

9. ANALISI DELLE CONDIZIONI DI STABILITA'

INDICE

9.1. CONSIDERAZIONI GENERALI	pag.	127
9.2. RISULTATI DELLE INDAGINI	"	127
9.3. CONDIZIONI DI STABILITA' DEL PENDIO	"	129
9.3.1. Superfici di scorrimento piane e parallele al pendio	"	129
9.3.2. Superfici di scorrimento profonde	"	129
9.4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI	"	130

9.1. CONSIDERAZIONI GENERALI

Le indagini eseguite dalla Commissione hanno confermato che al disotto della coltre eluviale e colluviale ed a parte limitati affioramenti di depositi quaternari, il sottosuolo del pendio è costituito dalla formazione argillo-marnosa del Pliocene inferiore e medio.

Dal punto di vista geotecnico, i terreni pliocenici sono argille fortemente sovraconsolidate, con discontinuità costituite da superfici di stratificazione (a luoghi segnate da sottili intercalazioni di sabbia fine e limo), di faglia o di rottura per taglio e per trazione e da fessure variamente orientate e spaziate.

Le proprietà meccaniche ed il comportamento delle argille sovraconsolidate e con discontinuità sono note (ESU & MARTINETTI, 1965; ESU, 1967; ESU, 1976; CALABRESI & SCARPELLI, 1982).

Le argille sovraconsolidate sono materiali fragili che sviluppano la massima resistenza per piccole deformazioni di taglio. La resistenza decresce al crescere della deformazione, fino al valore residuo. Il comportamento fragile è molto marcato se il grado di sovraconsolidazione dell'argilla è elevato, e tende a scomparire se le tensioni medie di prova sono maggiori della tensione di sovraconsolidazione.

Ai comportamenti fragile e duttile corrispondono, rispettivamente, deformazioni volumetriche di dilatazione e di contrazione.

Gli involuppi di rottura, di picco e residuo, sono curvilinei con concavità verso il basso ed i parametri di resistenza variano in funzione della tensione efficace.

E' noto che per effetto delle grandi deformazioni l'argilla perde il ricordo degli stati di tensione precedenti ed assume il comportamento di un materiale con coesione praticamente nulla e con angolo di attrito residuo funzione della composizione mineralogica.

La resistenza delle argille in sede dipende dalla pre-

senza delle discontinuità. Le discontinuità principali, di regola raggruppabili in famiglie (superfici di strato, faglie, giunti), dividono la massa in blocchi che possono scorrere l'uno rispetto all'altro lungo le superfici di discontinuità (ESU & D'ELIA, 1976). Le discontinuità minori (fessure) formano un reticolo fitto e diffuso e dividono la massa in frammenti irregolari con dimensioni dell'ordine del decimetro. A causa delle discontinuità la resistenza meccanica dipende dalle dimensioni dei campioni provati e decresce con il crescere di queste (CALABRESI, 1980).

Per effetto delle discontinuità, la permeabilità dell'argilla in sede è maggiore di quella misurata sui campioni. La circolazione delle acque nel sottosuolo assume caratteri intermedi tra quelli che si hanno nei mezzi porosi e quelli che si hanno nei mezzi fessurati. Le acque possono infatti circolare attraverso le discontinuità di modo che, la distribuzione ed i valori della pressione dell'acqua non possono essere definiti con gli schemi di circolazione validi per i mezzi porosi.

Per la presenza delle discontinuità e dei processi di ammorbidimento ed alterazione, la resistenza in sede delle argille sovraconsolidate è minore di quella misurata in laboratorio ed ha carattere attritivo; l'intercetta di coesione, caratteristica del materiale intatto, può cioè essere assente nel terreno in sede. In particolare, in corrispondenza delle discontinuità lungo le quali avvennero in passato scorrimenti (es. superfici di faglia o di frana) la resistenza può essere pari ai valori residui.

9.2. RISULTATI DELLE INDAGINI

Data l'omogeneità litologica del sottosuolo è stato possibile correlare tra loro i diversi sondaggi.

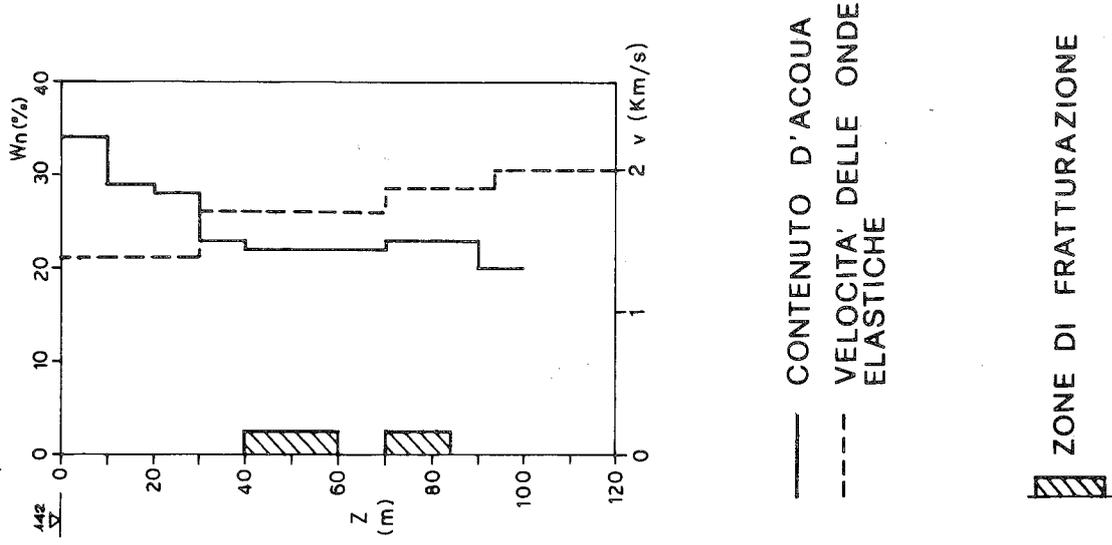
Una coltre eluviale e colluviale, formata da terreni limoso-argillosi piuttosto eterogenei con consistenza media o bassa, è presente su tutto il pendio e copre, con spessore diverso da zona a zona, le argille plioceniche.

Queste presentano strutture di vario tipo (strati, fessure e discontinuità a luoghi anche molto ravvicinate e con superfici lucide) e caratteri generali coincidenti con quelli riconosciuti in altre zone dell'Anconetano; sono infatti argille con plasticità media-alta, elevato peso dell'unità di volume e contenuti d'acqua minori o circa eguali al limite di plasticità.

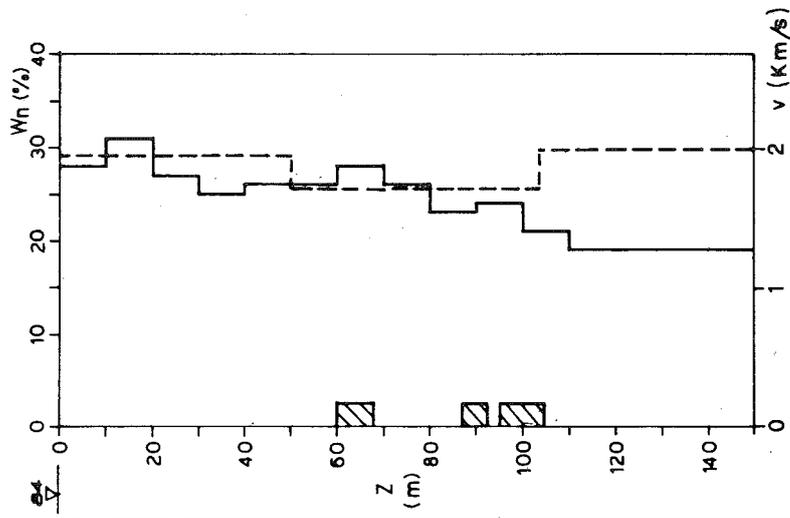
Appare piuttosto significativa, ai fini della caratterizzazione del sottosuolo, la distribuzione del contenuto d'acqua in funzione della profondità (Fig. 9.1). Ad iniziare dalla superficie del suolo o dalla base dei depositi quaternari, dove questi sono presenti, il contenuto d'acqua decresce con la profondità da valori

(*)Ordinario di Geotecnica Applicata alle Opere Idrauliche, Fac. Ingegneria, Univ. "La Sapienza", Roma.

AN. 3



AN. 1



AN. 2

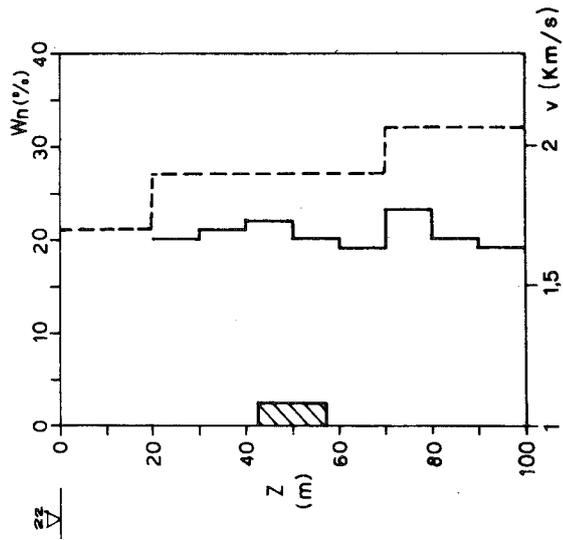


Fig. 9.1 - Distribuzioni del contenuto d'acqua e della velocità sismica in funzione della profondità.
Water contents and seismic velocity distribution versus depth.

compresi tra 25 e 35% fino a valori minori del 20%. La diminuzione sembra avvenire a gradini ed è possibile individuare intervalli di profondità ai quali competono valori medi diversi del contenuto d'acqua.

Tra distribuzione del contenuto d'acqua e distribuzione della velocità di propagazione delle onde elastiche, ricavate con le indagini geofisiche, esiste una correlazione piuttosto stretta. Nei tratti in cui il contenuto d'acqua è elevato (25 ÷ 30%) si sono misurate, infatti, velocità sismiche $v = 1.4 \div 1.5$ km/s; in profondità dove è $W_n < 20\%$ la velocità sismica $v > 2$ km/s.

Lo stato di fessurazione rilevato sui campioni estratti con i sondaggi è intenso anche a profondità notevoli; gradi di fratturazione elevati sono stati rilevati nei tratti in cui il contenuto d'acqua è maggiore del 20% e la velocità è minore di 2 km/s.

Sulla base di questi dati ed osservazioni, il sottosuolo della pendice del Montagnolo nella zona della frana può essere schematizzato, dal punto di vista meccanico, come un mezzo a tre strati:

- terreno allentato, corrispondente alla coltre eluviale e colluviale ed alla fascia più superficiale della formazione pliocenica; spessori di 20 ÷ 40 m;
- terreno con fessure e giunti che separano blocchi giustapposti di argilla dura; spessore 40 ÷ 70 m;
- argilla intatta, corrispondente alla formazione pliocenica in profondità.

Le superfici di separazione tra i tre strati sono pressoché piane ed inclinate verso il mare con pendenze dell'ordine di 1/4 ÷ 1/5 nella parte centrale dell'area franata.

Le prove di laboratorio¹ sui campioni indisturbati prelevati nei sondaggi AN1, AN2, e AN3 sono in accordo con i dati già noti.

Il contenuto d'acqua dei campioni prelevati in profondità è risultato < 20%, mentre quello dei campioni relativamente superficiali è disperso in un ampio intervallo con valori fino a circa il 30%.

Sulla base dei valori delle caratteristiche di plasticità e della frazione argillosa ($\% < 2 \mu\text{m}$) si distinguono due tipi di materiali: il primo è un'argilla inorganica con alta plasticità ($W_L = 70$, $I_p = 45$), il secondo un limo o un'argilla inorganica con plasticità da bassa a media ($W_L = 40$, $I_p = 25$).

La resistenza al taglio, misurata con prove di compressione triassiale drenate e con prove di taglio diretto, è risultata compresa in un intervallo ampio a causa dell'influenza delle strutture presenti nei campioni (fessure, giunti e superfici di stratificazione). Dall'insieme delle prove sui campioni di argilla ad alta plasticità si sono ottenuti valori medi dei parametri di resistenza $c' = 50$ KPa e $\varphi' = 25^\circ - 28^\circ$, con minimi intorno ai 22° . La resistenza residua è caratterizzata da $c'_r = 0$ e $\varphi'_r = 15^\circ - 17^\circ$.

9.3. CONDIZIONI DI STABILITÀ DEL PENDIO

Le condizioni di stabilità del pendio sono state analizzate eseguendo verifiche a posteriori in corrispondenza del profilo lungo cui ricadono i sondaggi AN2,

AN1 e AN3. Considerate diverse possibili superfici di scorrimento, scelte tenendo conto delle indicazioni fornite dai rilevamenti di superficie e delle indagini in profondità, si sono calcolati i valori dei parametri di resistenza mobilizzati al limite di stabilità. Visti i risultati delle misure fornite dai piezometri installati nel pendio si è assunto un fattore di pressione neutra $r_u (= u/\gamma h) = 0.5$.

9.3.1. Superfici di scorrimento piane e parallele al pendio

La verifica è stata eseguita per controllare la stabilità della coltre di terreno eluviale e colluviale e la profondità delle superfici lungo le quali possono avvenire scorrimenti. Date l'inclinazione e la lunghezza del pendio si è considerato ammissibile affrontare il problema con lo schema di pendio indefinito. I risultati sono riportati in Fig. 9.2, nella quale il rapporto $\gamma z/c'$ è espresso in funzione dell'angolo d'attrito φ' , per i valori dell'inclinazione del pendio, corrispondenti all'inclinazione media del tratto tra q 0.0 e q 90 m s.m. ($\beta = 12^\circ - 15^\circ$).

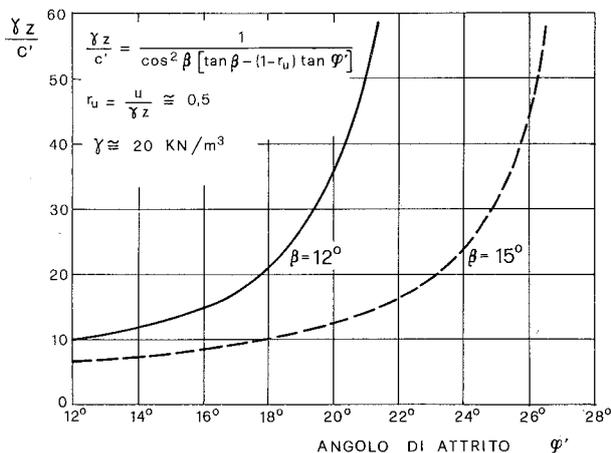


Fig. 9.2 - Verifica di stabilità secondo superfici di scorrimento piane e parallele al pendio.
Stability analysis along planar failure surfaces parallel to the slope.

Considerati i valori della coesione e del peso dell'unità di volume del terreno che forma la coltre ($c' < 50$ KPa e $\gamma = 18 \div 20$ KN/m³) i movimenti possono avvenire su superfici profonde fino a qualche decina di metri, rispetto al piano di campagna.

Tale risultato è in accordo con lo stato di dissesto superficiale del pendio testimoniato dalle frane che, come la frana Barducci, erano in atto nel tratto considerato.

9.3.2. Superfici di scorrimento profonde

In prima approssimazione il sottosuolo è stato considerato statisticamente omogeneo ed isotropo e la verifica è stata eseguita calcolando gli involucri di resistenza (JANBU, 1954) per le inclinazioni e le altezze del versante orientale del Montagnolo (Fig. 9.3):

⁽¹⁾ Prove eseguite presso il laboratorio geotecnico dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni dell'Università di Roma.

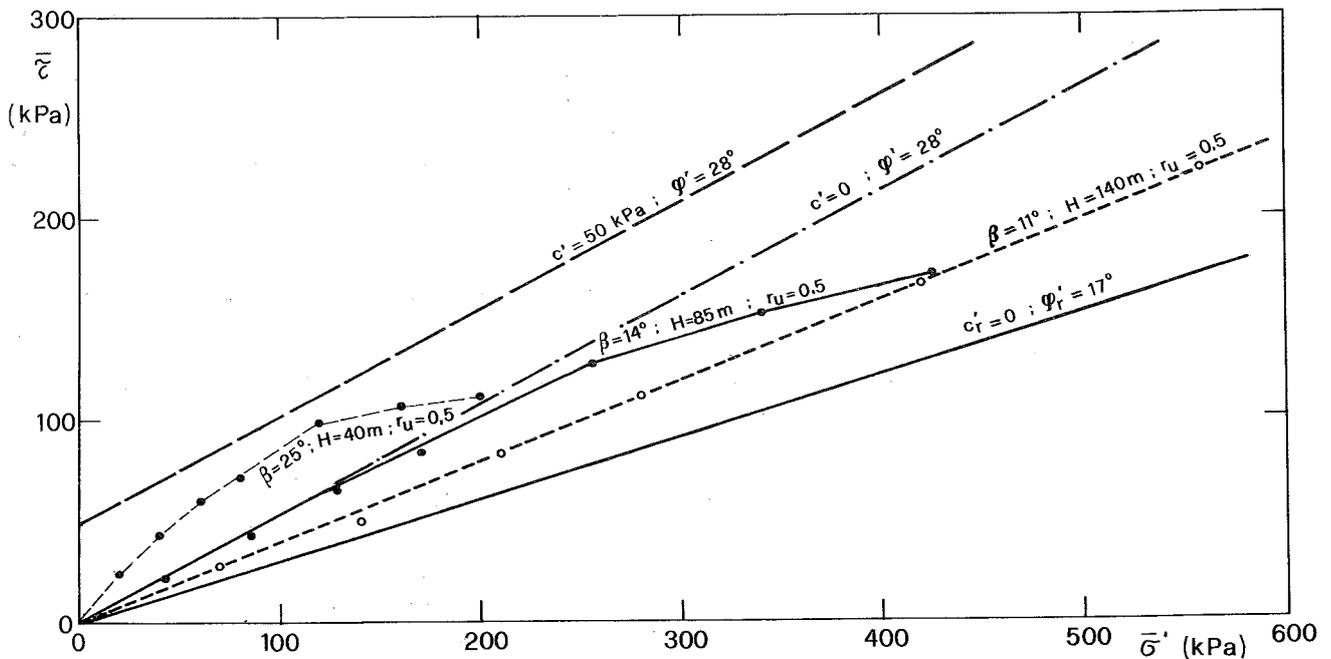


Fig. 9.3 - Involupi di resistenza del versante del colle del Montagnolo.
Resistance envelopes of the failed slope.

Sono state quindi considerate superfici non circolari che intersecano la superficie del suolo nelle zone in cui si sono osservate le fenditure più importanti (Fig. 9.4) e che si sviluppano nel sottosuolo al di sopra delle profondità alle quali le indagini hanno messo in vista che l'argilla è intatta.

I risultati espressi come coppie dei valori c' e φ' necessari per l'equilibrio sono riportati in Fig. 9.5.

Se si scartano le coppie non in accordo con i risultati sperimentali, i più probabili valori medi dei parametri della resistenza mobilitata in sede ricadono nel campo $c' = 20 \div 50$ KPa e $\varphi' = 14^\circ - 24^\circ$.

9.4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Nell'interpretare i risultati delle verifiche deve tenersi conto delle ipotesi semplificative assunte e delle incertezze dei metodi di analisi:

- il modello meccanico assunto per rappresentare il fenomeno si discosta dalla realtà, nel caso di una frana di grandi dimensioni;
- lo schema assunto per valutare i valori della pressione interstiziale ammette un moto di filtrazione in regime stazionario con superficie freatica all'incirca corrispondente alla superficie del suolo.

La prima fonte di incertezza è insita nei metodi di calcolo e potrebbe essere solo in parte migliorata se si conoscesse la storia del pendio nel periodo di preparazione della frana. La seconda non contrasta, per quanto concerne il valore della pressione neutra, con i dati relativi alle precipitazioni meteoriche nel periodo precedente la frana e con le misure piezometriche eseguite dopo l'evento. Non tiene però conto della pressione dell'acqua nelle discontinuità.

Pur considerati i limiti di approssimazione, i risul-

tati delle verifiche sono in accordo con i dati osservati. Essi mostrano in particolare che la stabilità dei ripidi fronti di cava nelle zone al di fuori dei limiti della grande frana è compatibile con i valori dei parametri di resistenza misurati in laboratorio sull'argilla intatta e che la resistenza mobilitata della superficie di scorrimento della grande frana è compatibile con valori bassi della coesione e con valori dell'angolo di attrito compresi tra il valore di picco e quello residuo.

A parte i movimenti della coltre eluviale e colluviale, le possibili superfici di scorrimento si sviluppano a profondità massime comprese tra 50 e 100 m sotto la superficie del suolo. Esse interessano cioè le profondità alle quali nei sondaggi si sono riscontrati:

- a - contenuti d'acqua elevati ($W_n > 25\%$) rispetto a quelli dell'argilla intatta in profondità ($W_n < 20\%$);
- b - stato di fratturazione intensa e presenza di superfici lucide e striate nei campioni estratti dai sondaggi;
- c - valori di velocità sismica minori di quelli misurati nel basamento ($v < 1.7 \div 1.8$ km/s contro $v = 2.0 \div 2.2$ km/s).

I dati sperimentali ed i risultati delle verifiche consentono cioè di interpretare la frana del 13 dicembre 1982 come un movimento profondo nelle argille plioceniche, accompagnato dalla ripresa di movimenti (scoscendimenti e colate) nella coltre eluviale e colluviale.

L'ipotesi di movimento profondo è in accordo con i fatti citati nelle premesse ed in particolare con:

- l'ampiezza dell'area in cui si sono manifestati i dissesti;
- la subitanità e la contemporaneità dei movimenti nelle diverse parti della zona in frana;
- la rapidità dei fenomeni e la relativamente breve durata della fase parossistica;
- la distribuzione planimetrica e le caratteristiche geo-

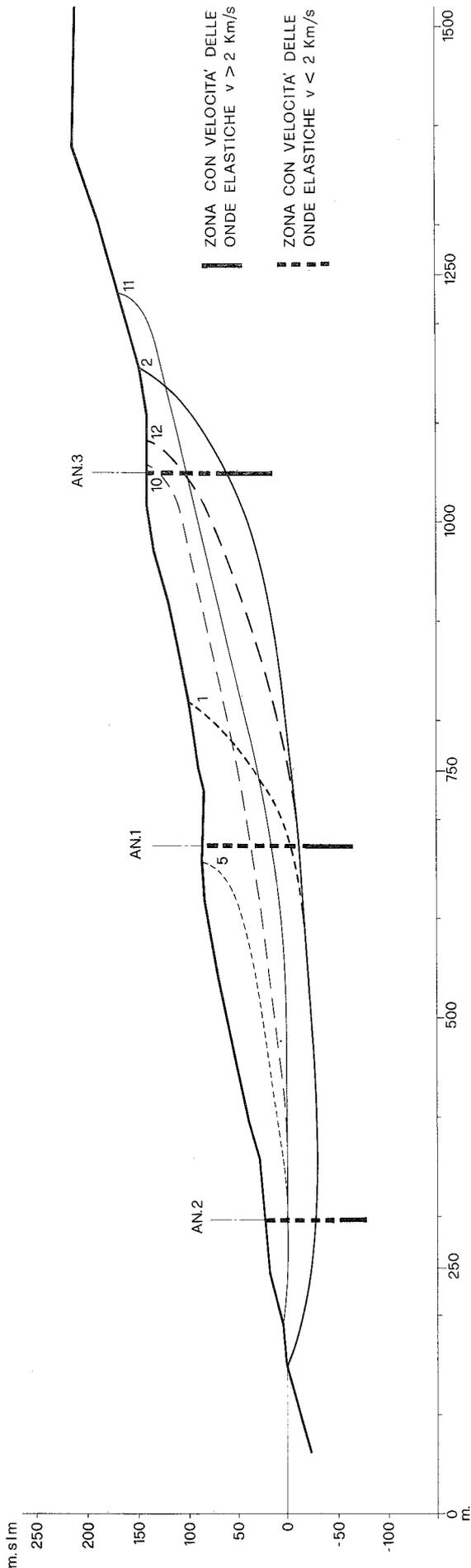


Fig. 9.4 - Superfici di scorrimento non circolari.
Deep failure surfaces cutting through the fissured and sheared clay.

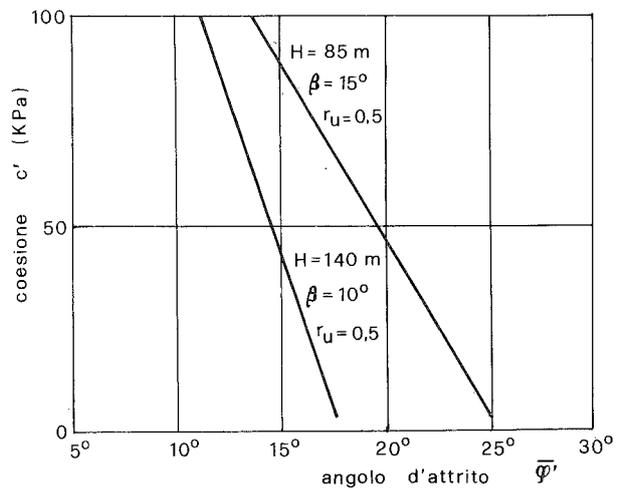


Fig. 9.5 - Valori dei parametri di resistenza c' e φ' compatibili con $F = 1$.
Shear strength parameters mobilised along critical failure surfaces (safety factor = 1).

metriche delle principali manifestazioni superficiali (fenditure, scarpate di frana, zone di abbassamento e zone di innalzamento);

— le profondità alle quali gli inclinometri installati dopo la frana segnalano il verificarsi di movimenti di assetamento.

Malgrado i dati raccolti, l'analisi del meccanismo e delle cause della frana del dicembre '82, è tuttora difficile.

Una prima interpretazione è che la frana sia "di primo distacco" e sia avvenuta in un pendio che, a parte i movimenti della coltre superficiale, era stabile fino al momento dell'evento. Tale interpretazione, basata soprattutto sulla subitanità dell'evento, è però in contrasto con i caratteri morfologici della pendice e con le notizie storiche sulle condizioni di stabilità nel passato. Se la frana del dicembre 1982 fosse "di primo distacco", poiché nella zona non sono avvenuti mutamenti tali da produrre un significativo aumento degli sforzi agenti nel sottosuolo, la causa dell'evento dovrebbe essere attribuita a processi di graduale diminuzione del coefficiente di sicurezza del pendio ed allo sviluppo di un fenomeno di rottura progressiva. La frana sarebbe cioè l'atto finale di una serie di eventi (variazioni periodiche della pressione neutra, graduale deformazione del pendio, vibrazioni e scuotimenti ecc.) che agirono per tempi lunghi, concorrendo a far aumentare gli sforzi agenti ed a far diminuire la resistenza meccanica del terreno fino a valori non compatibili con la stabilità. Non esisterebbe, in questo caso, una causa scatenante unica e facilmente riconoscibile.

La seconda interpretazione è che il pendio sia stato sede nel passato di altre frane profonde e che quella del dicembre '82 sia la ripresa di antichi movimenti e sia avvenuta per scorrimento su superfici almeno in parte coincidenti con quelle di dette frane. Ammesso che lungo queste superfici non siano avvenuti processi tali da far aumentare la resistenza meccanica del terreno rispetto ai valori residui (ad esempio processi di cementazione), il coefficiente di sicurezza del pendio doveva avere un valore poco maggiore di uno, e doveva variare periodicamente in funzione soprattutto della variazione-

della pressione interstiziale. Un aumento particolarmente marcato di questa potrebbe aver rappresentato la causa scatenante della frana. A favore di questa interpretazione deve ricordarsi che l'elevata piovosità dei mesi precedenti la frana, potrebbe avere causato l'innalzamento dei livelli delle falde idriche e l'aumento delle pressioni interstiziali. Le intense precipitazioni nei giorni immediatamente precedenti l'evento potrebbero aver generato situazioni idrauliche non compatibili con la stabilità. E' però da tener presente che nel sessantennio 1924-1982 si verificarono altri eventi meteorici si-

mili, per intensità e durata, a quello dell'autunno del 1982 (Tab. 9.1). E' perciò dubbio che le precipitazioni meteoriche debbano essere considerate la sola causa della frana.

Il problema della individuazione delle cause della frana è come si vede, complesso e non sembra avere una soluzione unica.

Questo d'altronde era da attendersi se si considera il numero e la varietà dei fattori che determinano le condizioni di stabilità di un pendio e la mancanza di dati relativi al suo comportamento prima dell'evento.

Tabella 9.1 - Eventi meteorici di elevata intensità nel sessantennio 1920-1980 (dai dati del Servizio Idrografico del G.C.)

Anno	h_{an} (mm)	h_{an}/h_m	Mese	(d) Durata (giorni)	h_{ev} (mm)	h_{ev}/d (mm/g)	h_{ev}/h_{4m}
1924	626	0.76	giugno	4	134	33.5	0.48
1928	1.102	1.35	settemb.	3	135	45	0.46
1939	1.194	1.46	mag.-giu.	5	138	27.6	0.30
1940	926	1.13	nov.-dic.	3	103	34.4	0.33
1943	719	0.88	ottobre	5	112	22.5	0.39
1959	1.181	1.44	settembre	1	162	162	0.37
				8	177	22.2	0.54
1961	916	1.12	ottobre	4	148	37.2	0.46
1962	713	0.87	ott.-nov.	6	104	17.3	0.44
1976	1.066	1.3	agosto	6	135.4	22.6	0.28
1982	931	1.14	nov.-dic.	6	159.6	26.6	0.33

h_{an} = altezza di pioggia nell'anno

h_m = altezza di pioggia media trentennale = 818.36 mm

h_{ev} = altezza di pioggia dell'evento

h_{4m} = altezza di pioggia nei quattro mesi precedenti l'evento

ABSTRACT

The mechanical aspects of the large slide that occurred in Ancona in December 1982 are examined.

The failed slope has an average grade of 1/6 and is formed of Pliocene heavily over-consolidated, marine clay overlain by a cover of eluvial and colluvial soil. According to old chronicles, and on the basis of the slope morphological characters it is probable that the slope had been affected by large slides also in the past.

Site investigations show that the Pliocenic clay is homogeneous throughout the slide area. Seismic refraction surveys, sonic logs in bore-holes, and down-hole tests were carried out in order to assess the soil profile and the in-situ properties of the clay mass. The mechanical properties of the clay matrix were measured on laboratory samples.

Where the slope is not affected by the slide, the clay is intact and has a high seismic velocity (> 2 km/s); its average water content is less than 20%. In the slide body the clay is fissured and jointed and is crossed by shear zones and slickensides; its seismic velocity is less than 2 km/s and the water content is greater than 25% (Fig. 9.1).

Three main layers have been identified in the subsoil:
— a layer, 20-40 m thick, formed of eluvial and colluvial soil;
— a layer, 40-70 m thick, formed of fissured and sheared

clay having an average water content > 25% and a low seismic velocity;

— a mass of intact clay with an average water content < 20% and a high seismic velocity.

The contact surface between the layers are planar and dip northwards towards the sea with a grade 1/4 - 1/5.

Laboratory test results are scattered in a wide range. The clay matrix has a medium to high plasticity ($W_L > 40$; $IP > 25$) and a liquidity index less than zero. Its peak shear strength parameters are: $c' = 50$ KPa, $\varphi' = 25^\circ - 28^\circ$. According to the high OCR, the clay behaves as a strain softening material; the residual strength parameters are $c'_r = 0$ and $\varphi'_r = 15^\circ - 17^\circ$.

The slope shape and grade, the sub-soil profile, and the mechanical properties of the clay show that both superficial, and deep slides are possible. Surface slides would affect the layer of eluvial and colluvial soils; deep slides would occur by slippage along failure surfaces cutting across the layer of fissured and sheared clay.

Back-analyses results show that the average shear strength mobilised along these surfaces is intermediate between peak and residual strength (Fig. 9.5).

If the geometry and kinematics of the slide are taken into consideration, the December 1982 slide could be interpreted as the re-activation of old slides.

A long lasting action of natural factors, such as creep deformation, gradual increase of pore pressures, and softening of the clay mass, is probably the cause of the slide. The triggering action could be possibly the heavy rainfalls during the four months preceding the slide and a storm that occurred in the days immediately before the slide.

OPERE CITATE

CALABRESI G. (1980) - *The Effect of Sample Size on Strength Parameters for Intact and Fissured Stiff Clays*. Eur. Mechanics Colloquium 134. Copenhagen, Tech. Univ. of Denmark.

CALABRESI G. & SCARPELLI G. (1982) - *Argille sovraconsolidate e fessurate: fenomeni franosi*. Rapp. di Sintesi sulle ricerche svolte dalle U.O. 1,30,42,46,55,69,74. P.F. Conservaz. del Suolo del C.N.R., E.S.A., Roma.

CRESCENTI U., CIANCETTI C.F., COLTORTI M., DRAMIS F., GENTILI B., MELIDORO G., NANNI T., PAMBIANCHI G., RAI-

NONE M., SEMENZA E., SORRISO-VALVO M., TAZIOLI G.S. & VIVALDA P. (1983) - *La grande frana di Ancona del 1982*. 15° Conv. Naz. dell'Ass. Geotecnica Ital., Spoleto.

ESU F. (1967) - *Influence of Weathering on Behaviour of Stiff Clays*. Proc. Geotech. Conf., Oslo.

ESU F. (1976) - *Problemi di stabilità dei pendii naturali in argille sovraconsolidate e fessurate italiane*. Atti Ist. Scienza delle Costruz. Pol. di Torino, n. 315.

ESU F. & D'ELIA B. (1976) - *Time Dependent Behaviour of Deep Excavations in Overconsolidated Jointed Clays*. Proc. 6th Eur. Conf. S.M.F.E., 1(1), 41-44.

ESU F. & MARTINETTI S. (1965) - *Considerazioni sulle caratteristiche delle argille plio-pleistoceniche della fascia costiera adriatica fra Rimini e Vasto*. Geotecnica, 12(4), 164-206.

JANBU N. (1954) - *Stability Analysis of Slopes with Dimensionless parameters*. Harvard S.M., Series 46.

