Una frana in argilliti fratturate: la frana di Fontanaluccia nell'Appennino Modenese

A. CANCELLI *, E. NORA **, M. PELLEGRINI ***

SOMMARIO: È stato studiato un esteso movimento franoso riconducibile al modello tipo *slump-earthflow*, interessante argilliti fratturate ricoperte da depositi di versante, ubicato nell'Alto Appennino modenese. Lo studio ha comportato principalmente rilievi geologici, indagini geofisiche, sondaggi e analisi di laboratorio. Queste ultime hanno consentito di individuare, in corrispondenza delle superfici di scivolamento, argilliti contenenti un minerale interlaminato illite/montmorillonite, che conferisce al terreno valori degli angoli di resistenza al taglio particolarmente bassi, allo stato sia di completo rammollimento sia residuo. L'analisi di stabilità ha dimostrato che la parte più elevata del pendio in frana è soggetta a scivolamenti rotazionali lungo superfici cilindriche, in parte di neoformazione in seguito a rammollimento; l'ammasso scivolato, nella parte inferiore, degenera in una colata di terra. Lo studio ha messo in evidenza che la stabilizzazione della frana richiede essenzialmente il controllo delle pressioni interstiziali: queste ultime sono state depresse mediante trincee e aste drenanti sub-orizzontali.

1. Premessa

Nell'ambito del Progetto Finalizzato « Conservazione del suolo » - sottoprogetto « Fenomeni franosi », l'Unità Operativa dell'Istituto di Geologia di Modena (Responsabile A. COLOMBETTI) ha scelto alcune frane rappresentative fra quelle più comunemente diffuse nei bacini idrografici dei fiumi Secchia e Panaro o più significative dal punto di vista tipologico. Tra queste ultime si può annoverare quella che interessa l'abitato di Fontanaluccia, frazione del Comune di Frassinoro, nell'alto Appennino modenese (fig. 1).

Per la frana di Fontanaluccia, scelta per la sua particolare tipologia da studiare nell'ambito del sottoprogetto « Fenomeni franosi », esisteva anche un interesse socio-economico immediato, in quanto l'abitato era interessato, ormai da molti decenni — se non da secoli —, da gravi dissesti, resisi più intensi nel biennio 1977-78, tant'è vero che l'Amministrazione Provinciale di Modena e la Regione Emilia-Romagna (Ufficio del Genio Civile di Modena) avevano promosso una serie di indagini per evidenziare le cause del movimento franoso e gli eventuali rimedi. Lo studio di questa frana si è svolto utilizzando anche tutti i dati disponibili a seguito delle indagini geognostiche (sondaggi e prove di laboratorio) effettuate dagli Enti locali, con i quali si è instaurata a livello istituzionale una profonda e proficua collaborazione.

Lo studio è iniziato nei primi mesi del 1978 e si è avvalso dei seguenti metodi:

— ricostruzione storica degli eventi franosi che hanno interessato il territorio di Fontanaluccia;

— rilievi geologici (scala 1:5.000 e 1:25.000), idrogeologici e topografici (scala 1:1.000);

— osservazioni di foto aeree a colori a scala 1:13.500 circa (volo 1978 - Regione Emilia-Romagna);

— rilievi geofisici;

— esecuzione di sondaggi geognostici;

— indagini geotecniche di laboratorio;

— analisi mineralogica delle argille.

2. Studi precedenti

Le notizie sulla frana di Fontanaluccia risalgono al XIV secolo. Se ne trova traccia nella relazione di TAZZIOLI [1910]; altre informazioni si ricavano da ALMAGIÀ [1907]. Una nota preliminare sulla frana di Fontanaluccia è stata pubblicata a cura dell'Amministrazione Provinciale di Modena nell'ottobre del 1979.

Per quanto riguarda la geologia della zona, esiste un'abbondante letteratura ed una buona cartografia: a parte la Carta Geologica d'Italia

* Istituto di *Scienza e Tecnica delle Costruzioni*, Politecnico di Milano.

** Amministrazione Provinciale di Modena.

*** Istituto di *Geologia e Paleontologia*, Università degli Studi di Bologna.

Pubblicazione n. 182. Progetto Finalizzato « Conservazione del suolo » - Sottoprogetto « Fenomeni franosi » - responsabile U.O. A. COLOMBETTI, Istituto di *Geologia* dell'Università di Modena.

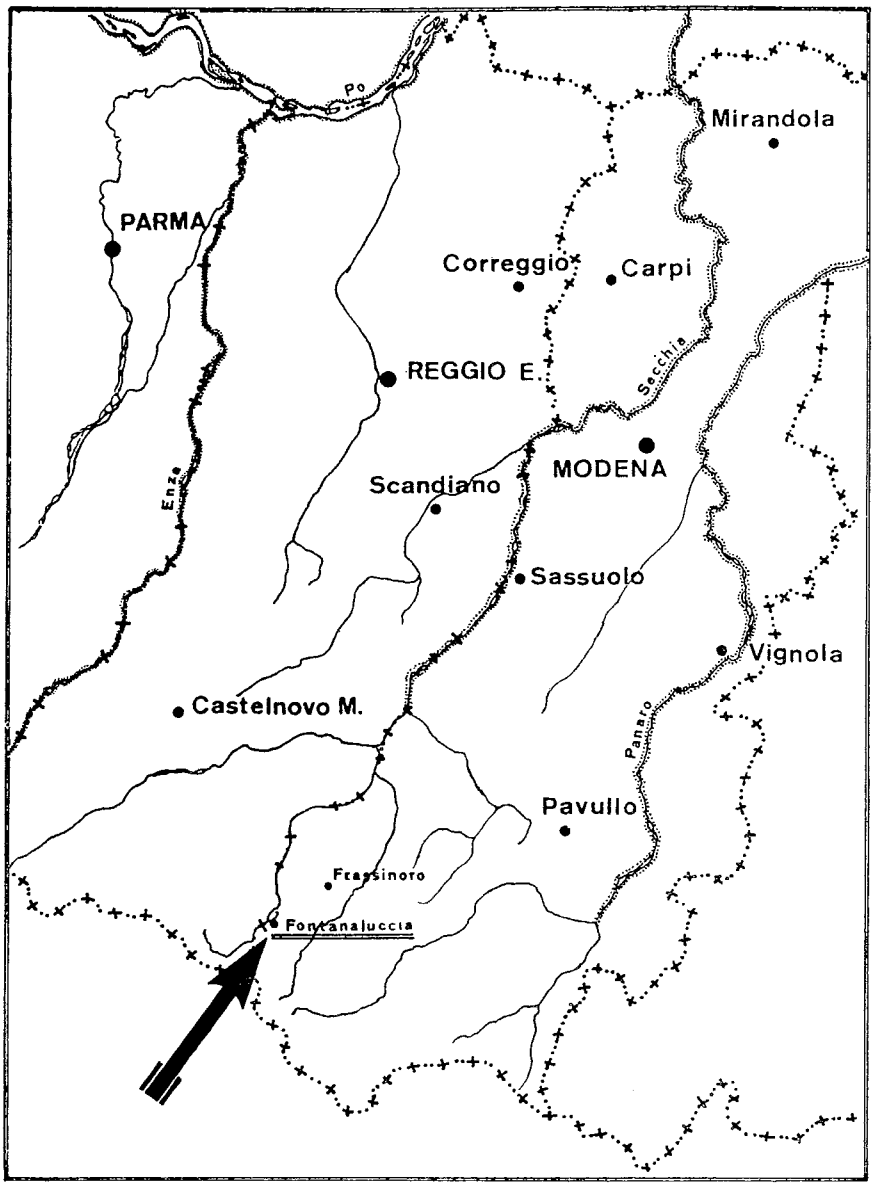

Fig. 1. - Carta d'orientamento.

alla scala 1:100.000 (F. 97) e le relative note illustrative, si può ricordare in modo particolare la pubblicazione di BERTOLLI e NARDI [1966], accompagnata da una carta geologica a colori alla scala 1:25.000. Da un punto di vista litologico e geomeccanico la carta sopra citata può essere assunta come base per il presente lavoro. Tuttavia occorre ricordare che successivamente RENTZ [1971], tenendo conto dei più recenti sviluppi della conoscenza della geologia appenninica, ha fornito per la zona di Fontanaluccia un più attendibile inquadramento stratigrafico e tettonico come d'altra parte compare anche nella nota di sintesi di DALLAN NARDI e NARDI [1972] sull'Appennino settentrionale.

Per quanto riguarda la cartografia regionale delle frane, si può ricordare la nota di BONAZZI *et al.* [1972].

3. Inquadramentoo geografico e geologico

Il paese di Fontanaluccia ricade sul territorio comunale di Frassinoro, provincia di Modena (Fig. 1), ed è rappresentato nella tavoletta I.G.M. « Frassinoro » (97 IV N.O.). Esso è situato ad una quota di poco meno di 900 m s.l.m. e si articola in più nuclei abitati, tutti posti sul versante nord di M. Roncadello (Fig. 2).

Da un punto di vista orografico, Fontanaluccia è situata nella zona di confine tra il medio

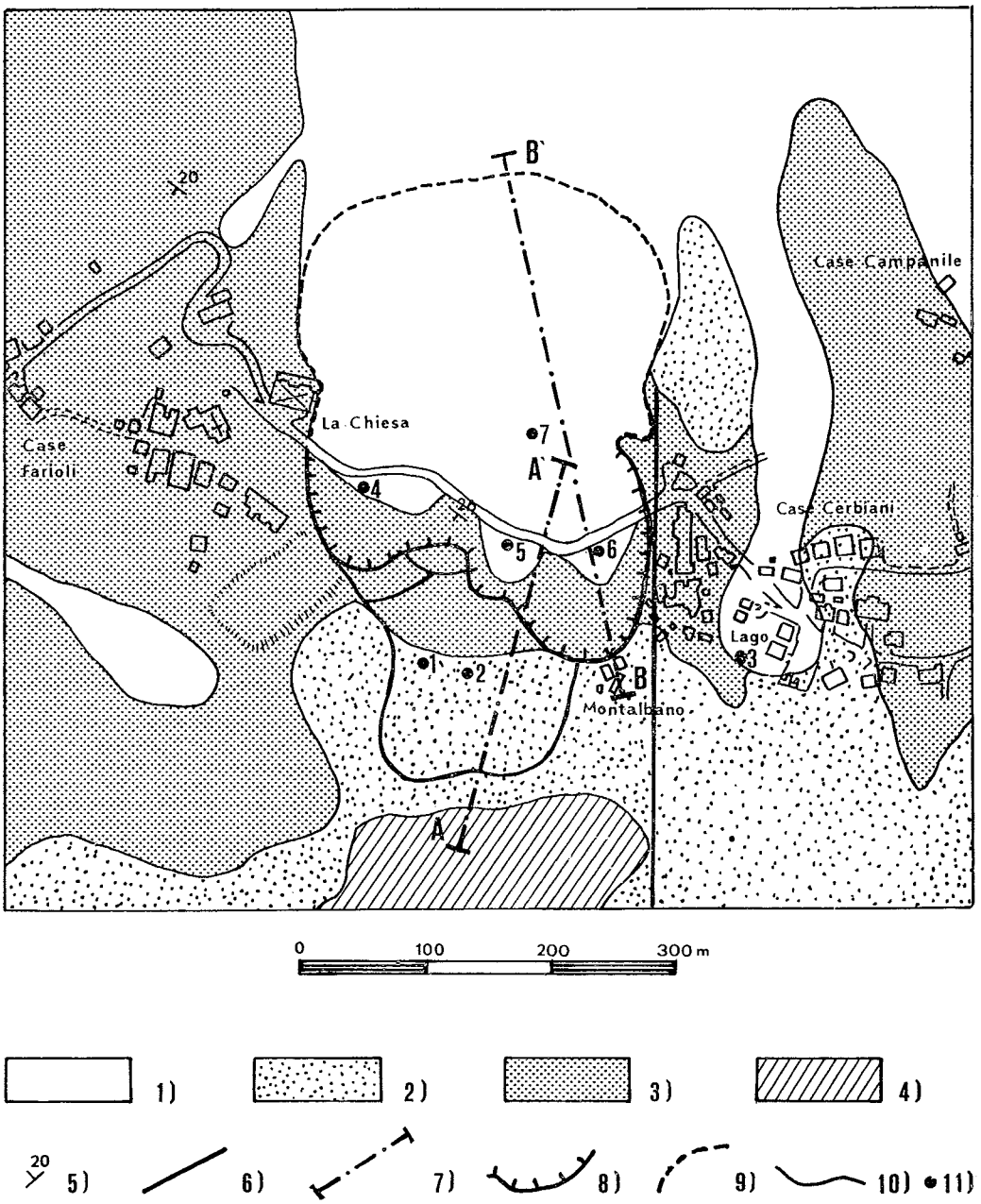

Fig. 2. - Carta geologica dell'abitato di Fontanaluccia (Modena). Legenda: 1) accumuli di frana; 2) depositi di versante; 3) formazione delle Marne di Sestola-Vidiciatico (Langhiano sup.-Serravalliano), facies olistostromica; 4) Arenarie di Monte Cervarola (Aquitaniano-Langhiano sup.); 5) giacitura degli strati; 6) faglie; 7) traccia delle sezioni di fig. 5; 8) scarpate principali di frana; 9) margine inferiore della colata più recente; 10) fratture nel terreno, maggiormente evidenti nel settore di coronamento della frana; 11) sondaggi geognostici e pozzi piezometrici.

e l'alto Appennino modenese. Questo, infatti, inizia con la dorsale di M. Beccara - M. Roncadello, posta immediatamente a sud dell'abitato.

La zona di Fontanaluccia appartiene al bacino idrografico del fiume Secchia e, più precisamente, al sottobacino del torrente Dolo, che a valle del paese forma il Lago omonimo, creato artificialmente nel 1926 mediante una diga di 60 m di altezza.

Dal punto di vista geologico, nella zona compresa tra Monte Giovarello, i Poggi di Fontanaluccia ed il Lago ritroviamo formazioni riferibili all'Unità di Monte Modino - Monte Cervarola della Serie Emiliana Paraautoctona (fig. 3). Più specificamente nel settore compreso tra i Poggi di Fontanaluccia ed il Lago affiorano le Arenarie di Monte Cervarola (Aquitaniano-Langhiano sup.) ed una formazione

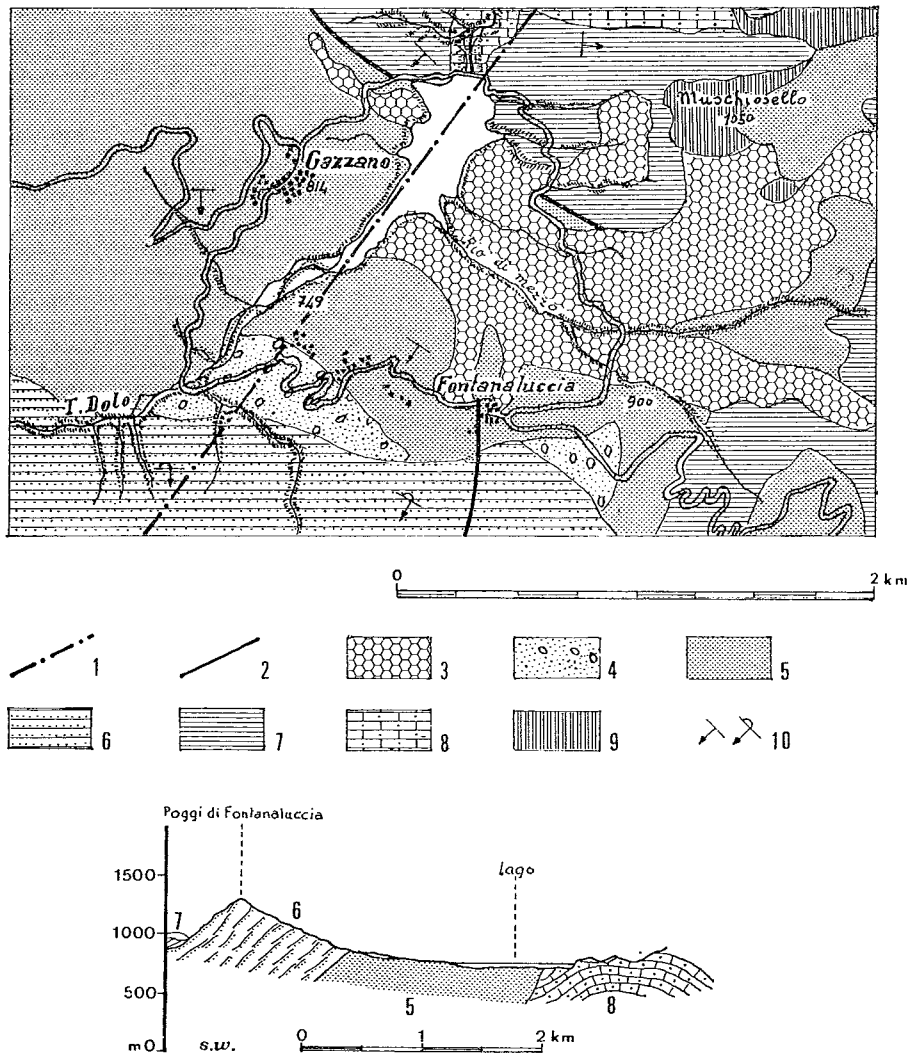

Fig. 3. - Carta geologica schematica del territorio circostante l'abitato di Fontanaluccia (Modena), alla scala 1:25000 con profilo alla scala 1:50000, da BERTOLLI e NARDI (1966) ridisegnata e modificata. Legenda: 1) traccia della sezione; 2) faglie; 3) accumuli di frana; 4) depositi di versante; 5) Marne di Sestola-Vidiciatico (Langhiano sup.-Serravalliano); 6) Arenarie di Monte Cervarola (Aquitaniano-Langhiano sup.); 7) Marne di Pievepelago (Oligocene sup.-Miocene inf.); 8) Arenarie di Monte Modino (= Macigno p.p.-Oligocene sup.); 9) Flysch a Elmintoidi calcareo-marnoso (Cretaceo sup.); 10) giacitura degli strati.

complessa, prevalentemente argillosa che BERTOLLI e NARDI [1966] indicano con il termine generico di « argille scagliose indifferenziate »; i rapporti di posizione tra le due formazioni compaiono nella sezione geologica di fig. 3, sempre ripresa da BERTOLLI e NARDI [1966]. Secondo RENTZ [1971], questa formazione argillosa corrisponde ad un'intercalazione olistostromica a tetto delle Arenarie di M. Cervarola e alle Marne di Sestola-Vidiciatico (Langhiano sup. - Serravalliano).

I Poggi di Fontanaluccia costituiscono il fianco settentrionale di una piega rovesciata e vergente verso nord; questa particolare situazione stratigrafica e strutturale rappresenta una delle cause fondamentali che hanno determinato il formarsi della frana di Fontanaluccia. È noto infatti che la sovrapposizione geometrica di una formazione fliscioide, e dei depositi di versante ad essa connessi, su di un substrato argilloso meno permeabile, corrisponde ad una situazione idrografica tra le più comuni che favoriscono il formarsi di frane.

Il contatto tra le arenarie e le argilliti è definito sul terreno, oltre che da un netto contrasto morfologico, anche dal limite tra bosco (castagno da frutto) e prato stabile, che si osserva a monte del paese; tale contatto costituisce un orizzonte sorgentifero e corrisponde in pratica al coronamento della frana.

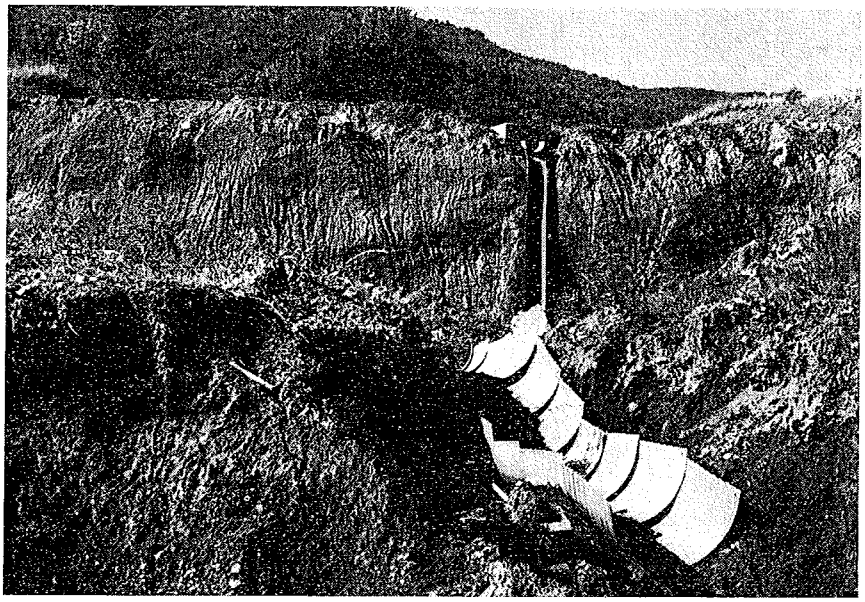

Fig. 4. - Scarpata principale della frana di Fontanaluccia, nel settore Est (Case Cerbiani).

4. Evoluzione dei movimenti franosi nella zona di Fontanaluccia

Secondo TAZZIOLI [1910], in epoca imprecisata l'abitato di Fontanaluccia, o almeno la sua chiesa, si trovava in una località posta ad est di Poggio Muschiosello, ad una quota assai più elevata rispetto al livello dell'attuale bacino artificiale. A causa di frane che, sempre in epoca imprecisata, distrussero anche la chiesa, quest'ultima nel 1300 si trovava in corrispondenza dell'attuale toponimo « Chiesa Vecchia »; nel 1674, sempre a causa di una frana, la chiesa « minacciava completa rovina ». Per questo motivo nel 1678 la Chiesa fu riedificata in località « Campanile Vecchio », dove esattamente un secolo dopo essa si presentava ampiamente lesionata, tanto che nel 1800 si dovette ricostruire ex-novo il campanile. Nel febbraio del 1832 il nuovo campanile era nuovamente lesionato: infatti in quel periodo il cosiddetto « Lago di Fontanaluccia » (1), depressione ancor oggi visibile presso Case Cerbiani, si era svuotato, essendosi formata una grossa frana che distrusse, oltre l'edificio della chiesa, altre case del paese e che raggiunse con il proprio accumulo l'alveo del torrente Dolo (Figg. 3 e 6).

In questi ultimi decenni la frana si è praticamente mossa di continuo, ampliandosi sul lato ovest e soprattutto su quello sud, cioè verso monte, tanto che le case di Montalbano sono parzialmente crollate. Attualmente la frana sta interessando Case Cerbiani e si sta ampliando verso il cimitero e nella zona del Campo sportivo (Figg. 2 e 4).

Come ultima notizia, relativamente alla frana di Fontanaluccia, si può ricordare che con R.D. n. 1319 del 24 settembre 1931, l'abitato venne dichiarato da consolidare, in base alla legge n. 445 del 9 luglio 1908.

(1) Da non confondere con l'attuale bacino artificiale. Si trattava di un ristagno d'acqua a forma subcircolare, di 50 m di diametro, che occupava la contropendenza a coronamento della frana.

5. Idrogeologia

L'elemento idrogeologico più importante è rappresentato dalla sovrapposizione geometrica delle arenarie dell'Unità di Monte Modino-Monte Cervarola e delle coltri detritiche ad esse associate sulle formazioni argillose stratigraficamente a tetto delle arenarie. L'arenaria — ed anche le relative coltri detritiche — pur possedendo un basso grado di permeabilità, è comunque più permeabile delle sottostanti argilliti; la linea di contatto è infatti contrassegnata da una serie di piccole sorgenti, da una delle quali deriva in parte la propria alimentazione lo stesso abitato di Fontanaluccia.

Altre emergenze d'acqua si rinvengono all'interno del corpo di frana, in corrispondenza di fratture che interessano le argilliti, e derivano dalle acque di infiltrazione provenienti dalle arenarie e dai depositi di versante soprastanti. La portata di tutte queste sorgenti è assai va-

riabile in relazione agli andamenti stagionali; l'unica di tipo perenne è quella captata dall'acquedotto.

Emergenze ricavate artificialmente, in quanto collegate a trincee drenanti, sono quelle della depressione presso Case Cerbiani, ove esisteva un tempo anche un certo numero di pozzi, oggi in gran parte in disuso; essi avevano, però, la funzione di serbatoio per le acque piovane o tutt'al più drenavano la modesta falda ospitata nei materiali detritici o nelle argilliti fratturate, nei primi 2-4 metri di profondità.

I pozzi piezometrici (diametro 12 cm) costruiti in corrispondenza dei sondaggi geognostici 1 e 2 (Fig. 2) hanno evidenziato presenza di acqua con livelli statici a $-4{,}30$ e $-5{,}80$ m dal p.c.; sottoposti a prova di pompaggio hanno fornito portate dell'ordine di $0{,}3 \div 1$ l/s. Da notare che le prove sono state effettuate dopo un periodo siccitoso particolarmente lungo (almeno 90 giorni consecutivi). Anche durante lo scavo delle trincee drenanti, nell'area di coronamento a monte dell'abitato, ad una profondità di circa 6 m si è notata un'intensa circolazione di acqua.

Da quanto sopra descritto appare evidente che esiste una discreta possibilità di circolazione idrica non solo entro le arenarie e le coltri detritiche, ma anche entro le argilliti fratturate.

6. Geometria del corpo di frana

La frana di Fontanaluccia, nel suo insieme, può suddividersi in tre settori principali: il settore di coronamento, ove compaiono fenditure trasversali al pendio, con spostamenti per ora estremamente limitati; quello mediano, compreso tra i cigli della scarpata principale, sottostante all'abitato (q. 900) e al campo sportivo (angolo di inclinazione del pendio $\beta = 9 \div 11°$); infine il settore inferiore, che raggiunge l'alveo del T. Dolo, attualmente occupato dall'invaso artificiale e che corrisponde all'accumulo di un'antica colata, oggi apparentemente stabilizzata ($\beta < 7°$). L'intero versante è esposto a nord.

La frana attualmente in movimento si articola in due parti distinte, delineate da ripidi orli di scarpata a forma arcuata, che separano la parte inferiore, il cui materiale di distacco forma una colata (*earthflow*), da una parte superiore le cui argilliti sono interessate da superfici di scorrimento mistilinee (sez. A-A′ in fig. 5).

La frana ha le seguenti dimensioni: lunghezza complessiva, dal contatto argilliti-arenarie sino al torrente Dolo, 1.000 m circa; lunghezza del settore di coronamento in media 150 m; lunghezza della parte mediana (*earthflow*) circa 350 m; larghezza massima in corrispondenza della scarpata principale 400 m.

Il rapporto fra lunghezza L e larghezza B ($L/B \simeq 3$) della colata è inferiore rispetto ai valori comunemente citati in letteratura [cfr. ad es. SKEMPTON e HUTCHINSON, 1969] e a quelli solitamente riscontrabili nelle colate italiane e in particolare del versante padano dell'Appennino [cfr. ad es. BONAZZI *et al.*, 1972]. D'altra parte la forma a doppio circo della scarpata principale sembra suggerire una coalescenza tra due colate parallele, originariemente distinte.

Gli spessori del corpo di frana sono di circa 15-20 m nella parte alta, dove le argilliti fratturate sono interessate da superfici di scivolamento appena delineate; entro la colata sono invece variabili da pochi metri, alla base della scarpata principale, sino ad oltre 30 m al piede dell'accumulo del T. Dolo.

La ricostruzione geometrica del corpo di frana, così come appare nei profili della fig. 5, è stata effettuata sulla base di un rilievo di dettaglio del corpo franoso, di indagini geotecniche e geofisiche di tipo sismico e geoelettrico (2). La sismica è stata effettuata con metodo a rifrazione (strumento BISON 1570 C); gli stendimenti si sono sviluppati per una lunghezza di circa 40 m e sono stati disposti in senso sia longitudinale che trasversale nella parte alta della frana: si sono registrati valori di velocità sempre inferiori a 1700 m/s, tipici della parte più alterata delle argilliti, inferiori quindi a quelli dei materiali posti al di sotto delle superfici di scorrimento.

L'indagine geoelettrica è stata effettuata con un voltmetro elettronico transistorizzato a corrente continua con dispositivo elettrodico a quadripolo di tipo Schlumberger. Le curve ottenute si possono genericamente definire di tipo discesa-discesa: sino a $3 \div 7$ m di profondità si sono registrati valori di resistività di $35 \div 100$ ohm · m, probabilmente corrispondenti allo strato aerato (depositi di versante e materiale rimaneggiato). Fino a profondità comprese tra 5 e 19 m si ha uno strato di materiale con resistività comprese tra 20 e 25 ohm · m, che potrebbe corrispondere — conformemente

(2) Le indagini geofisiche sono state effettuate e interpretate da A. COLOMBETTI e G. SALTINI, dell'Istituto di *Geologia* dell'Università di Modena.

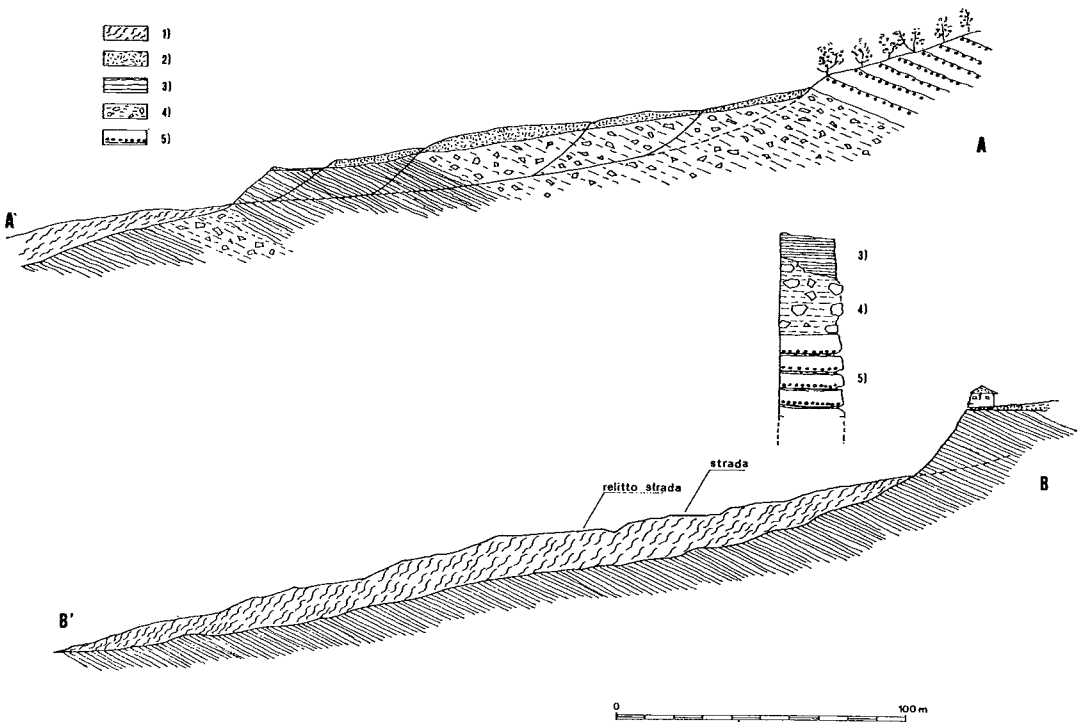

Fig. 5. - Sezioni geologiche della frana di Fontanaluccia. Legenda: 1) corpo della colata; 2) depositi di versante; 3) argilliti (formazione delle Marne di Sestola-Vidiciatico); 4) argilliti con blocchi calcarei, a giacitura caotica o con stratificazione incerta (facies olistostromica delle Marne di Sestola-Vidiciatico); 5) Flysch arenaceo (Arenarie di Monte Cervarola).

alla ricostruzione effettuata sulla base del rilevamento geologico — allo spessore della facies olistostromica geometricamente sovrastante alle Marne di Sestola-Vidiciatico. I materiali di fondo, corrispondenti al substrato di argilliti non coinvolte dal movimento franoso, mostrano generalmente resistività apparenti comprese tra 15 e 20 ohm · m.

La definizione della geometria del movimento franoso è stata infine completata sulla base di 9 sondaggi geognostici, in parte a carotaggio continuo e in parte a distruzione di nucleo, ubicati prevalentemente nella parte alta e mediana della frana (fig. 2). Alcuni dei sondaggi sono stati trasformati in pozzi, con possibilità di misura del livello piezometrico della falda e di eventuali prove di pompaggio. I sondaggi nella parte alta della frana hanno evidenziato la seguente successione litologica:

— da piano campagna a 4 ÷ 7 m: depositi di versante (arenarie, calcari e marne in matrice argilloso-sabbiosa);

— da 4 ÷ 7 a 9 ÷ 17 m: argilliti con blocchi calcarei, a giacitura caotica (facies olistostromica);

— da 9 ÷ 17 a oltre 25 m: argilliti di colore grigio scuro (Marne di Sestola-Vidiciatico).

7. Proprietà geotecniche dei terreni

I campioni prelevati sono stati sottoposti, nel Laboratorio Geotecnico annesso all'Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni del Politecnico di Milano, alle seguenti prove:

— analisi granulometrica;

— determinazione del contenuto d'acqua allo stato naturale w_o;

— determinazione dei limiti di liquidità e di plasticità (w_L e w_P);

— determinazione dei pesi di volume (allo stato naturale γ e secco γ_d);

— prove triassiali per la determinazione dell'angolo di resistenza al taglio in condizioni di completo rammollimento φ'_s;

— prove di taglio diretto per la determinazione dell'angolo di resistenza residua φ'_r.

I risultati di tutte le prove sono stati riassunti nel profilo geotecnico del sottosuolo riportato in fig. 7. Per il sondaggio 1 risulta la seguente successione stratigrafica:

A) *fino a 7,5 m*: depositi di versante costituiti da limo sabbioso e argilloso, inglobante pie-

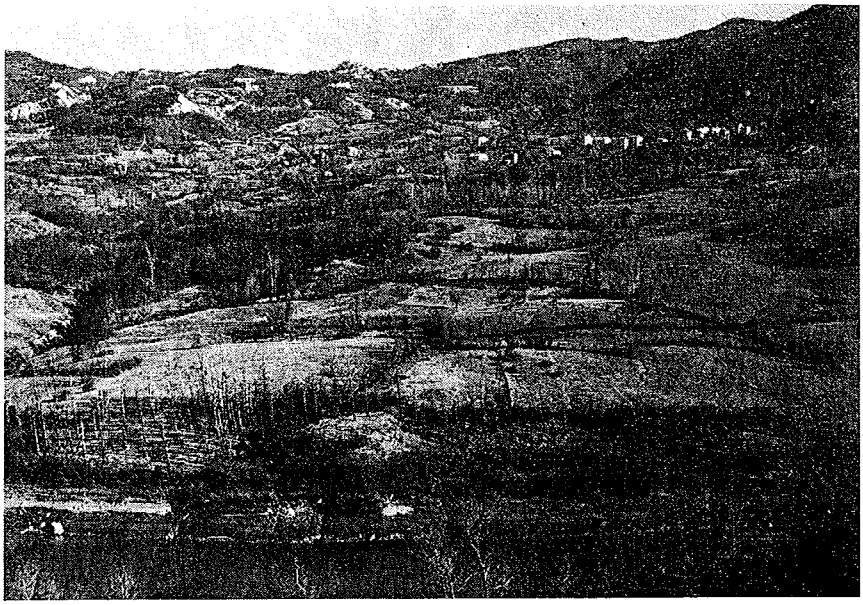

Fig. 6. - Accumulo della colata della frana di Fontanaluccia, lungo il torrente Dolo.

trisco e ciottoli di natura calcarea e arenacea; colore variabile da grigio a bruno;

B) *da 7,5 a 17 m*: argilliti di color grigio piombo, intensamente fratturate, con inclusi trovanti di natura calcarea e arenacea;

C) *da 17 a 25 m*: argilliti alternate a marne, di color grigio piombo, intensamente fratturate.

Sia i depositi di versante che le sottostanti argilliti e marne della formazione di Sestola-Vidiciatico hanno mostrato un limite di liquidità compreso tra 24 e 34% ed un indice di plasti-

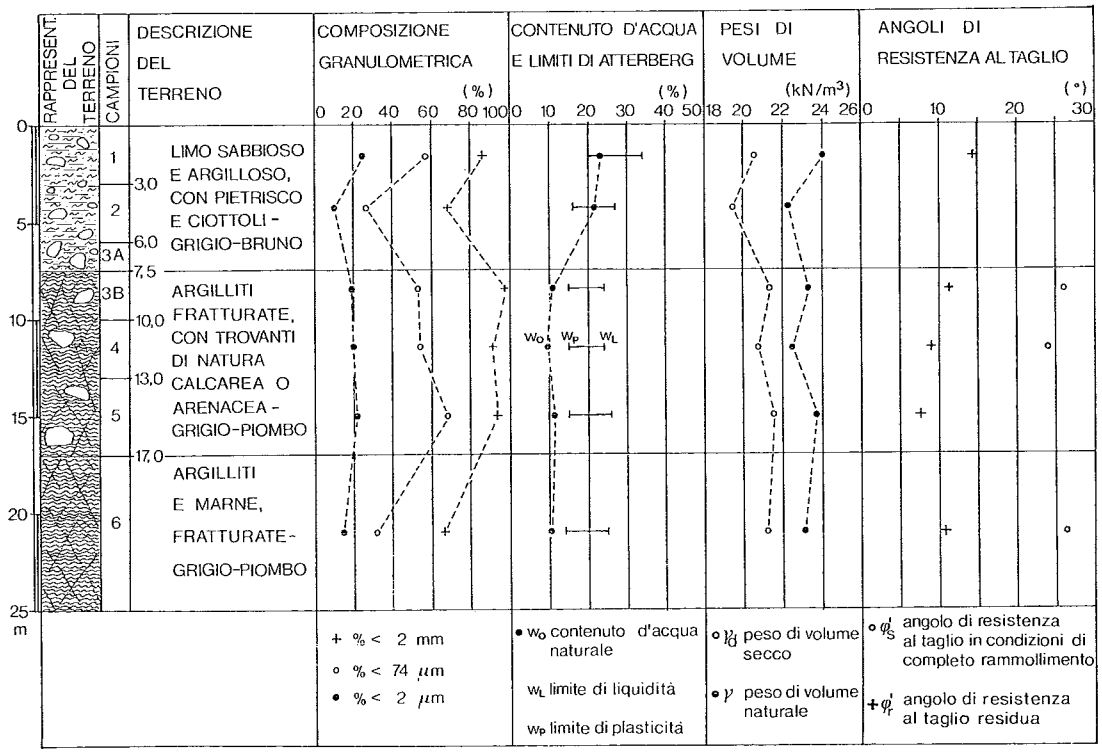

Fig. 7. - Profilo geotecnico nel sondaggio 1.

cità variabile dal 9 al 14%: secondo lo Unified Soil Classification System tali terreni rientrano nella categoria CL (« argille di bassa plasticità »: fig. 8). L'indice di attività della frazione argillosa è risultato sempre inferiore a 0,75 (« argille inattive »: fig. 9), con valore medio intorno a 0,5.

Il contenuto d'acqua naturale è risultato di poco superiore al limite di plasticità nei depositi di versante, sempre inferiore nelle argilliti non dislocate da movimenti gravitativi è possibile tuttavia che in corrispondenza delle fratture si possano riscontrare valori superiori.

Il peso di volume naturale, sempre compreso in tutti i campioni tra 22 e 24 kN/m^3, può essere assunto mediamente pari a 23 kN/m^3.

L'angolo di resistenza al taglio in condizioni di completo rammollimento φ'_s è stato determinato mediante prove triassiali consolidate isotropicamente — non drenate, con misura della pressione neutra per tutta la durata della prova, su provini di terreno rimaneggiato; tale metodo fornisce, secondo SKEMPTON [1970], valori di φ'_s sufficientemente attendibili. Questa determinazione, priva di significato nei terreni colluviali, è stata eseguita solamente su 3 campioni di argilliti e marne: sono stati ottenuti valori di φ'_s compresi tra 24 e 26°, con coesione intercetta c'_s sempre inferiore a 25 kPa (fig. 10). I valori misurati sono sensibilmente inferiori a quelli che si otterrebbero in base alle ben note relazioni sperimentali con l'indice di plasticità proposte rispettivamente da KENNEY [1959] e BJERRUM e SIMONS [1960], come appare in fig. 11.

L'angolo di resistenza al taglio residua φ'_r è stato misurato secondo il metodo proposto da KANJI [1974], mediante prove di taglio diretto lungo un contatto suolo/roccia su provini di terreno rimaneggiato. Per i depositi di versante è stato ottenuto un valore di φ'_r pari a 14,3°, in pieno accordo con la correlazione sperimentale tra φ'_r e I_p proposta dallo stesso KANJI (fig. 11); per le argilliti e le marne fratturate sono stati ottenuti invece valori sensibilmente inferiori, compresi tra 7,5 e 11,3° (fig. 10): tali valori sono notevolmente inferiori a quelli de-

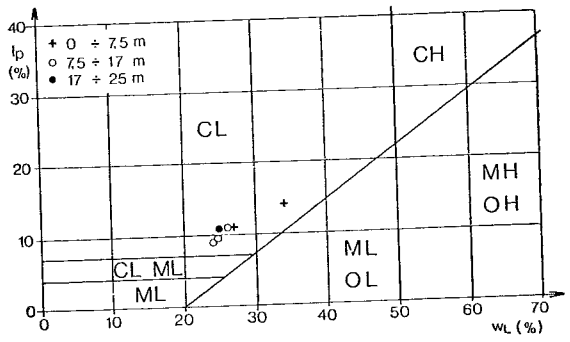

Fig. 8. - Carta di plasticità (w_L = limite di liquidità I_P = indice di plasticità).

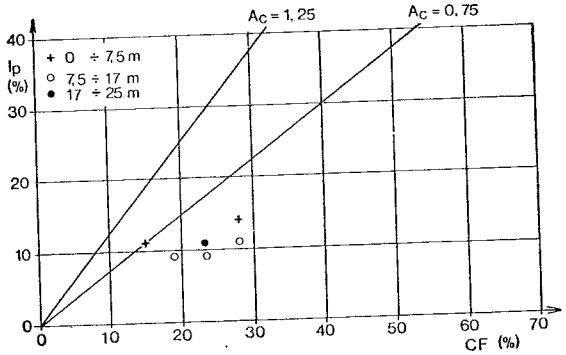

Fig. 9. - Carta di attività della frazione argillosa (CF = percentuale di terreno avente diametro minore di 0,002 mm).

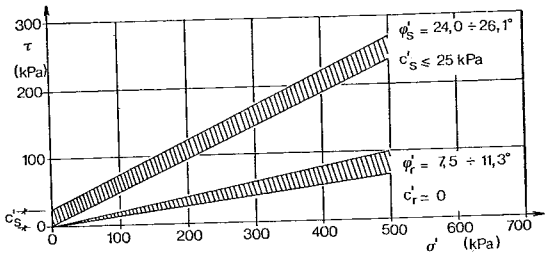

Fig. 10. - Inviluppi dei risultati delle prove di resistenza al taglio.

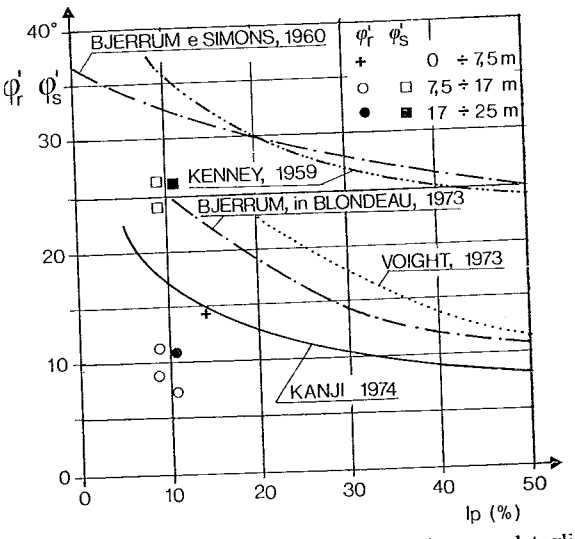

Fig. 11. - Correlazione fra gli angoli di resistenza al taglio e l'indice di plasticità.

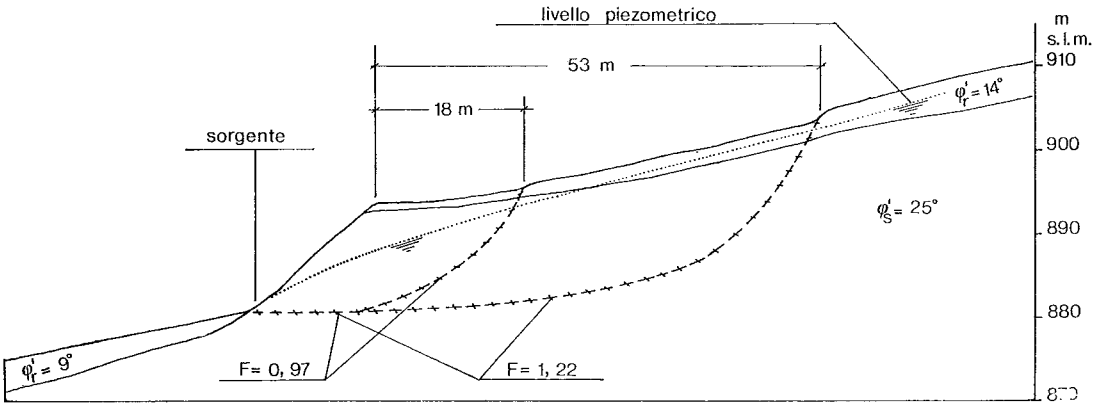

Fig. 12. - Condizioni al contorno (geometriche e idrogeologiche) assunte per le analisi di stabilità.

rivanti dalle correlazioni sperimentali riportate in fig. 11.

Per cercare di spiegare i motivi di un comportamento così apparentemente anomalo, i campioni del sondaggio 1 sono stati sottoposti ad analisi mineralogica nell'Istituto di Mineralogia dell'Università di Modena, sotto la direzione del Prof. A. ALIETTI.

I campioni da analizzare sono stati suddivisi in frazioni granulometriche separate, così individuate: < 2 mm; 0,42 ÷ 2 mm; 0.074 ÷ 2 mm; $< 0{,}074$ mm.

Sulla frazione passante a 2 mm sono state eseguite le analisi quantitative: i carbonati sono stati dosati con calcimetro ed il quarzo mediante determinazioni al diffrattometro a raggi X. Sugli stessi campioni sono state eseguite analisi roentgenografiche per individuare i minerali presenti e dare una valutazione sui loro rapporti quantitativi.

Tutti i dati sono stati riportati nella Tabella I, con la precisazione che quelli relativi ai carbonati e al quarzo sono reali purché frutto di determinazioni quantitative, mentre le altre sono risultate da stime quantitative indirette (in quanto non sono possibili valutazioni quantitative dirette su miscele di minerali argillosi mediante Raggi X).

Limitatamente al campione 5 sono state eseguite riprese diffrattometriche su tutte le frazioni granulometriche, dalle quali risulta che non esistono sensibili variazioni di composizione in funzione della granulometria.

Dall'esame della Tabella I si nota che:

— nei campioni provenienti dai depositi di versante la percentuale dei minerali argillosi è

TABELLA 1

VALORI PERCENTUALI DEI MINERALI CONTENUTI NELLA FRAZIONE PASSANTE AL SETACCIO DI LUCE 2 mm

Tipo di terreno		Depositi di versante		Argilliti			Argilliti di marne
Minerale \ Campione		1	2	3B	4	5	6
MINERALI ARGILLOSI	Clorite	10	15	5,5	10	5	8
	Illite	10	12	—	—	—	—
	Interlaminato I/M	—	—	25	25	25	12
	Caolinite	15	10	25	20	18	30
MINERALI NON ARGILLOSI	Calcite	—	—	2,5	0,25	3,8	18
	Dolomite	—	—	2,0	0,25	—	—
	Quarzo	45,0	48,5	27,0	38,5	43,0	25,0
	Feldspato	20	15	13	5	5	7

inferiore a 40, mentre nelle rocce argillitiche si avvicina o supera il 50% del totale;

— il feldspato, presente in percentuale notevole nei depositi di versante e nella parte superficiale del substrato argillitico, diminuisce notevolmente nei campioni più profondi;

— il quarzo è sempre presente in percentuali elevate;

— la calcite, assente o scarsamente presente sia nei depositi di versante che nelle argilliti, raggiunge una percentuale notevole solo nel campione marnoso (campione 6);

— fra i minerali argillosi: la clorite è presente in modo piuttosto costante in tutti i campioni; la caolinite è sempre presente in percentuali rilevanti; l'illite è presente da sola nei depositi di versante, mentre nelle argilliti è sempre associata al minerale interlaminato illite/montmorillonite; la montmorillonite vera e propria (smectite) è sempre assente.

La presenza nelle argilliti del minerale interlaminato I/M, avente un comportamento simile a quello della montmorillonite, può giustificare i modesti valori degli angoli di resistenza al taglio misurati in questi terreni.

8. **Analisi del dissesto**

L'insieme delle indagini effettuate (geofisiche, geognostiche e geotecniche) non fa che confermare la ricostruzione geometrica del movimento franoso derivante da un'accurata indagine geomorfologica di superficie: esso è definibile come uno spostamento di blocchi lungo superfici rotazionali ad ampio raggio di curvatura, evolventesi verso valle in colata di fango. Si tratta di una tipologia poco conosciuta nell'Appennino Settentrionale, almeno se si fa riferimento all'ampiezza dell'area di alimentazione, entro la quale si mantengono riconoscibili le superfici rotazionali. Infatti nelle frane generalmente definite come « earthflows » questa zona si sviluppa per poche decine di metri.

Le condizioni di equilibrio del pendio sono governate essenzialmente dalla resistenza al taglio a lungo termine (in condizioni « drenate ») e dalla posizione del livello di falda.

Le cause della formazione di questa frana sono essenzialmente di tipo naturale, connesse non solo con le caratteristiche climatiche della zona, ma soprattutto con la natura dei materiali (argilliti fratturate) ed anche con le condizioni stratimetriche delle formazioni affioranti. A quest'ultimo proposito infatti si deve ricordare la sovrapposizione geometrica delle Arenarie di Monte Cervarola e dei depositi di versante ad esse connessi sulle sottostanti argilliti della Formazione di Sestola-Vidiciatico: questi rapporti di giacitura, cioè formazione più permeabile poggiante su una pressoché impermeabile, favoriscono la fuoriuscita di acque alla base del versante detritico e/o arenaceo.

L'acqua, com'è ben evidente sulle pareti dei fronti di frana e negli scavi effettuati, s'infiltra nelle fratture delle argilliti, con duplice effetto:

— rammollimento (*softening*), con annullamento della coesione e riduzione dell'angolo di resistenza al taglio ad un valore φ'_s valutabile (sulla base delle analisi di laboratorio) in circa $24 \div 26°$;

— incremento della pressione interstiziale lungo la potenziale superficie di scivolamento, con riduzione degli sforzi normali efficaci e conseguentemente della resistenza al taglio lungo la superficie stessa.

In occasione di condizioni meteorologiche particolarmente sfavorevoli (periodo di intense precipitazioni, scioglimento delle nevi), l'incremento della pressione interstiziale è tale da ridurre la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie di scorrimento potenziale al valore dello sforzo tangenziale medio mobilitato lungo la superficie medesima: si verifica allora uno scivolamento rotazionale, con il conseguente arretramento del fronte di frana.

Ciascun movimento coinvolge in tempi successivi masse argillitiche estese solo poche decine di metri a monte del ciglio della scarpata principale. Ricordando la sezione A-A' in fig. 5, è stata verificata la stabilità di due masse argillitiche delimitate da altrettante fratture trasversali rilevate rispettivamente a 18 e 53 m dal ciglio della scarpata attuale.

Nell'analisi si è tenuto conto di una resistenza al taglio rispettivamente data da

$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi'_r \qquad (1)$$

nei depositi di versante e da

$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi'_s \qquad (2)$$

nelle argilliti fessurate allo stato di completo rammollimento (coesione $c'_s \simeq 0$); le condizioni al contorno (geometriche e idrogeologiche) sono sintetizzate in fig. 12; l'analisi è stata condotta con il « metodo di Janbu semplificato » [JANBU *et al.*, 1956].

I risultati dell'analisi mostrano che solo la porzione del versante più prossima al ciglio si trova in precarie condizioni di equilibrio (fattore di sicurezza $F \simeq 1$); la scarpata deve la sua attuale stabilità probabilmente al fatto che la coesione non si è ancora totalmente annullata lungo tutta la superficie di scivolamento. Quanto alla porzione più lontana, il suo scivolamento avrà luogo solo dopo la completa degenerazione in colata dell'ammasso precedentemente franato.

Un volta avvenuto il primo scivolamento, le grandi deformazioni provocano la riduzione della resistenza al taglio al valore residuo (coesione c'_r nulla, angolo φ'_r variabile da $7 \div 8°$ fino ad un massimo di circa 11°). Ciò comporta la degenerazione dell'ammasso franato in colata di fango (*earthflow*), il cui profilo d'equilibrio temporaneo ha appunto un'inclinazione $\beta = 9 \div 11°$ rispetto all'orizzontale (cfr. sezione B-B' in fig. 5).

Tuttavia la colata è pur sempre in movimento, almeno nella parte superiore, dove si deve poter ammettere una filtrazione d'acqua in direzione parallela al pendio. In tali condizioni idrologiche, il fattore di sicurezza per un pendio indefinito in un terreno non coesivo saturo che tende a scivolare lungo un piano parallelo alla superficie topografica è dato dall'espressione [SKEMPTON e DE LORY, 1957]

$$F = \frac{(\gamma - m\,\gamma_w)\cos\beta \tan\varphi'_m}{\gamma \operatorname{sen}\beta} \qquad (3)$$

in cui:

γ = peso di volume del terreno saturo;
γ_w = peso di volume dell'acqua;
m = rapporto tra l'altezza del livello dell'acqua sopra la superficie di scivolamento e l'altezza dello strato scivolante;
φ'_m = angolo di resistenza al taglio efficace medio lungo la superficie di scivolamento (per $c'_m = 0$).

Ponendo nella (3) $F = 1$, l'angolo d'inclinazione del pendio in condizioni di equilibrio è valutabile con l'espressione

$$\tan\beta = \frac{(\gamma - m\,\gamma_w)}{\gamma} \tan\varphi'_m \qquad (4)$$

Per $\gamma = 23$ kN/m³, $\gamma_w \simeq 10$ kN/m³, $\varphi'_m \simeq 9°$, $m = 1$ (superficie di falda occasionalmente coincidente con il piano campagna), risulta $\beta = 5°$ (profilo d'equilibrio raggiunto dalla colata nella sua porzione inferiore, a valle della quota 815).

Per quanto riguarda eventuali altre cause del movimento franoso, si possono escludere cause antropiche all'interno dell'area di frana e nelle zone circumvicine, come ad esempio l'interferenza del lago artificiale, in quanto esso lambisce la parte basale dell'accumulo poco acclive ($\beta < 7°$) e ormai stabilizzato.

9. Conclusioni

Le conclusioni alle quali si è pervenuti relativamente alle cause del dissesto interessante l'abitato di Fontanaluccia hanno indirizzato le opere di consolidamento verso il criterio fondamentale del controllo delle pressioni interstiziali. Questo obiettivo è stato realizzato a cura dell'Ufficio del Genio Civile di Modena, con due gruppi di interventi principali:

— nell'area di alimentazione della frana esecuzione di trincee drenanti, sino alla profondità di circa m 6, e regolamentazione delle acque superficiali;

— alla base delle scarpate principali, nell'area mediana di frana, captazione di acque profonde mediante ventagli di aste drenanti sub-orizzontali di lunghezza massima pari a circa m 50.

Il deflusso delle trincee drenanti, scavate entro i depositi di versante, è stato sempre abbastanza continuo, anche in periodi siccitosi, pur risentendo naturalmente con immediatezza degli andamenti meteorologici. Le aste drenanti, tutte trivellate attraverso le argilliti, sono state caratterizzate da deflussi abbastanza irregolari: da forti portate iniziali nelle prime 24 h dopo la perforazione (fino a qualche l/s cadauna) si è passati a piccole portate (da stillicidi a 0,1 l/s), con variazioni, connesse agli andamenti pluviometrici, meno marcate rispetto a quelle osservabili nelle trincee drenanti.

L'intervento di bonifica con aste drenanti è stato effettuato alla fine dell'estate 1979, limitatamente al settore est (solo nell'estate 1980 si è iniziato l'intervento nel settore ovest); esso ha dato risultati positivi, poiché, nonostante un forte innevamento invernale e intense precipitazioni sino a metà luglio dell'80, la parte soggetta ad intervento, contrariamente all'altra, non ha dato luogo ad arretramenti delle scarpate principali di frana.

Nel settore della « colata » gli interventi sono stati per ora limitati al rimodellamento geometrico, mentre nell'area di coronamento l'Ispettorato Dipartimentole delle Foreste della Regione Emilia-Romagna ha vincolato l'uso del suolo a prato stabile.

Le opere eseguite si sono dimostrate tecnicamente adeguate alla tipologia della frana di Fontanaluccia e nello stesso tempo hanno confermato l'esattezza del modello geo-idrologico e meccanico proposto per il movimento franoso.

BIBLIOGRAFIA

ALMAGIÀ R. (1907) - *Studi geografici sopra le frane in Italia.* Vol. I. Parte generale. L'Appennino settentrionale e il Preappennino Tosco-Romano. Mem. Soc. Geogr. It., 13.

AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI MODENA (1979) - *Studio, indicazioni e prescrizioni per la sistemazione della frana di Fontanaluccia.* Docum. interno. inedito.

BERTOLLI A., NARDI R. (1966) - *Geologia delle valli del Dolo e del Dragone (Appennino tosco-emiliano).* Mem. Soc. Geol. It., 5.

BJERRUM L., SIMONS N. E. (1960) - *Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays.* Proc. ASCE Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, 711-726, Boulder.

BLONDEAU F. (1973) - *The residual shear strength of some french clays: measurement and application to a natural slope landslide.* Proc. IRPI (CNR) Conf., Cosenza.

BONAZZI U., FAZZINI P., GASPERI G., GELMINI R., GUADAGNI A., MINGHELLI F., PELLEGRINI M. (1972) - *Bacino del Fiume Secchia (Appennino settentrionale): geologia, vegetazione e degradazione, stabilità dei versanti, permeabilità, regime idrologico e opere di regimazione.* Atti Soc. Nat. e Mat di Modena, 103.

DALLAN NARDI L., NARDI R. (1974) - *Schema stratigrafico e strutturale dell'Appennino settentrionale.* Mem. Accad. Lunigian. di Sc. « G. Capellini », 42, La Spezia.

JANBU N., BJERRUM L., KIAERNSLI B. (1956) - *Veiledning ved løsning av fundamenteringsoppgaver.* Norges Geot. Inst., Publ. 16, 1-93, Oslo.

KANJI M. A. (1974) - *The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils.* Geotechnique, XXIV, 671-674.

KENNEY T. C. (1959) - *Discussion on Geotechnical properties of glacial lake clays.* J. ASCE, 85, SM3, 67-69.

RENTZ K. (1971) - *Zur Geologie der Zone zwischen der Secchia und dem Apennin-Haupt Kamm. (Prov. Modena und Reggio Emilia).* Diss. Freie Univ. Berlin.

SKEMPTON A. W. (1964) - *Long-term stability of clay slopes.* 4th Rankine Lecture, Geotechnique, XII, 77-101.

SKEMPTON A. W., (1970) - *First-time slides in over-consolidated clays.* Geotechnique, XX 320-324.

SKEMPTON A. W., DE LORY F. A. (1957) - *Stability of natural slopes in London Clay.* Proc. 4th ICSMFE, vol. II, 378-381, London.

SKEMPTON A. W., HUTCHINSON J. N. (1959) - *Stability of natural slopes and embankment foundations.* Proc. VII ICSMFE, State of the Art Vol. 291-335, Mexico.

TAZZIOLI (1910) - *Storia della Torre campanaria di Fontanaluccia.* Relaz. inedita Arch. Parrocch. Fontanaluccia (Modena).

VOIGHT B. (1973) - *Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils.* Geotechnique, XXIII ,265-267.

SUMMARY

A landslide in fractured claystones.

An extensive landslide movement situated in the high Apennines of the Province of Modena, Northern Italy, has been studied; it is of the slump-earthflow type, concerning fractured claystones, covered with slope deposits.

This study consisted mainly in geological surveys, geophysical investigations, borings and geotechnical laboratory tests. The latter have permitted the individuation of argillites containing an interlaminated mineral illite/montmorillonite, in correspondance with the slip surfaces. The presence of this mineral gives the soil particularly low resistance angles, both in the fully softened and in the residual state. The stability analysis has shown that the high part of the slope (crown of the landslide) is subjected to rotational slide along cilindrical surfaces, partly composed of first-time slide following asoftening process. The landslide, down-hill of its foot, turns into an earthflow. This study has indicated that stabilization of this landslide essentially requires the control of interstitial pressures; the latter have been reduced by means of draining troughs and sub-horizontal draining pipes.