nell'area di frana utilizzando

do, in una prima fase, un tacheometro Galileo TG2C e successivamente un teodolite Wild T2;

- rilievi inclinometrici per la determinazione della superficie di scorrimento, della direzione e dell'entità del movimento, eseguiti con una sonda SINCO in grado di apprezzare una variazione angolare di  $1/20.000$  di radiante a  $0^\circ$  di inclinazione;
- rilievi piezometrici in tubi fenestrati, piezometri Casagrande e tubi inclinometrici effettuati con sonde freatimetriche;
- determinazione dell'altezza di pioggia per mezzo di un pluviografo della ditta SIAP;
- rilievi fotografici periodici eseguiti da postazioni fisse, con un fototeodolite Galileo FTG1B al fine di documentare l'evoluzione delle deformazioni più vistose.

In una seconda fase, dal 1986 al 1988, furono utilizzate anche apparecchiature per la registrazione automatica dei dati. L'esperienza dei primi anni di rilievi aveva infatti evidenziato l'utilità di acquisire i dati ad intervalli di campionamento adeguati alla scala temporale del fenomeno. Si arrivò così alla messa a punto di un sistema di registrazione che nella sua configurazione completa consisteva di una unità centrale connessa a differenti sensori (Fig. 17).

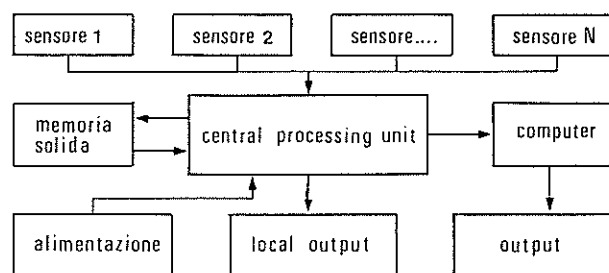


FIG. 17 - Diagramma di flusso del sistema automatico.

Complessivamente furono installate due unità centrali prodotte dalla ditta CAE. L'alimentazione era assicurata da batterie in tampone collegate a celle solari. L'acquisizione dei dati avveniva ad intervalli temporali prestabiliti. I dati venivano registrati su moduli di memoria tipo "EPROM" con capacità di 32.000 valori.

L'unità centrale era in grado di svolgere le seguenti funzioni:

- acquisizione dei dati provenienti dai sensori ad intervalli di tempo selezionabili da tastiera;
- esecuzione di un primo livello di elaborazione dei dati idrometeorologici e cinematici registrati sino al momento della richiesta;

- controllo del corretto funzionamento di tutte le parti del sistema.

I seguenti sensori erano collegati all'unità centrale (Fig. 18):

- n. 1 termometro (CAE) per la misura della temperatura dell'aria;

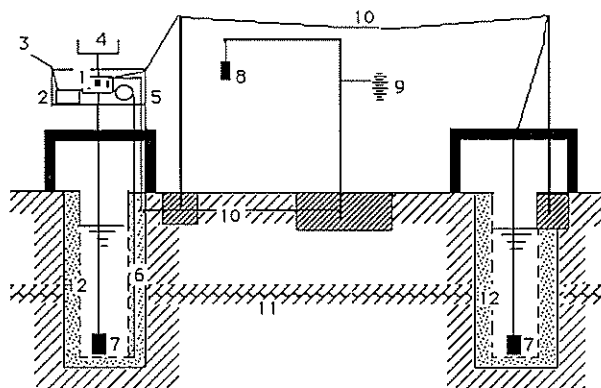


FIG. 18 - Configurazione schematica del sistema di registrazione: 1) CPU; 2) batteria; 3) celle solari; 4) pluviografo; 5-6) puleggia e cavo per la misura degli spostamenti; 7) piezometri elettrici; 8) nivometro ad ultrasuoni; 9) termometro; 10) collegamenti elettrici; 11) superficie di scivolamento; 12) tubo fenestrato.

- n. 1 pluviografo (SIAP) in grado di misurare, mediante un sistema di riscaldamento a gas propano, l'equivalente in acqua delle precipitazioni nevose;

- n. 1 nivometro (CAE) a ultrasuoni per la misura dell'altezza del manto nevoso, basato sul principio di funzionamento degli ecometri;

- n. 2 piezometri elettrici; furono utilizzati esclusivamente trasduttori di pressione di tipo passivo basati sul principio del bilanciamento di un ponte resistivo (*strain gauge bridge*) che fornivano un segnale di uscita in tensione; furono sperimentati sia piezometri di tipo assoluto che relativo; i primi, prodotti dalla ditta SIS con sensibilità di circa 10 cm di colonna d'acqua, non erano compensati con la pressione atmosferica (un barometro forniva poi i valori di pressione atmosferica per la correzione delle misure piezometriche); i secondi, prodotti dalla ditta Transamerica con sensibilità di circa 3 cm, erano dotati di un ponte resistivo a «thin film» (un tubicino collegato con l'esterno provvedeva alla compensazione delle misure); questi ultimi trasduttori dimostrarono un notevole grado di affidabilità e precisione, anche se sottoposti a veloci variazioni di carico;

- n. 1 dispositivo per la misura degli spostamenti a filo di acciaio (CAE); il filo era ancorato a



fondo foro (Fig. 19), ben al di sotto della zona di scorrimento, collegato in superficie ad una puleggia e ad un contrappeso; la deformazione del corpo di frana, provocando lo scorrimento del filo e la rotazione della puleggia, faceva variare la tensione del trasduttore potenziometrico interno alla puleggia stessa; la tensione proporzionale alla rotazione raggiungeva il massimo di 5 Volts D.C. per un angolo di  $360^\circ$ ; un convertitore analogico-digitale a 8 bit provvedeva alla trasformazione del segnale; la misura degli spostamenti era ottenuta con la risoluzione di 1 mm;

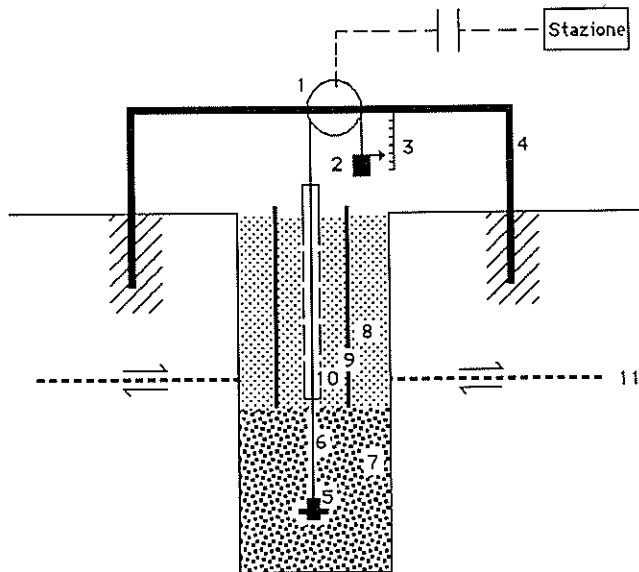


FIG. 19 - Particolare della stazione: 1) dispositivo per la misura degli spostamenti; 2) contrappeso; 3) misuratore aggiuntivo degli spostamenti; 4) supporto; 5) ancoraggio del cavo; 6) cavo; 7) pietrisco; 8) riempimento di sabbia; 9) tubo in plastica; 10) guaina; 11) superficie di scorrimento.

— n. 1 asta estensimetrica (Tecnopenta) costituita da un tubo in materiale plastico (diametro = 2.5 cm;  $l=3m$ ), con all'interno una serie di "strain gauges" in grado di fornire un segnale di uscita in tensione proporzionale alla deformazione del tubo; poiché il dispositivo fu installato soltanto pochi mesi prima dell'evento di collasso, non fu possibile ottenere dati significativi.

È utile infine fare alcune osservazioni critiche sulla affidabilità della strumentazione di controllo utilizzata e sulla attendibilità dei dati registrati.

L'affidabilità della strumentazione di controllo nel suo complesso risultò piuttosto buona, anche se per valori di temperatura particolarmente bassi e a causa delle scariche elettriche in occasione di temporali si verificarono alcuni episodi di malfunzionamento delle apparecchiature.

Temperature sensibilmente inferiori allo zero provocarono più volte guasti ai componenti elettronici delle unità di acquisizione e improvvise diminuzioni di tensione nelle batterie. Per evitare questi inconvenienti si realizzò un adeguato isolamento termico.

Per evitare i danni alle apparecchiature provocati dalle scariche elettriche fu predisposto invece un impianto di messa a terra. Nonostante ciò le scariche elettriche continuarono a creare seri problemi ad alcune sonde piezometriche di tipo passivo, poi sostituite con sonde a segnale di uscita in corrente (esenti da disturbi di tipo elettromagnetico).

Per quanto riguarda invece l'attendibilità dei dati registrati, un discorso particolare meritano i valori di spostamento e piezometrici.

Gli spostamenti registrati dal sistema deformometrico a filo d'acciaio si dimostrarono sempre di entità notevolmente inferiore rispetto a quanto

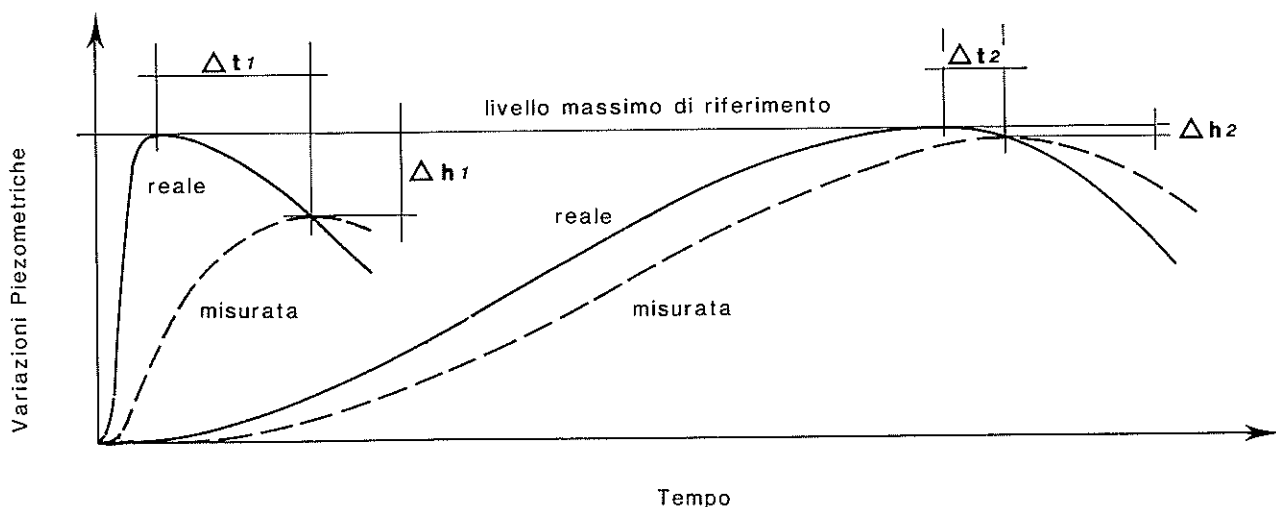


FIG. 20 - Risposta di un piezometro fenestrato per variazioni più o meno veloci del livello piezometrico esterno.

verificato con le misure topografiche. Queste differenze sono probabilmente dovute sia al fatto che il dispositivo non è in grado di misurare separatamente la componente verticale e orizzontale del movimento (ma esclusivamente la loro somma algebrica) sia al parziale sfilamento del tubo inclinometrico (e quindi del filo di acciaio ad esso solidale) durante il movimento.

I livelli piezometrici, registrati durante l'evento di collasso dell'aprile 1988, presentarono un limitato incremento in rapporto alla notevole entità del movimento, specie se confrontati con altri eventi critici. Questo fatto è da attribuire alle modalità di installazione dei piezometri elettrici. Essi erano infatti alloggiati all'interno di tubi inclinometrici di grande diametro (80 mm), il che comportava tempi di equalizzazione estremamente elevati.

La figura 20 mostra come, per un livello massimo di falda di riferimento, l'utilizzo di tali tubi possa condurre a curve piezometriche misurate tanto più discoste da quelle reali quanto più rapide sono le variazioni del livello piezometrico esterno.

Per tale motivo la registrazione di eventi di breve durata portò in questo caso a curve piezometriche significativamente discoste da quelle reali.

## RILIEVI PIEZOMETRICI

Le misure piezometriche sono state eseguite sia in fori attrezzati con piezometri Casagrande, che in tubi inclinometrici.

Nei sondaggi attrezzati S1 e S1 bis, costituiti rispettivamente da un tubo inclinometrico di lunghezza pari a 23.20 m e da due celle Casagrande poste rispettivamente a -17.25 m e a -11.20 m dal piano campagna, furono eseguite esclusivamente misure manuali, iniziate nel gennaio 1983 e proseguite poi in cadenza quindicinale. Le misure piezometriche effettuate all'interno del tubo inclinometrico furono poi interrotte nel giugno 1986, perché non più praticabili in seguito ad atti vandalici.

Nella cella posta a -11.20 m non fu mai rilevata presenza di acqua, mentre le variazioni massime del livello piezometrico nella cella più profonda (1.17 m) risultarono in accordo con quelle del tubo inclinometrico (1.37 m).

Nel sondaggio attrezzato S2, costituito da un tubo inclinometrico di 14.5 m di lunghezza si eseguirono misure piezometriche con periodicità quindicinale dal gennaio 1984 fino all'ostruzione del tubo avvenuta nel giugno 1986 in seguito ad atti vandalici.

Nell'agosto 1985 fu installato, adiacente al sondaggio S2, un nuovo tubo inclinometrico (S3), in cui fino al gennaio 1987 furono eseguite misure manuali; successivamente le misure furono eseguite anche a mezzo di un piezometro elettrico inserito all'interno del tubo. Le massime variazioni di falda registrate furono di 76 cm nel sondaggio S2 e di 90 cm nel sondaggio S3.

Nel sondaggio S4, costituito da un tubo inclinometrico di 33 m di lunghezza, si effettuarono misure piezometriche manuali dall'agosto 1985 fino a tutto il 1986. Successivamente fu installato anche in questo tubo un piezometro elettrico. Le variazioni massime misurate furono di 5.28 m.

## RILIEVI TOPOGRAFICI

I rilievi topografici furono eseguiti a partire dal 1982 con il duplice obiettivo di realizzare una base cartografica di dettaglio e di valutare le caratteristiche cinematiche del movimento franoso (vettori spostamento e velocità).

Per la realizzazione di una base cartografica di dettaglio si operò inizialmente con un tacheometro Galileo TG2C (al primo di grado) e successivamente dal 1987, con un teodolite Wild T2 (al secondo di grado).

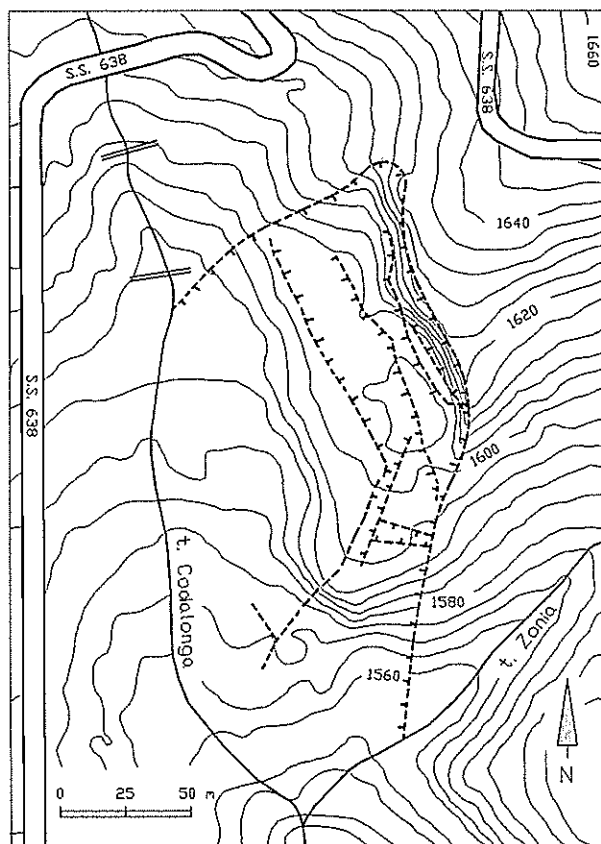


FIG. 21 - Sistema di fratturazione sviluppatosi in seguito all'evento di collasso dell'aprile 1988.

Durante il primo anno di rilievi si realizzò la nuova base cartografica estesa anche alla zona limitrofa dell'area in frana. Si operò seguendo il metodo della poligonale aperta, riferendo le quote a caposaldi dell'ANAS.

Nell'elaborato finale furono riportati i limiti della frana e tutto il sistema di fessurazione superficiale della zona di *graben*.

Negli anni successivi la cartografia fu integrata riportando tutte le modificazioni morfologiche indotte dal progredire del fenomeno franoso. In questa fase parte del rilievo fu eseguito utilizzando una tavoletta pretoriana.

Il rilievo topografico di dettaglio fu ripetuto anche dopo l'evento di collasso avvenuto nell'aprile 1988 (Fig. 21).

Per quanto riguarda invece la definizione delle caratteristiche cinematiche del movimento, nell'estate del 1982 si predispose una rete di punti fissi sul corpo di frana e nelle zone limitrofe. Si operò con il metodo dell'intersezione in avanti determinando le coordinate di ogni singolo punto. L'uso del tacheometro fornì valori degli spostamenti con una precisione dell'ordine di  $\pm 3$  cm.

La folta vegetazione della zona non permise l'utilizzo del metodo dell'intersezione in avanti per tutti i punti della rete, cosicché alcuni di questi vennero controllati da una sola stazione.

Il controllo di tali punti fornì valori comunque indicativi dell'andamento degli spostamenti nel tempo.

Nel periodo che va dal settembre 1982 al gennaio 1988 gli spostamenti totali furono dell'ordine di 50-60 cm (Fig. 22).

In seguito all'evento di collasso dell'aprile 1988 il numero dei caposaldi utilizzabili si ridusse notevolmente. Le misure effettuate permisero comunque di stimare con buona approssimazione l'entità dei movimenti in tutta l'area in frana.

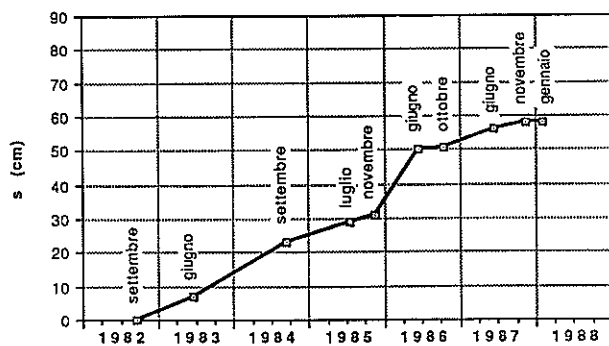


FIG. 22 - Progressione degli spostamenti in un caposaldo topografico.

Mediamente la componente planimetrica dello spostamento al piede del pendio risultò pari a 20 m con limitata variazione della quota, mentre la componente planimetrica relativa alla parte superiore del pendio risultò pari a 15 m, con un abbassamento di uguale entità. La direzione dello spostamento fu la stessa di quella misurata nei precedenti rilievi, così pure il rapporto fra la componente planimetrica e altimetrica nei singoli punti (Fig. 23).

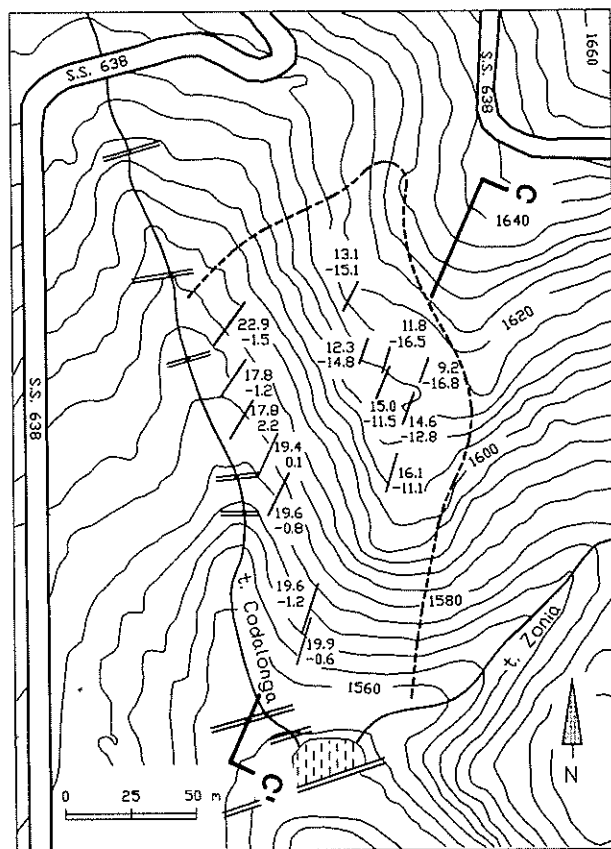


FIG. 23 - Vettori spostamento e variazioni altimetriche di alcuni caposaldi ubicati nell'area di frana. Le coppie di valori indicano lo spostamento planimetrico e la variazione di quota dovuti al collasso.

## RILIEVI INCLINOMETRICI

Nel corpo di frana furono installati in tempi successivi complessivamente 4 tubi inclinometrici (Fig. 15) per un totale di 90 m. Essi permisero di disporre di misure inclinometriche dal 1982 sino all'evento di collasso senza soluzione di continuità.

Il foro attrezzato S1 (24.5 m di lunghezza), pur non raggiungendo la superficie di scivolamento,

permise di rilevare il movimento lungo due delle fratture che costituivano il sistema di *graben*.

Il sondaggio S4 (34.20 m di lunghezza) intercettò il substrato per una profondità talmente limitata da non assicurare, al di sotto della superficie di scivolamento, un sufficiente ancoraggio del tubo inclinometrico. I rilievi non riportarono alcuna deformazione del tubo inclinometrico, ad eccezione di quella relativa ad una frattura subverticale individuata a circa 5 m di profondità ed evidente anche in superficie.

I rilievi inclinometrici dei due tubi posti nella zona superiore del corpo di frana indicarono un movimento complessivo di rotazione verso monte (Fig. 24).

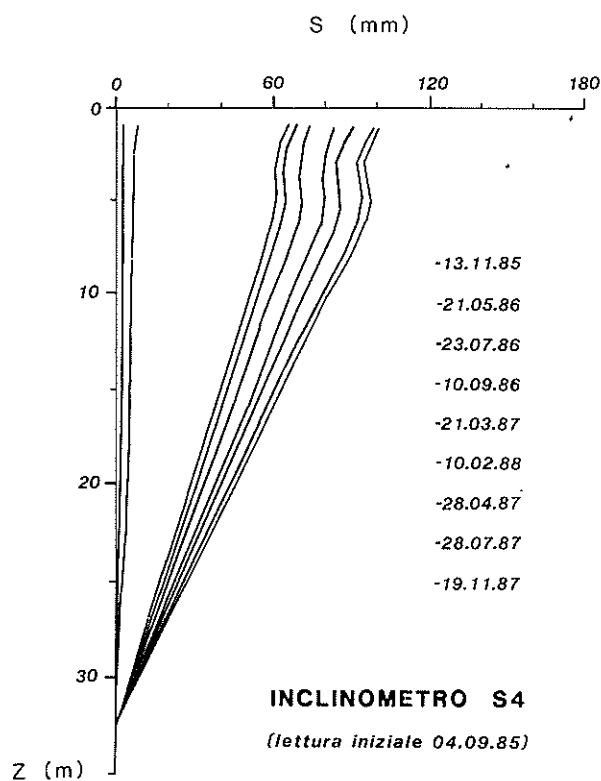


FIG. 24 - Deformata del tubo inclinometrico S4.

I rilievi topografici delle teste dei tubi confermarono un movimento del corpo di frana verso valle.

Nella zona inferiore del corpo di frana, lungo il torrente Codalonga, fu installato nel novembre 1983 il tubo inclinometrico S2 parzialmente ostruito dopo appena pochi mesi. Tenuto conto del tipo di lesioni presenti nelle briglie che facevano supporre una superficie di scivolamento piuttosto superficiale in quella zona, il sondaggio fu spinto sino ad una profondità di

14.5 m, stimata sufficiente ad assicurare un buon ancoraggio del tubo. La perforazione non raggiunse il substrato roccioso, la cui profondità in quella zona risultò, da indagini successive, superiore ai 20 m. Le misure inclinometriche individuarono la superficie di scivolamento ad una profondità di 7 m, all'interno del materiale morenico.

Un secondo inclinometro fu posto nelle immediate vicinanze del sondaggio S2 nel settembre del 1985. La perforazione raggiunse 20 m di profondità, senza intercettare anche in questo caso il substrato. La superficie di scorrimento fu individuata a - 9 m e lo spostamento totale nel settembre 1986 raggiunse i 161.5 mm (Fig. 25). Il rilievo topografico della testa del tubo confermò i valori di intensità, direzione e verso del vettore spostamento già ottenuti con le misure inclinometriche.

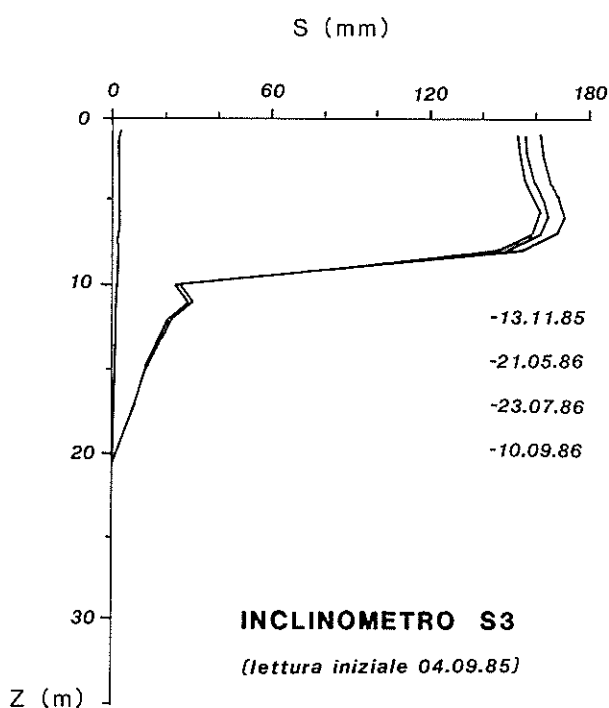


FIG. 25 - Deformata del tubo inclinometrico S3.

## ANALISI E DISCUSSIONE DELLE SITUAZIONI CRITICHE REGISTRATE

La strumentazione di tipo ordinario, posta in opera sin dal 1982, permise di individuare almeno cinque situazioni critiche per la stabilità del pendio in esame. In figura 26 sono messi in relazione piogge, livelli piezometrici e spostamenti. Gli istogrammi rappresentano le altezze di pioggia su base quindicinale. I periodi nei quali le precipitazioni avvennero sotto forma di neve (ovvero la

temperatura si mantenne al di sotto dello zero) sono rappresentati in nero. Lo scioglimento della neve viene a coincidere con la fine di questi periodi, con i valori piezometrici di picco e con lo sviluppo dei movimenti.

La stazione automatica installata nel corpo di frana nell'autunno del 1986 permise di registrare con estremo dettaglio due eventi critici verificatisi rispettivamente nell'aprile 1987 e nell'aprile 1988 (Fig. 27) e riportati anche nel grafico di figura 26.

Mentre nel primo caso si registrarono spostamenti dell'ordine di alcuni centimetri, nell'aprile 1988 si verificò il complesso collasso della massa franosa con spostamenti dell'ordine della decina di metri.

È da notare come gli spostamenti registrati dal sistema estensimetrico siano risultati in ambedue i casi di entità notevolmente inferiore rispetto agli spostamenti individuati con il controllo topografico. Ciò può essere attribuito al non completo ancoraggio del tubo inclinometrico a fondo foro (come dimostrato anche dalle misure inclinometriche in figura 25), e quindi del filo ad esso collegato, oltre al fatto che nella fase del collasso il filo di acciaio doveva già essersi troncato, non permettendo al sistema di registrare spostamenti superiori ai 12.5 cm.

Nel confronto tra le due situazioni critiche l'elemento più importante da analizzare risiede comunque nel fatto che il livello piezometrico, nell'aprile 1987, mostrò una variazione di 1.5 m seguito da uno spostamento dell'ordine di alcuni centimetri, mentre nell'aprile 1988, per una variazione di falda di 0.5 m, si ebbe uno spostamento di 20 m.

Un altro elemento importante da analizzare risiede nel fatto che in ambedue le situazioni critiche il massimo dei livelli piezometrici venne raggiunto con un certo ritardo rispetto all'inizio dei movimenti. In particolare nella figura 28, che riporta la registrazione dei dati piezometrici e di spostamento durante le fasi del collasso, si nota che l'inizio del movimento si verificò in corrispondenza del punto di flesso della curva piezometrica e non del suo massimo.

I due eventi si verificarono nel periodo di scioglimento delle nevi in condizioni climatiche apparentemente simili, come mostrato dalla figura 27. Infatti la variazione dello spessore del manto nevoso in funzione della temperatura presenta andamenti assai simili.

Tuttavia un'analisi complessiva delle registrazioni riferite in particolar modo all'andamento della temperatura, ha posto in evidenza condizioni nettamente differenti nei mesi invernali prece-

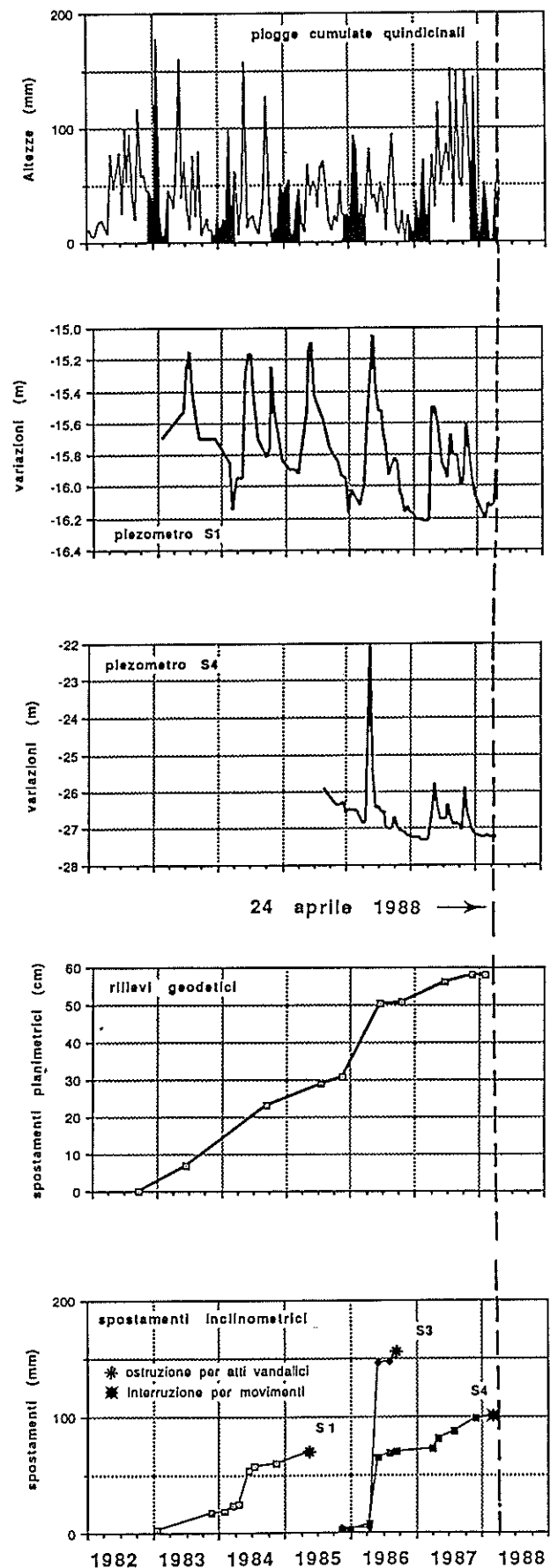


FIG. 26 - Registrazioni di situazioni critiche per la stabilità (strumentazione di tipo ordinario). Nel grafico delle piogge cumulate quindicinali le aree in nero rappresentano periodi in cui le precipitazioni sono state essenzialmente nevose.

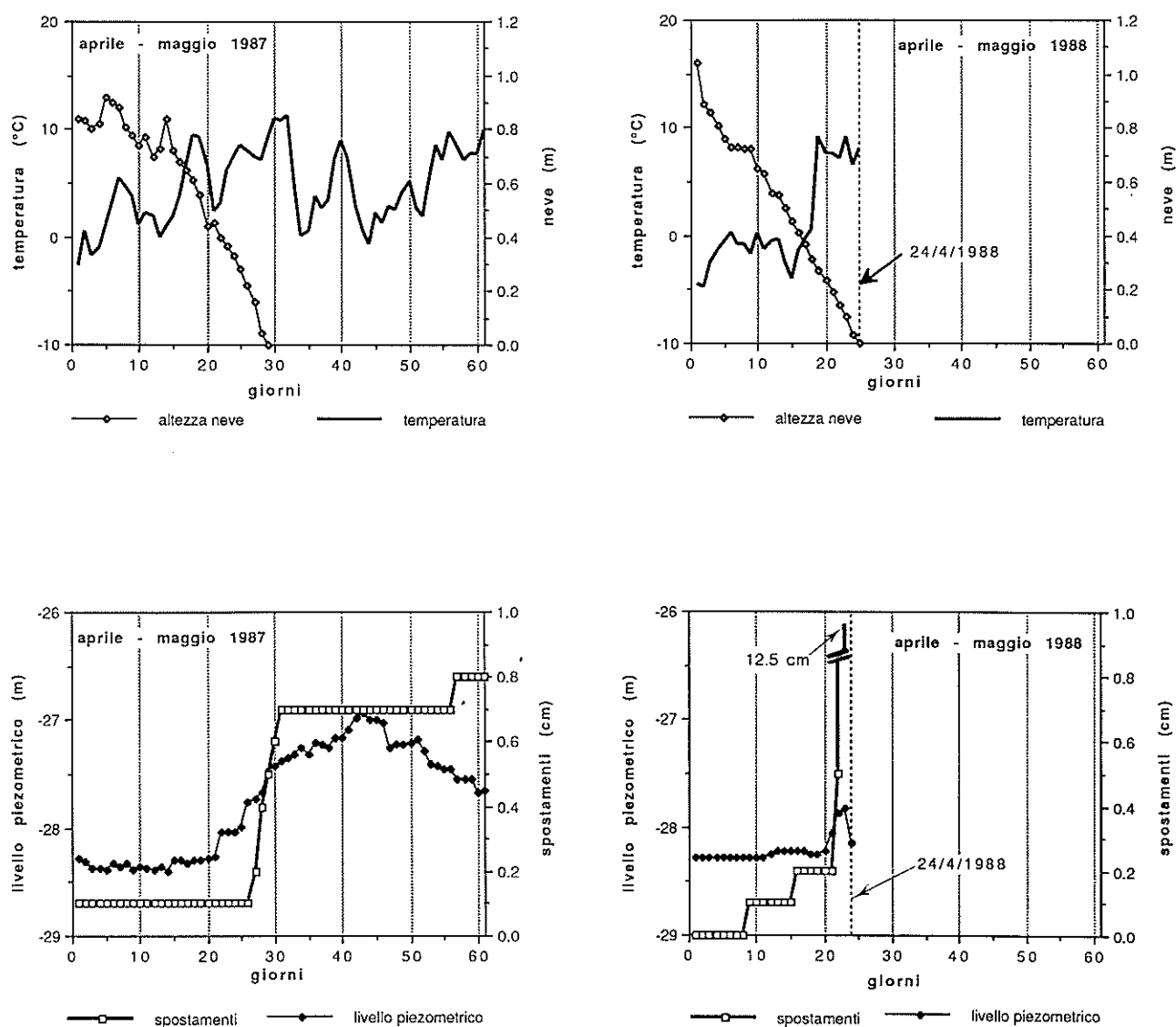


FIG. 27 - Regrazioni di situazioni critiche per la stabilità (strumentazione automatica).

denti i due eventi (Fig. 29). Infatti, mentre nel periodo dicembre 1986 -gennaio 1987 i valori di temperatura si mantennero nella media stagionale, generalmente inferiori allo zero, nello stesso periodo dell'anno successivo si registrarono valori eccezionalmente elevati. Ciò comportò lo scioglimento di oltre 60 cm di manto nevoso in pochi giorni. Tale fenomeno si verificò anche a quote elevate come confermato dai valori di temperatura registrati dalla stazione meteorologica del Dipartimento Foreste della Regione Veneto, situata nel bacino dello Zonia a 2183 m di quota (Fig. 30).

In queste condizioni tale bacino avrebbe contribuito con un apporto supplementare d'acqua, che sarebbe poi andato a sommarsi nel periodo primaverile a quello derivante dallo scioglimento della neve nell'area di frana.

Il fatto che l'innalzamento del livello piezometrico nell'aprile 1988 fosse di entità inferiore rispetto a quello dell'anno precedente (nonostante le condizioni climatiche maggiormente predisponenti) e che si evidenziasse un ritardo tra l'inizio del movimento e il massimo livello di falda (Fig. 28) è senz'altro da attribuire al ritardo nell'equilizzazione del piezometro (Fig. 20).

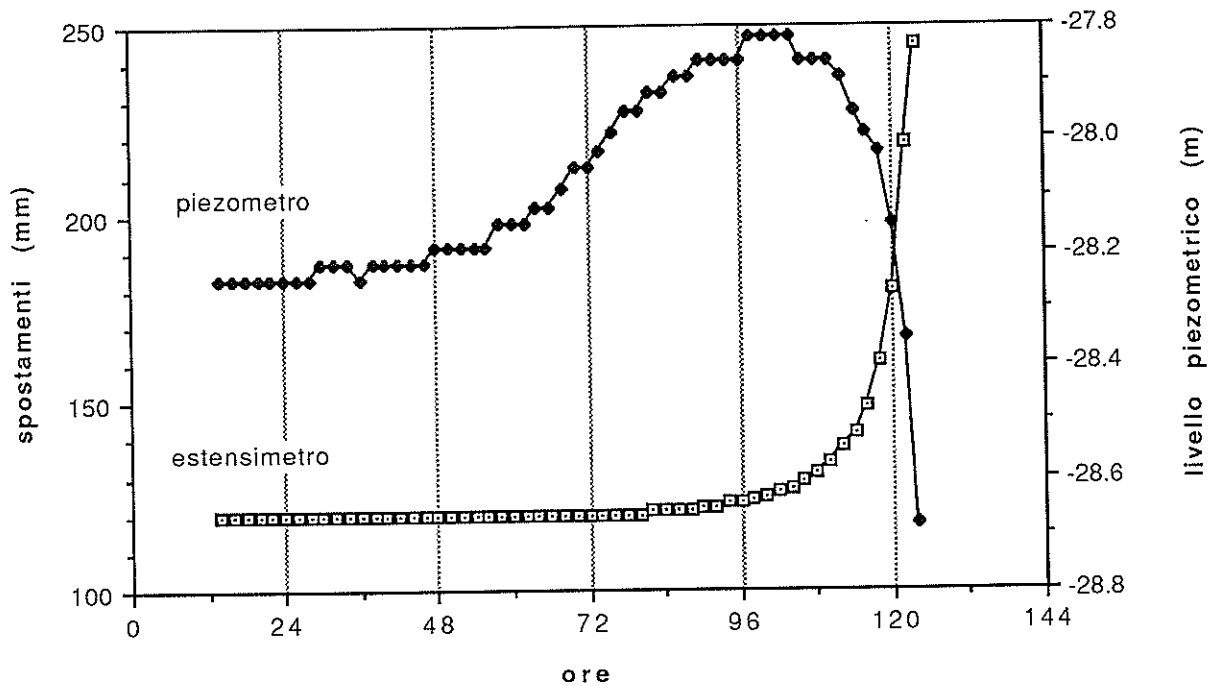
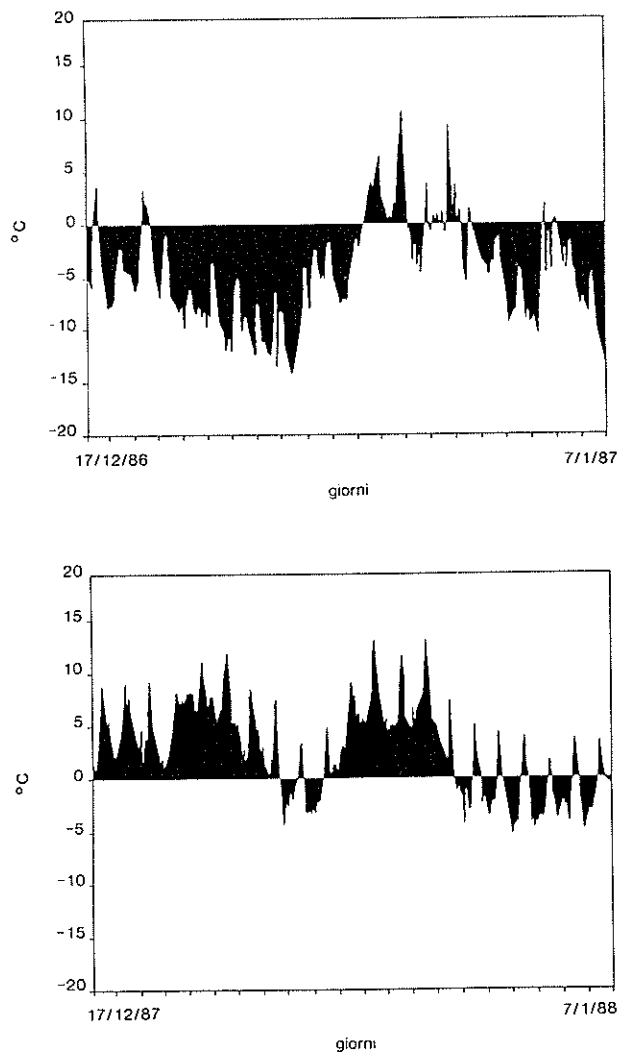


FIG. 28 - Caratteristiche idrauliche e cinematiche dell'evento di collasso (20-24 aprile 1988).



Il valore del livello reale della falda è stato perciò stimato utilizzando la formula proposta dal HVORSLEV (1951) per il calcolo dei tempi di equalizzazione dei piezometri (Fig. 31).  $K$  rappresenta il coefficiente di permeabilità del terreno. La grandezza  $F$ , dipendente dalle dimensioni e dalla forma del tratto filtrante, è denominata coefficiente di ingresso. Tale coefficiente fu determinato sperimentalmente da HVORSLEV per diversi tipi di piezometri, ma non per tubi inclinometrici. Esso è stato perciò stimato, in questo caso, in maniera indiretta.

Utilizzando come *input* nella equazione di figura 31 i livelli di falda registrati durante l'evento critico dell'aprile 1987 e il valore di  $K$  determinato con prove di permeabilità *in situ* (ipotizzando il mezzo filtrante omogeneo e isotropo), sono state calcolate, per valori di  $t$  corrispondenti al passo temporale di interrogazione del trasduttore di pressione posto all'interno del tubo inclinometrico S4, una serie di curve piezometriche corrispondenti a diversi valori di  $F$ .

Tra queste è stata scelta la curva con il valore massimo corrispondente al massimo livello rilevato dall'operatore durante una precedente situazione critica verificatasi nei giorni 8 e 13 maggio

FIG. 29 - Andamento delle temperature orarie nei periodi 17 dicembre - 7 gennaio 1986-1987 e 1987-1988 rilevati nell'area di frana a quota 1670 m s.l.m.

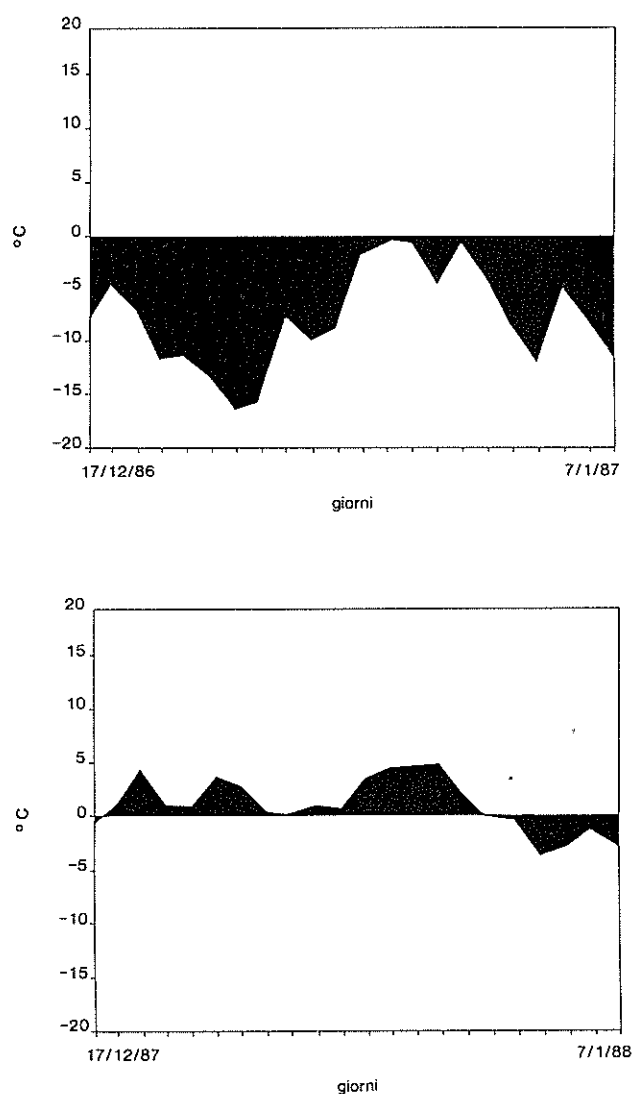


FIG. 30 - Andamento delle temperature medie giornaliere nei periodi 17 dicembre - 7 gennaio 1986-1987 e 1987-1988 rilevati a quota 2183 m s.l.m.

1986 (Fig. 26). La validità di quest'ultima assunzione risiede nel fatto che il livello massimo misurato, oltre ad essersi mantenuto costante per parecchi giorni (almeno cinque giorni!), ha provocato spostamenti del corpo di frana dello stesso ordine di grandezza di quelli registrati durante l'evento dell'aprile 1987.

Si è così ottenuta una curva calcolata ed un valore di  $F$  che è stato poi impiegato come *input* nell'analisi del caso critico dell'aprile 1988.

La curva piezometrica calcolata è stata quindi ottenuta univocamente utilizzando i dati piezometrici misurati, il coefficiente  $K$  e il valore di  $F$  precedentemente calcolato.

Il confronto tra le curve piezometriche calcolate (Figg. 32-33) dimostra inequivocabilmente che la situazione dell'aprile 1988 (valore di picco calcola-

to = -19.7 m) fu di gran lunga più gravosa rispetto a quella dell'anno precedente (valore di picco calcolato = -22.3 m), nonostante che il livello piezometrico misurato nel 1987 fosse maggiore (valore di picco misurato = -26.94) di quello misurato nel 1988 (valore di picco misurato = -27.82).

La ragione di tale comportamento va attribuita alla maggiore velocità di risalita piezometrica verificatasi nell'aprile 1988 che comportò una maggiore riduzione del valore di picco misurato.

## VERIFICHE DI STABILITÀ

La sezione di frana e il modello idraulico considerati per la verifica di stabilità sono riportati in figura 34.

Le condizioni idrauliche nel corpo di frana si riferiscono a quelle stimate durante l'evento di collasso dell'aprile 1988 (Fig. 33).

La verifica è stata condotta graficamente utilizzando il metodo dell'equilibrio dei due prismi (SEED e SULTAN, 1967) ed imponendo  $F=1$ ,  $c'=0$ ,  $\Phi'_1 = \Phi'_2 = \alpha$ .

Il risultato della verifica ha fornito pertanto un unico valore di angolo di resistenza al taglio mobilitata (lungo i tratti curvilineo e rettilineo della superficie di scorrimento e lungo la superficie di contatto dei due prismi) compreso tra  $22.5^\circ$  e  $23^\circ$ .

Tale valore, poiché ottenuto da *back analysis*, è da considerarsi come valore medio di angolo di

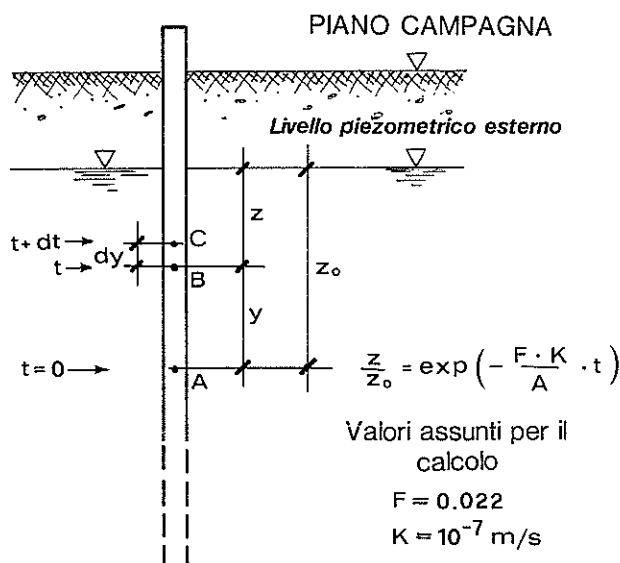


FIG. 31 - Schema e formula per la determinazione dei tempi di equalizzazione dei piezometri.



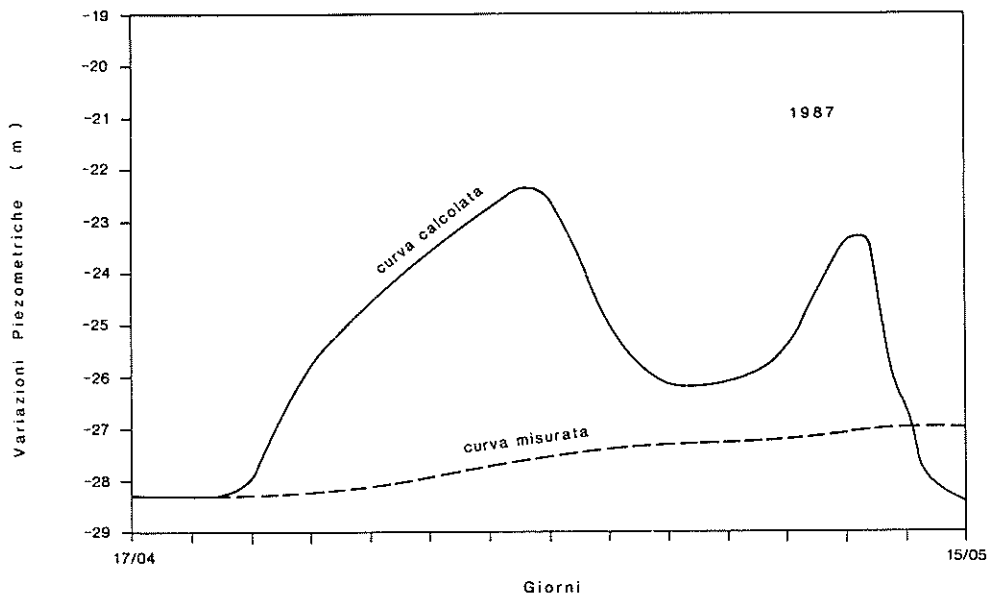


FIG. 32 - Andamento dei livelli piezometrici misurati e calcolati per l'evento dell'aprile 1987.

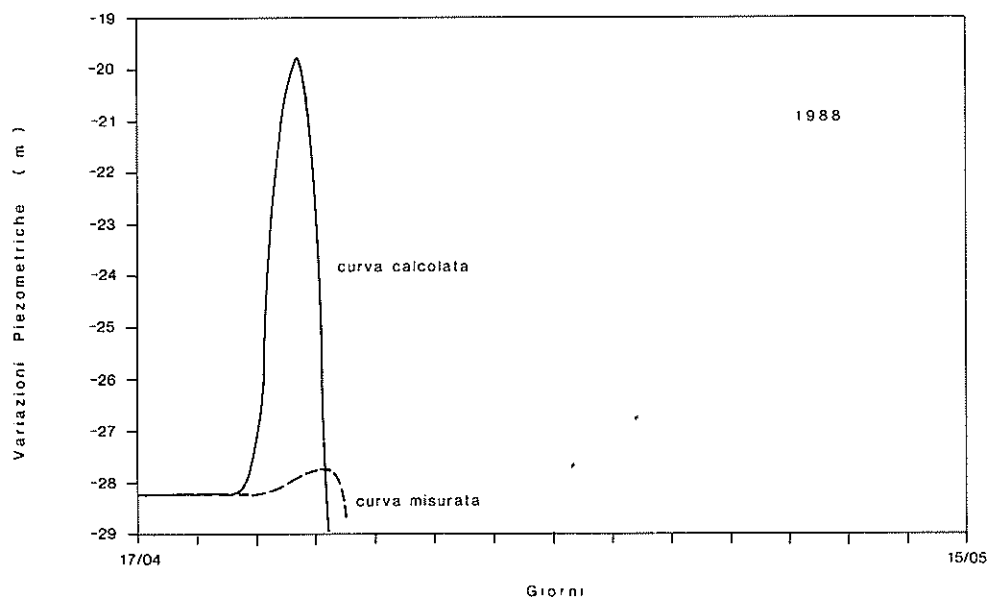


FIG. 33 - Andamento dei livelli piezometrici misurati e calcolati per l'evento dell'aprile 1988.

resistenza al taglio operativo *in situ*. Esso risulta intermedio tra i valori degli angoli di resistenza al taglio residuo ottenuti da prove di laboratorio ed eseguite rispettivamente su campioni di materiale morenico ( $\Phi'_R = 35^\circ$ ) e su campioni di materiale argilloso ( $\Phi'_R = 16^\circ$ ), questi ultimi prelevati in corrispondenza della superficie di scorrimento.

## CONCLUSIONI

Lo studio condotto sul presente caso di frana ha permesso di conoscere il suo meccanismo evoluti-

vo e, contemporaneamente, di valutare l'affidabilità del sistema automatico adottato per la registrazione dei dati.

Le indagini geomorfologiche preliminari e i rilievi geotecnici *in situ* eseguiti nell'area di frana per un periodo di circa sei anni, hanno portato ad individuare univocamente le condizioni idrogeologiche — al contorno e nel corpo di frana — necessarie per la rimobilitazione periodica di questa frana composta, con superficie di scorrimento marcatamente curvilinea nella parte superiore e rettilinea-suborizzontale nella parte inferiore.

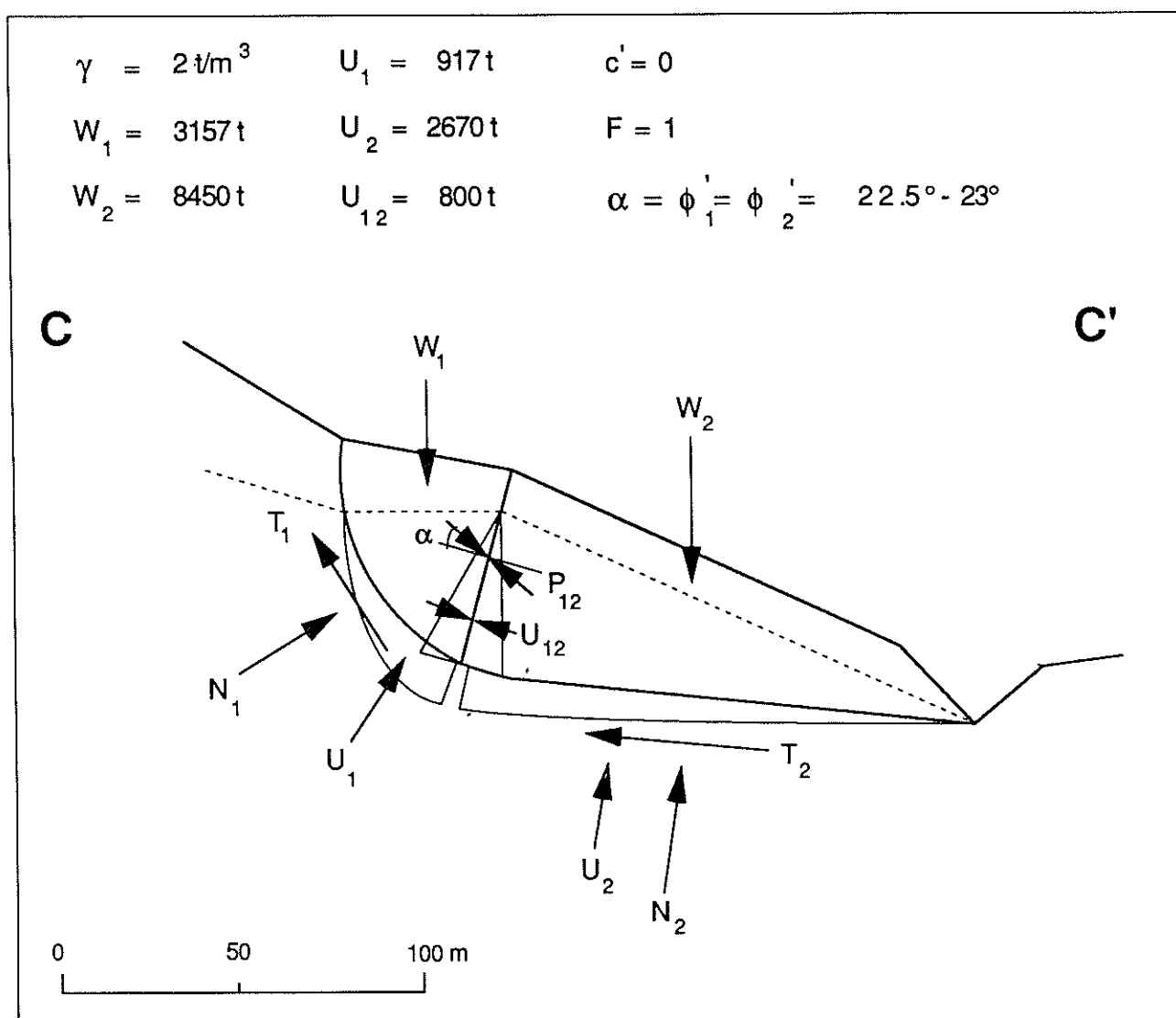


FIG. 34 - Verifica di stabilità con il metodo dell'equilibrio dei due prismi.

La strumentazione automatica ha permesso in particolare di individuare almeno due situazioni critiche per la stabilità e di ricostruirne l'evoluzione temporale in maniera continua.

L'utilizzo di piezometri con tempi di equalizzazione piuttosto lunghi ha fornito curve piezometriche tanto più discoste da quelle reali quanto più rapide sono state le variazioni di falda nel corpo di frana.

Nel caso presente, l'applicazione di una procedura numerica iterativa ha permesso di calcolare sia i tempi di risposta dei piezometri aperti (o tubi inclinometrici) sia i valori massimi dei livelli piezometrici raggiunti all'interno del corpo di frana durante le due suddette situazioni critiche.

Quest'ultima procedura, una volta implementata nelle stazioni automatiche di registrazione, permetterebbe di disporre in tempo reale dei valori piezometrici effettivamente operanti nei corpi di frana.

Poiché la fase parossistica dei grandi movimenti dei corpi di frana è quasi sempre preceduta da una fase di consistenti variazioni piezometriche, la conoscenza in tempo reale delle effettive variazioni piezometriche renderebbe utilizzabili i sistemi automatici di acquisizione dati in funzione di allertamento.

#### RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il DIPARTIMENTO FORESTE della Regione Veneto per avere messo a disposizione una serie di dati climatici relativi al bacino del torrente Cordevole. Un particolare ringraziamento viene rivolto al geom. R. CARAMPIN e al sig. G. PERUZZO per l'impegno profuso nel controllo della strumentazione e nella raccolta dei dati.

Si ringrazia inoltre il sig. V. FANZAGO per l'esecuzione della parte grafica. Il p.i. R. DALL'ACQUA per l'esecuzione delle indagini geofisiche e i sigg. L. FINOTTO, R. MINCHIO, G. MORI e L. PERAZZIN per l'esecuzione dei sondaggi meccanici.

## BIBLIOGRAFIA

- ANGELI M.-G., 1987 - *Strumentazione automatica nel controllo dei pendii instabili*. Workshop su: "Applicazioni di tecnologie nella conoscenza, nella previsione e nel pronto intervento in caso di movimenti franosi", I.R.O.E.,-C.N.R., Atti Fond. G. Ronchi, v. 62, pp. 99-113, Firenze.
- ANGELI M.-G., CARAMPIN R., MEARINI G., SILVANO S., 1984 - *An example of periodic reactivation of a landslide in morainic materials*. Proc. 2<sup>nd</sup> CNR-PAN meeting, v. 1, pp. 137-150, Torino.
- ANGELI M.-G., GASPARETTO P., PASUTO A., SILVANO S., 1989 - *Examples of landslide instrumentation (Italy)*. Proc. XII ICSMFE, v. 3, pp. 1531-1535, Rio de Janeiro.
- ANGELI M.-G., GASPARETTO P., SILVANO S., TONNETTI G., 1988 - *An automatic recording system to detect the critical stability conditions in slopes*. Proc. V ISL, v. 1, pp. 375-378, Lausanne.
- ANGELI M.-G., SILVANO S., 1987 - *Groundwater flow effects on a landslide body in morainic materials*. Proc. IX ECSMFE, v. 1, pp. 363-365, Dublin.
- CASTIGLIONI G.B., 1979 - *Geomorfologia*. Utet, 436 pp., Torino.
- GATTO G., VILLI V., CALEFFA G., 1984 - *Aspetti fisiografico-pluviometrici e processi erosivi in alveo del bacino del Cordevole (BL)*. St. Trent. Sc. Nat., v. 61, pp. 143-190, Trento.
- HVORSLEV M.J., 1951 - *Time-lag and soil permeability in ground water measurements*. Corps of Eng., WES, Bull. 36, Vicksburg.
- SEED H.B., SULTAN H.A., 1967 - *Stability analysis for a core embankment*. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, v. 93, SMA, pp. 69-84, New York.
- SKEMPTON A.W., HUTCHINSON J.N., 1969 - *Stability of natural slope and embankment foundation. State-of-the-Art Report*. Proc. VII ICSMFE, pp. 291-335, Mexico City.