
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI

RENDICONTI

FRANCO ESU

Influenza delle variazioni di contenuto di acqua dei terreni superficiali sulla stabilità dei pendii

Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 32 (1962), n.2, p. 204-214.

Accademia Nazionale dei Lincei

http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1962_8_32_2_204_0

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)
SIMAI & UMI*

<http://www.bdim.eu/>

Geologia. — *Influenza delle variazioni di contenuto di acqua dei terreni superficiali sulla stabilità dei pendii.* Nota di FRANCO ESU, presentata (*) dal Corrisp. F. PENTA.

1. PREMessa. — Nel corso dei lavori per la coltivazione a cielo aperto della miniera di lignite di Santa Barbara (Castelnuovo dei Sabbioni, prov. di Arezzo), le zone ai margini dello scavo sono state ripetutamente interessate da movimenti franosi; questi hanno avuto entità varia nei riguardi sia dell'estensione trasversale, sia della distanza dal bordo degli scavi, sia, infine, dello spessore di terreno interessato dai movimenti.

Le coltivazioni minerarie interessano una formazione lacustre plio-pleistocenica costituita, dal basso verso l'alto, da: alternanze di sabbie di varia granulometria, limi e argille (spessore 20-100 m); lignite (spessore 20-30 m); argille (spessore fino a 150 m). Il basamento di tale formazione è costituito dalle arenarie oligoceniche (« macigno »).

I dissesti più rilevanti si sono verificati nei luoghi in cui gli scavi hanno inciso profondamente le formazioni lacustri fino a scoprire o quasi i terreni a letto del banco di lignite (1). Essi in particolare sono localizzati al bordo sud-occidentale del bacino, in corrispondenza del versante della collina su cui sorgeva l'abitato di Ronco (fig. 1) che è appunto costituita dai terreni sabbiosi stratigraficamente sottoposti alla lignite.

Durante gli ultimi quattro anni gli scavi hanno proceduto quasi ininterrottamente, aumentando di continuo i dislivelli tra fondo dello scavo e superficie originaria del suolo, fino a giungere a circa 100 metri da questa negli ultimi tempi; ciò rappresenta indubbiamente l'evento fondamentale che ha turbato la preesistente situazione statica dei terreni: difatti, quanto più col passare del tempo sono stati approfonditi gli scavi, tanto più ampia è divenuta la fascia collinare interessata dai dissesti, nonostante gli accorgimenti adottati (diminuzione degli angoli medi di scarpata, alleggerimenti, sistemazione delle acque superficiali, ecc.).

Le osservazioni sistematiche dello svolgersi dei vari movimenti franosi, tuttavia, non ha messo in vista in maniera chiara una diretta correlazione cronologica tra il procedere degli scavi ed il manifestarsi dei dissesti. Più volte, infatti, gli scavi hanno proceduto per mesi, con notevoli approfondimenti e modifiche del profilo dei pendii, senza che comparissero segni di nuovi dissesti; viceversa, è accaduto che si siano manifestati movimenti

(*) Presentata nella seduta del 10 febbraio 1962.

(1) Nelle zone in cui gli scavi si sono mantenuti nelle argille di tetto si sono avuti soltanto movimenti franosi relativamente superficiali e che hanno interessato masse piuttosto limitate di terreno già in parte rilasciato.

franosì su versanti in vicinanza dei quali da diverso tempo non erano stati effettuati lavori.

La cronistoria comparata dei dissesti e degli scavi indica pertanto che, pur essendo innegabile l'esistenza di un nesso di causalità tra scavi e dissesti, altri fattori devono intervenire a determinare, nelle forze agenti o resistenti, variazioni sufficienti a provocare i franamenti.

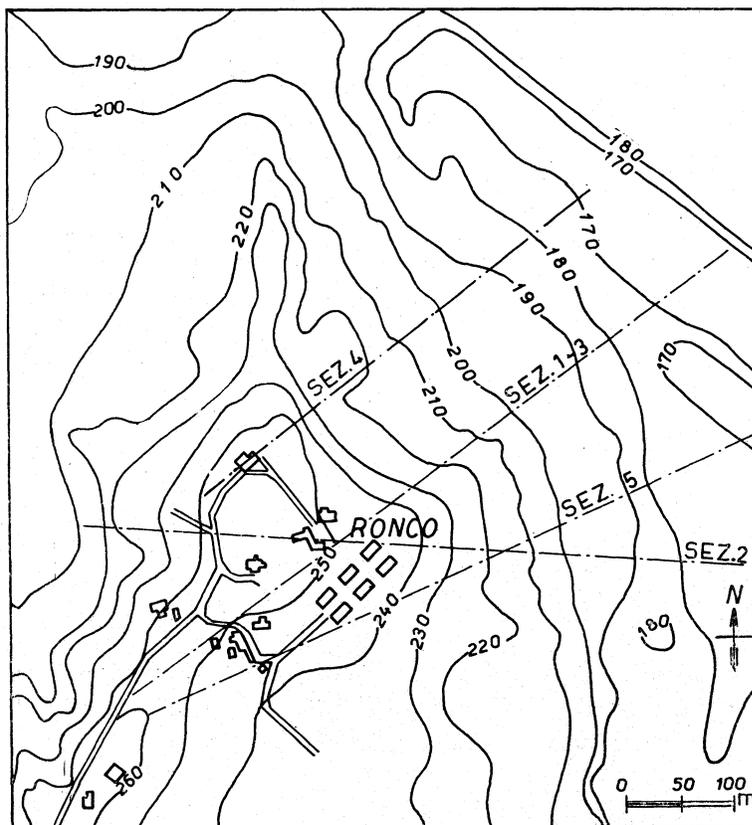


Fig. 1. - Planimetria della collina del Ronco e della zona al bordo sud-occidentale del bacino lignitifero di Castelnuovo dei Sabbiosi (Arezzo).

La planimetria è stata rilevata all'inizio dei lavori, prima del manifestarsi dei movimenti franosi. Su di essa sono tracciate le sezioni dei pendii interessati dai dissesti avvenuti negli anni 1959-1960-1961.

In molti casi i fattori secondari che determinano l'inizio o l'accelerazione di movimenti franosi su pendii prossimi all'equilibrio sono, come è noto, legati ad eventi meteorici. In particolare, fin dai tempi delle prime osservazioni sistematiche, è stato segnalato che frane, scoscendimenti e dissesti del terreno si manifestano o si accelerano durante o subito dopo periodi di precipitazioni particolarmente intense o prolungate; in questi casi il meccanismo del processo è di regola abbastanza facilmente spiegabile: l'azione delle acque meteoriche può consistere talvolta nella diminuzione delle caratteristiche di

resistenza meccanica di strati di terreni sciolti coerenti (a costituente più o meno argilloso); talvolta nell'aumento di peso di terreni imbibibili che provoca un aumento delle forze agenti (componenti del peso nella direzione potenziale del moto) maggiore dell'aumento delle forze resistenti (in parte dovute alla coesione, indipendente, a breve termine, dagli sforzi normali).

Nello studio dei dissesti connessi alle coltivazioni di Santa Barbara, la correlazione con le vicende meteorologiche è apparsa in un certo senso rovesciata: nei periodi piovosi (dal tardo autunno alla primavera), le dislocazioni di grosse masse di terreno, nelle quali la superficie di scorrimento è relativamente profonda, sembra si siano sistematicamente attenuati od arrestati.

La maggior parte dei movimenti franosi si è invece iniziata o accentuata sempre al colmo della stagione secca (luglio-ottobre); il numero delle frane o dissesti che si sono verificati in piena estate, dopo mesi di siccità prolungata, è stato troppo alto per pensare a coincidenze casuali.

Nel ricercare le « cause fisiche » della riscontrata correlazione non si sono rilevati elementi o fattori ragionevolmente capaci di peggiorare, nella stagione estiva, le caratteristiche meccaniche specifiche (coesione, attrito interno) delle parti meno superficiali nelle quali apparivano localizzabili gli scorrimenti determinanti i dissesti.

Tra le varie ipotesi considerate è rimasta soltanto quella che, in conseguenza della diminuzione di peso delle parti superficiali dei pendii, determinata dall'essiccazione legata all'assenza di precipitazioni ed all'intensa evaporazione proprie della stagione secca, possano determinarsi delle modifiche degli sforzi tali da peggiorare le condizioni di stabilità.

L'indagine di controllo che si è eseguita ha condotto a confermare tale ipotesi.

Si è dimostrato infatti che, nelle condizioni specifiche, l'alleggerimento del terreno tende a diminuire il grado di stabilità dei pendii; ciò spiega il perché dell'insorgere o dell'intensificarsi dei dissesti e dei movimenti franosi durante l'estate.

La condizione che determina l'influenza negativa dell'alleggerimento è rappresentata dall'esistenza di acqua in pressione (con carico pressoché costante nel tempo) entro i terreni sabbiosi, ma tuttavia alquanto coerenti, compresi nella formazione di letto.

A questo concorso di fatti (esistenza di acqua in pressione e coesione dei terreni del sottosuolo) è dovuto il comportamento dei fenomeni esaminati.

Si ritiene utile rendere noti i risultati delle indagini, in quanto le conclusioni cui si è pervenuti possono essere generalizzate ed applicate, quindi, nello studio di situazioni simili.

Le conclusioni possono infatti fornire la spiegazione di almeno una parte delle frane estive già rilevate e segnalate in passato, ma a tutt'oggi non spiegate esplicitamente su basi geotecniche.

L'interesse della conoscenza e della spiegazione di questi fenomeni risiede non soltanto nell'opportunità di tenerne conto in sede di progetto di scarpate

artificiali o di verifica di pendii naturali, ma anche e soprattutto nel segnalare e chiarire un fenomeno che, può essere importante agli effetti della esecuzione dei lavori. Di regola, infatti, il tecnico, generalizzando la constatazione della più frequente minor stabilità corrispondente ai periodi piovosi, tende ad essere colto di sorpresa dalle eventuali « frane di ferragosto », la cui possibilità e le cui cause meritano di essere conosciute.

2. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE ED IDROGEOLOGICHE DELLA ZONA IN FRANA. — Come si è accennato sinteticamente nella Premessa, la successione, dal basso verso l'alto, dei terreni nella zona che è stata soggetta a dissesti e frane è la seguente (fig. 2):

a) arenarie oligoceniche (« macigno »): affiorano sui colli che circondano il bacino lignitifero e sono state individuate, nel sottosuolo dell'area interessata, a profondità di 100–150 m; tale formazione lapidea costituisce substrato « rigido » e, comunque, sicuramente non interessato dai movimenti franosi;

b) formazioni a letto del banco principale di lignite: in corrispondenza del versante sede di frane hanno uno spessore complessivo dell'ordine di 100–150 m; sono costituite da alternanze di strati di sabbie (più o meno fini e dotate di discreta coesione), limi ed argille con qualche strato di lignite di pochi metri di spessore al massimo; questi terreni sono sede dei movimenti franosi, cui ci si riferisce in questo lavoro;

c) banco principale di lignite potente 20 m ed oltre; sulle pendici del colle in frana, per effetto di combustione spontanea della lignite, i terreni incassanti erano in parte trasformati in scorie rosse fuse o clinkerizzate (« porcellaniti »);

d) argille grigie della formazione a tetto della lignite (localmente indicate con il nome di « strellicione »); tali argille affioravano al piede del versante della collina di Ronco e sono state asportate per scoprire il banco da coltivare.

Varie indagini, condotte per mezzo di numerosi sondaggi, hanno posto in vista che nei terreni sabbiosi a letto del banco di lignite è presente acqua in pressione con risalienze di parecchie decine di metri.

È incerto se le acque fossero originariamente in circolazione naturale; non v'è dubbio però che, all'atto dell'inizio dei lavori (1955–56), esse erano richiamate verso gli estesi sotterranei delle vecchie miniere ⁽²⁾. Da questi venivano e vengono tuttora edotte portate rilevanti (circa 30 l/sec) a mezzo di pompaggi, allo scopo di mantenere per quanto possibile depressa la superficie piezometrica.

La scarsa salinità delle acque rinvenute con i sondaggi conferma che esse non erano immobili. Il fatto che abbiano una temperatura sensibilmente co-

(2) Sia dal punto di vista idrogeologico, che da quello generale, è da mettere in vista che, in gran parte dell'area interessata dagli scavi attuali, le antiche coltivazioni in sotterraneo ed a cielo aperto della lignite hanno modificato piuttosto profondamente l'ambiente; la descrizione geologica non è pertanto sufficiente per una rappresentazione di quel sottosuolo.

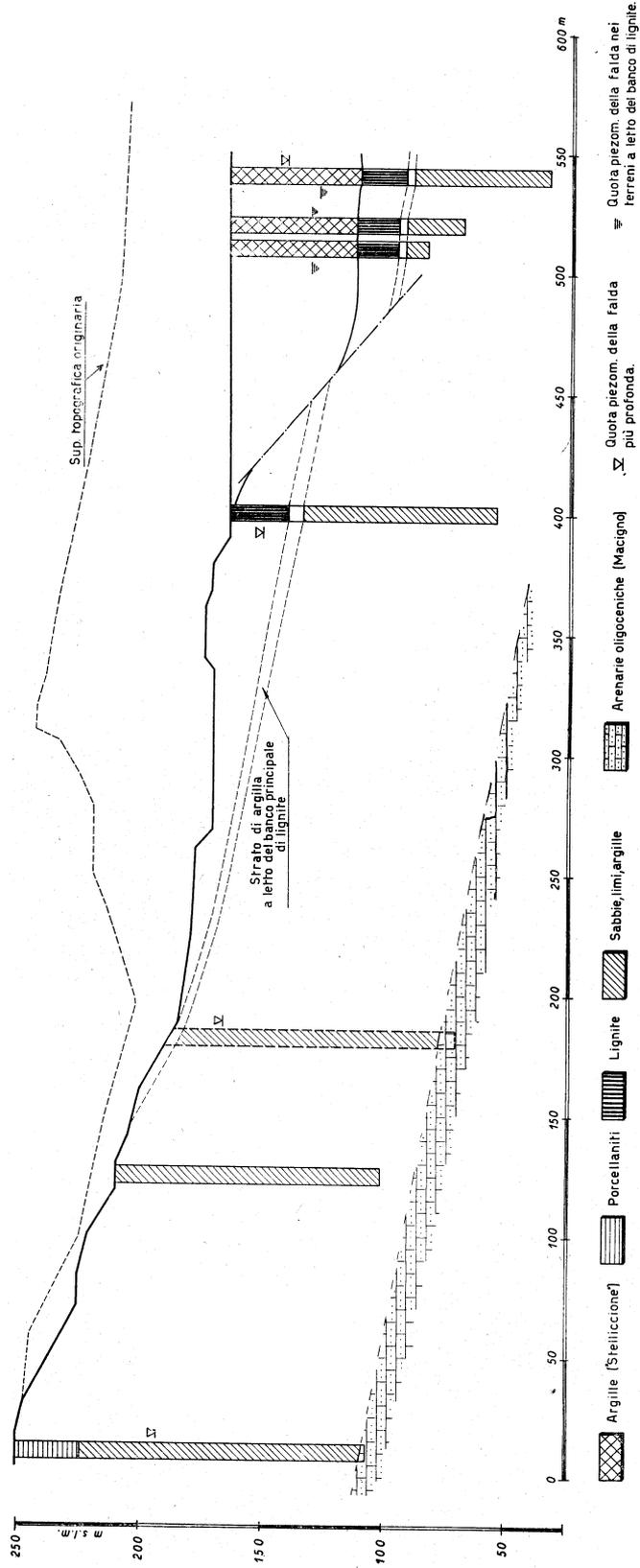


Fig. 2. - Sezione attraverso la collina del Ronco in corrispondenza della zona interessata dalla frana dell'estate 1959 (sez. I-3).
Successione dei terreni del sottosuolo.

stante indica, inoltre, che il loro bacino di alimentazione deve essere piuttosto ampio; esso verosimilmente corrisponde agli affioramenti delle arenarie oligoceniche sulle colline che circondano il bacino lignifero.

Le prove di laboratorio su campioni indisturbati di terreno della formazione di letto, prelevati in zone vicine a quella in frana, hanno indicato che questi terreni, dal punto di vista granulometrico, sono delle *sabbie con limo debolmente argillose* (secondo la classifica M.I.T.) a grana assortita. Il materiale, anche dopo estratto dalla sua sede, è addensato ed è dotato di elevata consistenza, sia con contenuto di acqua naturale, che dopo essiccamento.

Il peso dell'unità di volume allo stato naturale (γ) è dell'ordine di 1,9-2,0 gr/cm³; il contenuto di acqua naturale (w_n) è dell'ordine del 25-30 % nei materiali prelevati in profondità e può raggiungere valori più elevati (50-60 %) in quelli superficiali.

Sulla base dei risultati di prove di compressione triassiale, all'assieme dei terreni a letto della lignite possono attribuirsi una coesione media $c = 1,3$ kg/cm² ed un angolo di attrito medio $\varphi = 24^\circ$ (3).

La consistenza del materiale non si modifica sensibilmente al variare del contenuto di acqua o delle condizioni di prova e deve essere perciò attribuita in buona parte a « coesione vera », dovuta ad una debole cementazione calcitica dei grani.

3. CARATTERISTICHE DEI MOVIMENTI FRANOSI. — I primi segni di dissesto (fenditure e crepe del suolo e lesioni di manufatti) si manifestarono nell'estate del 1958 sul bordo meridionale del bacino, in corrispondenza del versante della collina e del gruppo di case di Ronco (4) (fig. 1).

La situazione si mantenne stazionaria fino al giugno 1959, quando si ravvivarono le fenditure e le lesioni.

La prima frana di una certa importanza si staccò il 2 agosto 1959 (fig. 2) in una zona che, a quanto risulta dalla storia del bacino minerario, già in tempi lontani era stata sede di frane, ancora chiaramente testimoniate nel 1959 dalla morfologia della superficie.

Il movimento, che interessò terreni già dissestati da antiche frane, « porcellaniti » e terreni della formazione a letto della lignite, risultò essere uno scosciamento rotazionale; una frana, cioè, caratterizzata da distacco e scorrimento secondo una superficie di neoformazione concava verso l'alto; il corrispondente spostamento si può pertanto ridurre ad una rotazione, sia pure associata a traslazione.

(3) Nel caso in esame è apparso lecito assumere valori medi della coesione e dell'angolo di attrito per caratterizzare il terreno. Gli elementi raccolti con le indagini effettuate inducono, infatti, a considerare il sottosuolo come un unico complesso sufficientemente omogeneo dal punto di vista meccanico.

(4) Ricordiamo che i lavori in sotterraneo erano stati praticamente sospesi a partire dal 1948 e che i lavori di scavo a cielo aperto, mediante escavatori a catena di tazze, sono stati iniziati nel 1955-56.

Lo scoscendimento fu accompagnato da fluidificazione di parte dei materiali (soprattutto le « porcellaniti ») i quali fluirono poi su pendii di modestissima inclinazione (12° - 15°).

Un'altra frana, anch'essa preceduta dall'aprirsi di fenditure sulla superficie del suolo e con caratteristiche simili a quelle della frana del 1959 si verificò nell'agosto del 1960, interessando le « porcellaniti » e i terreni di letto.

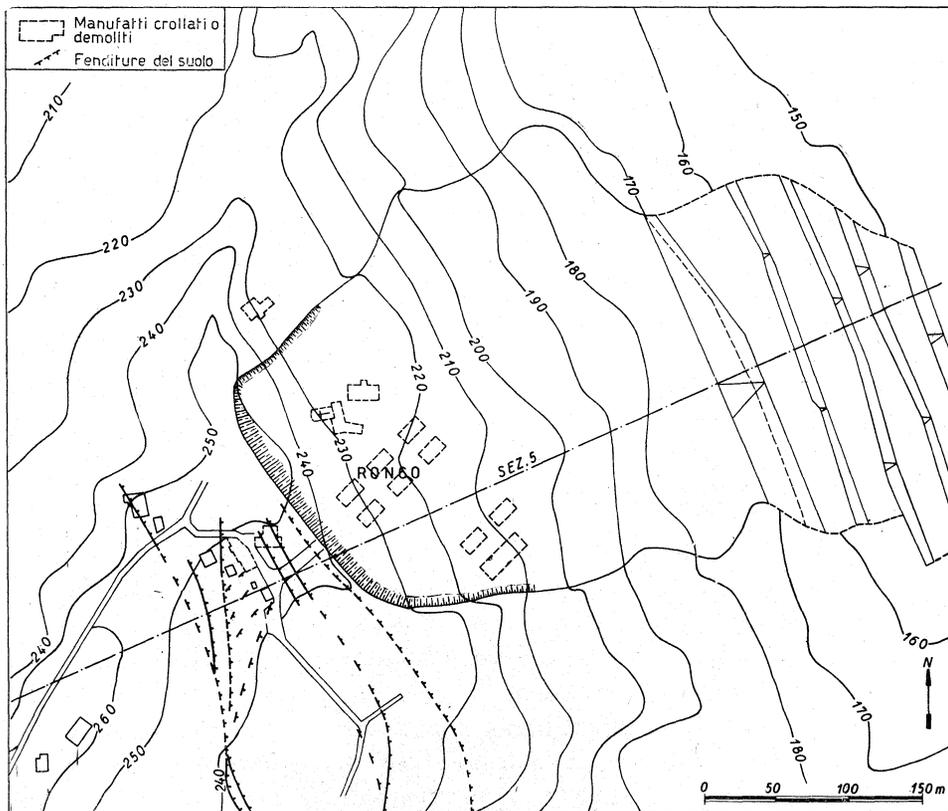


Fig. 3. - Planimetria della zona del Ronco nell'agosto 1961.

Nell'inverno 1960-61 la zona non fu sede di dissesti di massa di qualche importanza; soltanto nell'estate del 1961 il fenomeno riprese in zone più a monte di quelle precedentemente interessate (figg. 3 e 4). Tale ultimo dissesto portò inizialmente a movimenti di massa relativamente modesti (spostamenti dell'ordine di pochi dm) e dopo aver proseguito durante i primi mesi autunnali, sembrò attenuarsi nel mese di novembre.

Tutti i movimenti franosi sopra ricordati si sono verificati in corrispondenza di pendii relativamente dolci (12° - 16°). Dopo la fase preparatoria (apertura di fenditure o crepe del suolo e piccoli spostamenti superficiali), i franamenti sono avvenuti quasi sempre piuttosto bruscamente e, solo in qualche caso, hanno continuato per tempo lungo.

Le superfici di scoscendimento sono risultate profonde svariate decine di metri. Non sono stati rilevati rigonfiamenti apprezzabili in corrispondenza della base dei versanti franati.

Nelle zone dissestate si sono di regola manifestate delle modeste scaturigini di acqua con carattere temporaneo.

4. VERIFICHE DI STABILITÀ. — Per analizzare i fenomeni dal punto di vista quantitativo si è eseguita la verifica di stabilità del versante in frana, attribuendo al terreno i valori di c e φ forniti dalle prove di laboratorio e tenendo conto degli sforzi efficaci agenti sulla superficie di rottura ⁽⁵⁾.

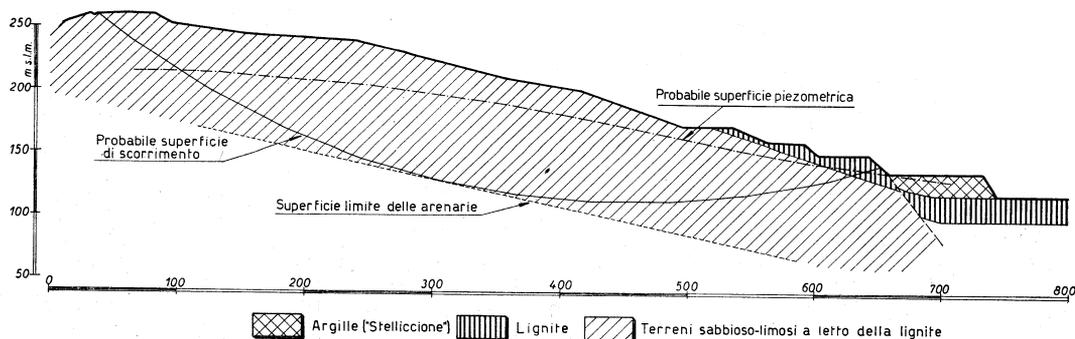


Fig. 4. — Sezione attraverso la collina del Ronco in corrispondenza della zona interessata dai movimenti franosi dell'estate 1961 (sez. 5).

In un primo caso (fig. 5) si è attribuito al terreno superficiale un basso peso dell'unità di volume per tenere conto dell'essiccazione estiva; in un secondo (fig. 6) il terreno è stato, invece, considerato saturo e si è pertanto assunto un più elevato peso dell'unità di volume.

Dal confronto tra i due casi risulta immediatamente che le condizioni di stabilità sono più sfavorevoli durante la stagione estiva (coefficiente di sicurezza $F, \cong 1$).

L'alleggerimento del terreno superficiale porta infatti ad una marcata diminuzione degli sforzi efficaci normali alla superficie di scoscendimento e, di conseguenza, ad una riduzione del contributo dell'« attrito » alla resistenza.

Questa influenza delle variazioni del peso dell'unità di volume sulla stabilità dei versanti ha carattere di generalità e si risente quando in un terreno agiscono delle pressioni interstiziali, relativamente elevate, dovute, sia a falde sotto carico, sia a falde a pelo libero. In quest'ultimo caso la superficie di pelo libero deve essere alta rispetto alla potenziale superficie di rottura.

(5) Date le caratteristiche idrogeologiche della zona, le pressioni interstiziali, derivanti dall'esistenza di falde idriche in pressione nei livelli sabbiosi della formazione a letto della lignite, risultavano note ed indipendenti dagli sforzi agenti. Di queste pressioni si è tenuto conto nelle verifiche di stabilità.

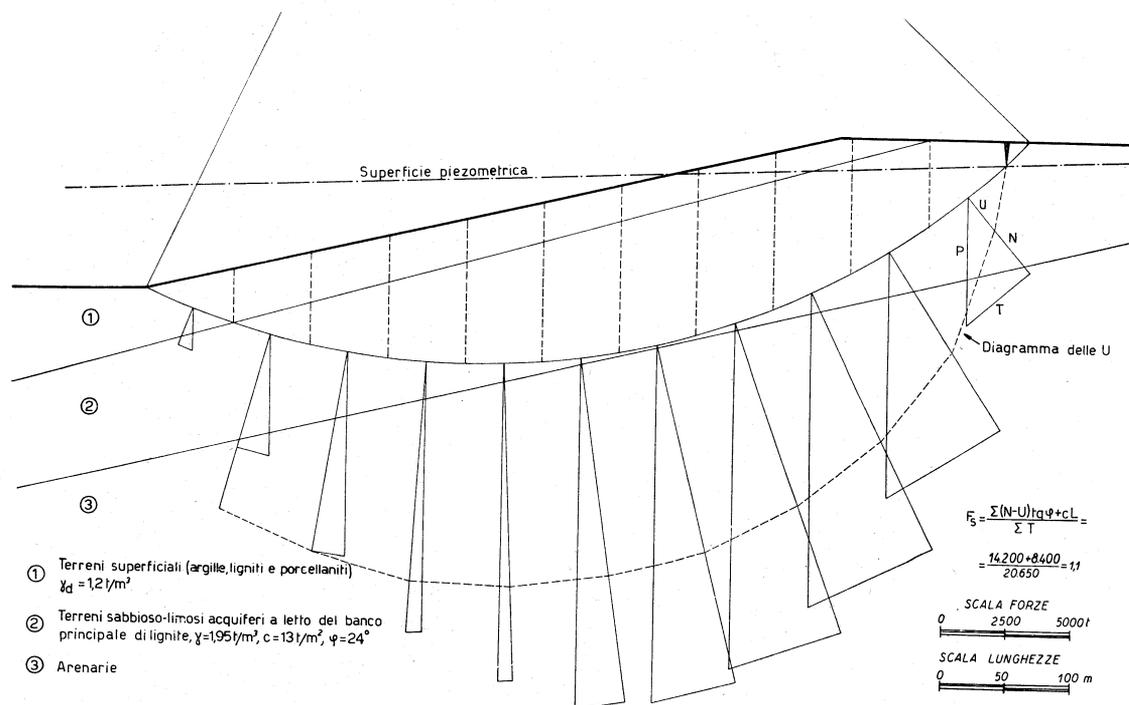


Fig. 5. – Verifica di stabilità del versante della collina del Ronco nelle condizioni corrispondenti alla stagione estiva.

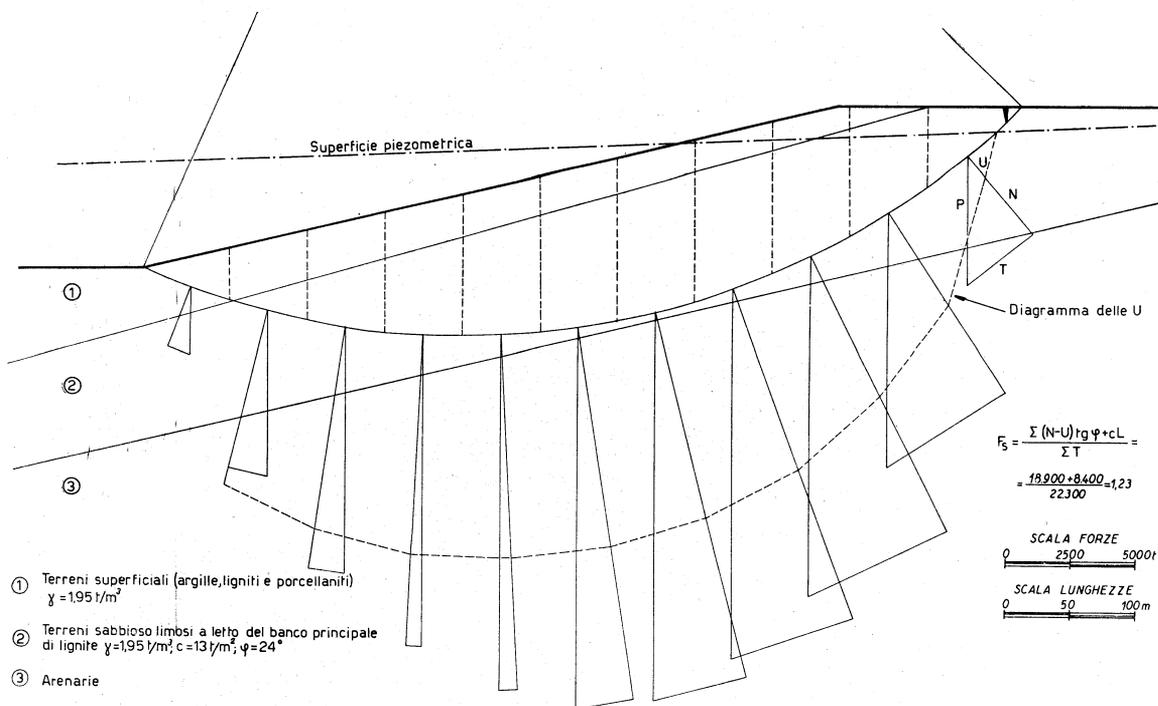


Fig. 6. – Verifica di stabilità del versante della collina del Ronco nelle condizioni corrispondenti alla stagione invernale.

Ciò può facilmente dimostrarsi, ad esempio, nel caso di un pendio indefinito formante un angolo β con l'orizzontale e costituito da un terreno omogeneo dotato di coesione c ed angolo d'attrito φ (fig. 7). Rispetto ad un potenziale scoscendimento lungo una superficie piana parallela alla superficie del suolo, il coefficiente di sicurezza è dato da:

$$F_s = \frac{(\gamma H \cos^2 \beta - U) \operatorname{tg} \varphi + c}{\gamma H \operatorname{sen} \beta \cos \beta}$$

Ponendo questa espressione nella forma:

$$F_s = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{c - U \operatorname{tg} \varphi}{\gamma H \operatorname{sen} \beta \cos \beta}$$

risulta immediato che per dati valori di φ , c , β , U , il valore di F_s decresce al diminuire di γ se $c - U \operatorname{tg} \varphi < 0$.

L'influenza delle variazioni di γ sulla stabilità è stata esaminata per il caso schematico di una scarpata in un terreno sede di una falda (fig. 8), calcolando i coefficienti di sicurezza per diversi valori della coesione (c), dell'angolo di attrito (φ) e dell'angolo di scarpata (β).

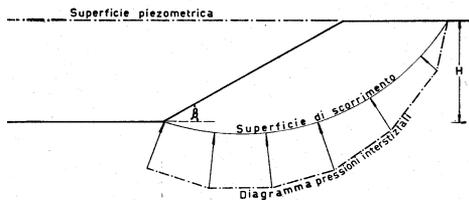


Fig. 8. - Sezione schematica di una scarpata in un terreno sede di falda. Il diagramma delle pressioni interstiziali agenti sulla superficie di scorrimento è riportato in scala ridotta.

I risultati dei calcoli sono riportati nei grafici della figura 9 nei quali si rileva che la diminuzione di γ porta ad una riduzione del valore del coefficiente di sicurezza F_s , quando l'angolo di attrito è elevato e la coesione del terreno e l'angolo di scarpata sono piccoli.

Nel caso, invece, di scarpate fortemente pendenti (β elevato) costituite da materiale dotato di angolo d'attrito relativamente piccolo e di coesione elevata, il coefficiente di sicurezza decresce all'aumentare di γ .

La franosità estiva, dipendente dall'alleggerimento dovuto all'essiccamento dei terreni superficiali, può dunque verificarsi su scarpate o pendii relativamente poco inclinati in terreni dotati di un elevato angolo di attrito e di coesione relativamente scarsa (ma mai nulla almeno nella parte inferiore). Nel caso, invece, di materiali ad elevata coesione ed angolo di attrito relativamente basso e di scarpate molto pendenti, all'alleggerimento del terreno corrisponde un miglioramento delle condizioni di stabilità e le condizioni più sfavorevoli tendono a verificarsi nella stagione invernale.

5. CONCLUSIONI. - L'analisi dei fenomeni descritti porta a concludere che la diminuzione del peso dell'unità di volume del terreno può essere causa determinante (o per lo meno concausa) di uno scoscendimento.

Ciò può verificarsi quando in un terreno agiscano pressioni interstiziali che superino un determinato limite.

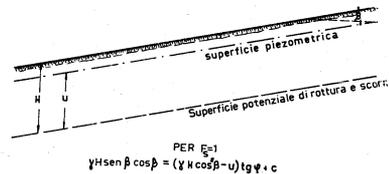


Fig. 7.

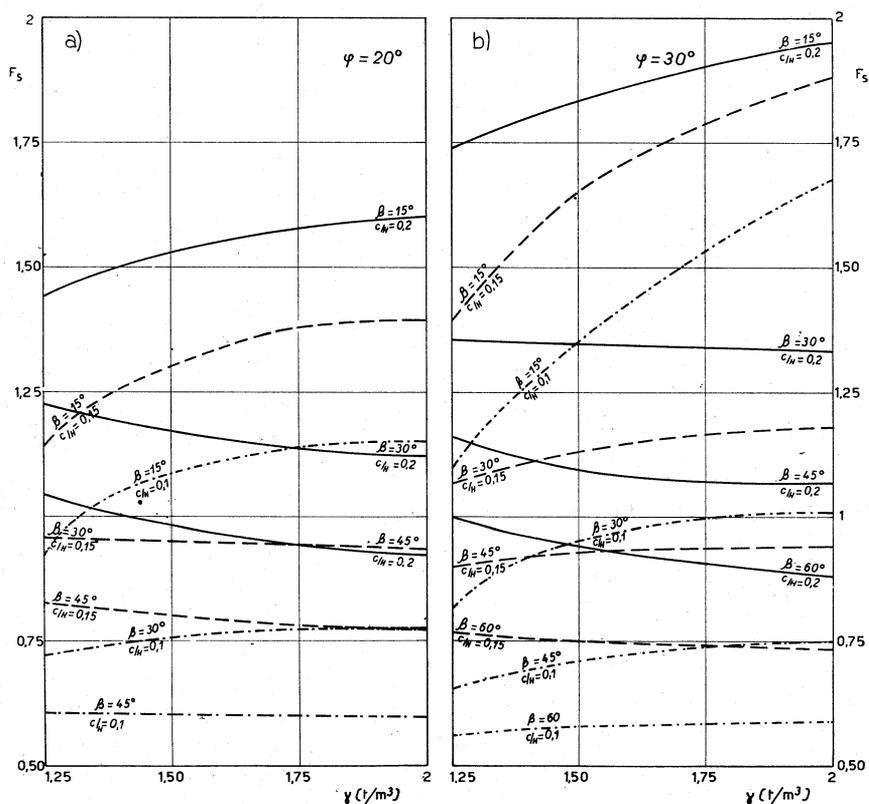


Fig. 9. - Coefficienti di sicurezza di pendii in terreni in cui agiscono pressioni interstiziali, in funzione del peso dell'unità di volume (γ), della coesione (c), dell'angolo di scarpata (β).

a) terreno con $\varphi = 20^\circ$; il valore di F_s decresce al diminuire di γ per $\beta = 15^\circ$ e $c/H = 0,1 \div 0,2$;
 b) terreno con $\varphi = 30^\circ$; il valore di F_s decresce al diminuire di γ per $\beta = 15^\circ$ e $c/H = 0,1 \div 0,2$ e per $\beta = 30^\circ$ e $c/H = 0,1 \div 0,15$.

In tali casi, infatti, per effetto della diminuzione del peso si riducono gli sforzi efficaci normali alla superficie di rottura; tale riduzione non è bilanciata da una corrispondente diminuzione degli sforzi attivi in favore del moto.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] GOLD O., *La prima coltivazione di lignite a cielo aperto in Italia presso Castelnuovo dei Sabbioni (Arezzo)*, «L'Industria Mineraria», 8, 3, pp. 173-185 (1957).
- [2] JANBU N., *Stability analysis of slopes with dimensionless parameters*, «Harvard Soil Mech Series», 46, Cambridge (Mass. U.S.A.), 1954.
- [3] SESTINI A., *Stratigrafia dei terreni fluvio-lacustri del Valdarno superiore*, «Proc. verb., Soc. Toscana di Scienze Naturali», 45, 5, pp. 37-41 (1936).
- [4] SKEMPTON A. W., DE LORY F. A., *Stability of natural slopes in London clay*, «Proc. IV Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.», vol. II, Londra, 1957.
- [5] ZIMMERMANN K., *Über das Verhalten des Deckgebirges und des kohlenflözes beim Aufschluss des Braunkohlentagebaus Santa Barbara*, «Braunkohle», 14, 1, pp. 1-10 (1962).