

Un terreno desertico metastabile

P. SEMBENELLI*

SOMMARIO: Durante gli scavi per un canale di irrigazione nel deserto costiero del Perù meridionale, si manifestarono estesi ed inconsueti fenomeni di fessurazione del terreno circostante. Le fessure si aprirono su un reticolo equidirezionale giungendo a superare le dimensioni di 30 cm. La storia geologica della regione, collegata al processo di sollevamento della piattaforma continentale, favorì la formazione di minerali argillosi illitici, la cui presenza è stata confermata da analisi diffrattometriche e chimiche, entro ad una massa di « caliche » tipico. In base a considerazioni teoriche e sperimentali sulla compressibilità delle illiti a differenti concentrazioni ioniche del liquido interstiziale, sembra sia possibile dare al fenomeno una spiegazione nel senso di un improvviso collasso di una struttura metastabile costituitasi in tempi geologici attraverso al graduale dilavamento delle illiti, con depressione del « doppio strato » ma senza la conseguente riduzione di volume di tutto il terreno.

1. Il fenomeno.

È caratteristica della morfologia del Perù meridionale la costa che a brevissima distanza dal mare si eleva bruscamente a una quota superiore ai 1000 metri. Di qui, verso l'entroterra, si stende un grande altopiano, profondo fino a 40 chilometri, che va lentamente e dolcemente salendo fino alle prime pendici della Cordillera Andina.

Il clima di tutto l'altopiano, fino al mare, è assolutamente secco ed il paesaggio, di conseguenza, tipicamente desertico. L'assenza di vegetazione e di ogni altro elemento di mutazione superficiale è totale. Solo sottili lingue di sabbia risalgono, sfiorando il terreno verso l'entroterra, trascinate dai venti monodromi.

Sull'altopiano, in prossimità della città di Arequipa, sono in corso di realizzazione numerosi piani irrigui che richiedono lo scavo di lunghi canali. Durante lo scavo del Canale Adduttore Principale della irrigazione di La Joya, si verificarono ripetutamente appariscenti fenomeni di fessurazione nei pressi del villaggio di S. Josè. Dopo essere apparse quasi all'improvviso, ed aver assunto dimensioni eccezionali, le fessure si arrestarono rapidamente.

Il Canale si snoda alla periferia di una vasta area piatta, al piede di colline tondeggianti che la delimitano verso l'entroterra. Il tracciato, in terreno dolcemente ondulato (la pendenza non supera in generale 4 in orizzontale su 1 in verticale), risulta così ad andamento regolare. Le dimensioni dell'opera sono ridotte: il vero e proprio prisma idraulico è mediamente largo 1,5 m alla base e 2,5 m in sommità, con una profondità media di 2 m. Due banchine larghe circa 1 m fiancheggiano il prisma su entrambi i bordi. L'o-

pera è in trincea di piccola profondità: generalmente da 2 a 3 m, in rari punti si toccano i 6 m.

Il terreno è consistente tanto da impedire lo scavo a mano e da richiedere l'impiego di esplosivi anche se in basse quantità. Al momento della costruzione si ricorre così al metodo, comune in Perù, dei « calambucos ». Esso consiste nello scavare a mano piccoli pozzi (calambucos) spinti a profondità tale da raggiungere il fondo del canale e nel farvi brillare una carica di esplosivo per allentare il terreno che viene poi scavato a mano o a macchina. La distanza tra calambucos varia con i volumi da scavare e le caratteristiche del terreno. Si impiegano in media 150 - 200 g di esplosivo non dirompente per ogni m³ di terreno.

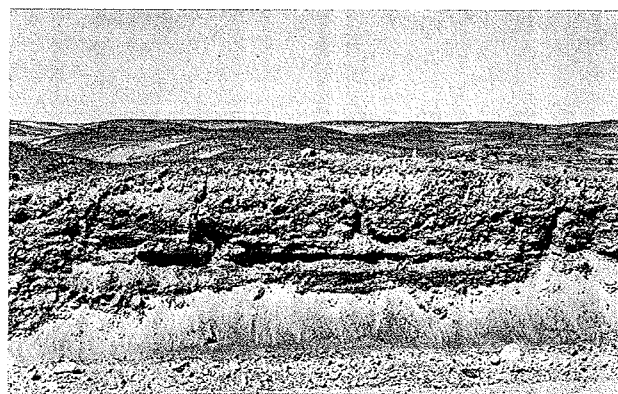


Fig. 1. - Il paesaggio dell'altopiano nella zona della Pampa de la Joya. In primo piano una parete tagliata nel Caliche per lo scavo del Canale Adduttore Principale.

Non sono trascorsi molti giorni dallo sparo dei calambucos e dallo scavo del canale che nel terreno circostante si aprono numerose spaccature beanti e continue. Esse si intersecano su un reticolo quadrato o esagonale che si estende per decine di metri a entrambi i lati del canale. A valle del canale le fratture si osservano ancora a 50 m di distanza. Le fratture più pronunciate

* Dr. ing. Piero SEMBENELLI - ELC - Electroconsult, Milano.

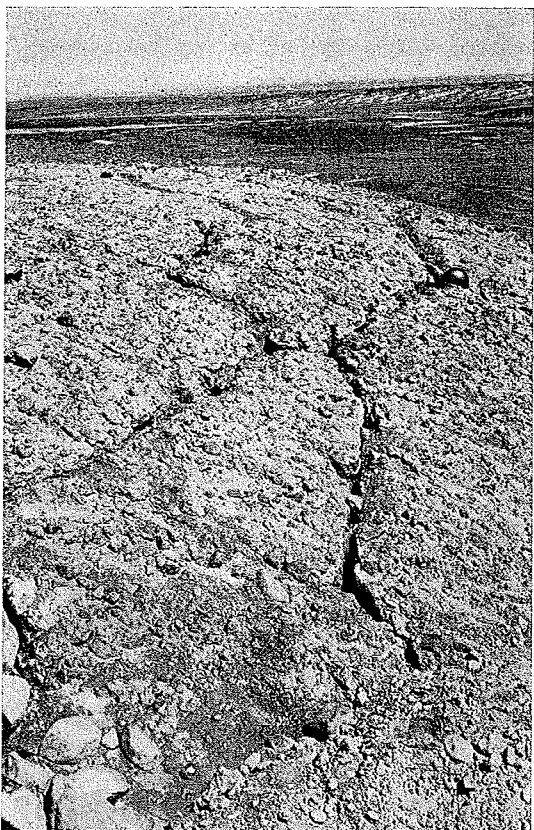


Fig. 2. - Aspetto delle fratture reticolari in superficie. La zona fotografata è a oltre 50 m dal canale che rimane sulla sinistra.

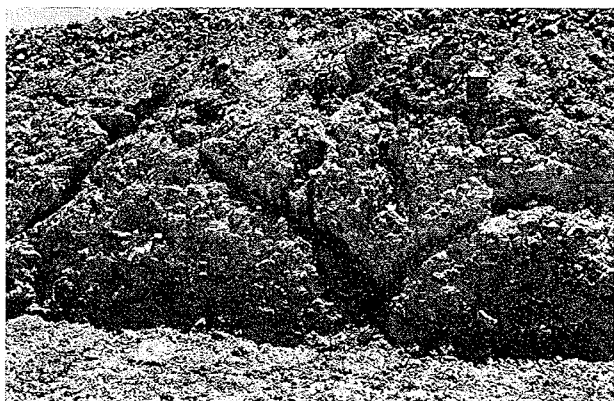


Fig. 3. - Traccia di fratture intersecantesi, parzialmente cicatrizzate, su una scarpata di scavo.

hanno andamento parallelo al canale ed alle linee di livello del terreno. Esse sono più frequenti in prossimità dei promontori isolati e di pendii ripidi. Molte fratture minori sono celate sotto la coltre sabbiosa superficiale.

Una osservazione più attenta porta a notare qua e là, anch'esse più frequenti ove il terreno assume pendenze maggiori, vecchie fratture cicatrizzate da sabbia e piccole pietre ormai cementate. In prossimità delle fratture cicatrizzate, le nuove si riducono di numero e dimensioni.

La larghezza delle fratture varia da pochi centimetri a oltre 30 cm. La loro profondità non è accertabile con sicurezza ma raggiunge i vari metri. Quello che si nota a prima vista è la mancanza di dislocazione tra le labbra della frattura ad ogni stadio della sua evoluzione.

La sezione del canale si riveste con masselli di pietra in malta di cemento man mano che lo scavo procede senza prestare molta attenzione alle



Fig. 4. - Dettaglio di una frattura di oltre 30 cm in prossimità del canale. Notare l'orizzontalità del terreno e l'assenza di dislocazioni tra le labbra.

fratture. Tutte le fratture che tagliano l'asse del canale hanno un effetto più o meno importante sul rivestimento che per un certo tempo si fessura senza però dislocamenti apprezzabili. La larghezza delle fessure nel rivestimento è inferiore a 1 cm, raramente giunge a 2 cm.

Dopo un periodo di qualche mese di continue riparazioni il fenomeno si arresta. Le fratture nel terreno sono già apparentemente immobili. Sembra che il rivestimento abbia risentito solamente della fase finale del ben più ampio fenomeno di fessurazione del terreno circostante.

La trincea del canale, le cui scarpate hanno una pendenza di circa 0,5 in orizzontale su 1 in verticale, appare perfettamente stabile. Anche il profilo altimetrico del canale si mantiene senza assestamenti di entità significativa.

Il fenomeno è decisamente inusuale e non facile da spiegare. Quello che appare chiaro fino dal principio è che non si tratta di un comune fenomeno di instabilità di pendio. Oltre tutto scarpate artificiali, anche molto ripide, sono perfettamente stabili. Sembra quindi che una spiegazione vada cercata nella natura e nelle caratteristiche fisico-chimiche del terreno.

Si inizia così una serie degli studi, prelievamenti ed analisi dei quali si parla più avanti.

2. La storia geologica.

Durante il Plio-Pleistocene ed il Quaternario, la Cordillera Andina Centrale si sollevò di oltre 2000 m.

Con la Cordillera si sollevò ed emerse parte della piattaforma continentale: il grande altopiano costiero non è altro che la piattaforma continentale terziaria.

Esso è formato da uno zoccolo di quarziti, arenarie e peliti, tutte rocce sedimentarie antiche della serie Yura del Giurassico, coperte da depositi alluvionali provenienti dalla erosione andina e soprattutto da depositi piroclastici prodotti dalla grande attività vulcanica contemporanea al sollevamento. Questi depositi formano coltri imponenti, di potenza compresa tra i 1000 ed i 1500 m.

Accumulatisi in ambiente marino di litorale hanno subito la alterna e ripetuta azione del mare, dei fiumi, delle precipitazioni e dei venti.

Sali solubili, come i Cloruri di Na e Mg ed i Solfati di Na, e sali insolubili, come i Solfati ed i Carbonati di Ca e Mg, si accumularono nei terreni assieme a Sali e Silicati di Al e vennero variamente concentrati, diluiti, dilavati e fatti circolare dalle acque che permeavano i terreni e dall'evaporazione.

Da misure e controlli della salinità totale attuale del terreno risulta un maggior tenore di sali nei terreni più prossimi alla superficie e nelle zone di quota più bassa. Ciò probabilmente indica che i sali affluivano in superficie trascinati nel ciclo dell'evaporazione e venivano progressivamente trasportati verso il mare dalle acque freatiche percolanti per gravità. Certamente durante le fasi finali dell'episodio di emersione e sollevamento, acque dolci di fiumi e di pioggia hanno avuto il tempo di dilavare in varia misura i terreni abbassandone il livello di salinità e creando per contro importanti accumuli salini localizzati, quasi puri, ancora visibili.

Lo stabilirsi delle condizioni desertiche che durano tutt'ora, paralizzò la circolazione dei sali. Si calcola che l'attuale clima desertico, con umidità media annua 45%, evaporazione 2300 mm, e precipitazioni sporadiche che non arrivano a totalizzare i 100 mm/anno, si sia stabilita nella regione da oltre 50.000 anni.

Conseguenza diretta di quanto sopra, ed in stretta relazione con la stagnazione di sali in terreni aridi, è la formazione di agglomerati eterogenei, indicati generalmente col nome di « Caliche », formati da elementi angolari di rocce locali con sabbia e materiali fini, tutti legati da sali solubili ed insolubili e da composti colloidali.

Essi rappresentano masse la cui stabilità è direttamente legata all'assenza di precipitazioni ed alla stabilità delle condizioni di umidità e temperatura atmosferiche, cioè alla persistenza di un clima desertico temperato quale è quello dell'altopiano.

La zona è area di intensa sismicità.

3. Il terreno.

Il terreno nel quale fu scavato il canale e nel quale si manifestarono i fenomeni descritti appartiene al Caliche tipico.

Del Caliche, per sua natura, interessa evidentemente più la frazione salina e colloidale, cementante, che la frazione sabbiosa e grossolana la quale può essere pressoché qualsiasi, sia mineralogicamente che granulometricamente.

Nei terreni di S. José de La Joya si può dire che la pasta cementante è visibile quasi ovunque ma in quantità variabile e diversamente colorata da zona a zona, anche se tendenzialmente rimane sempre più chiara del terreno circostante. Non si parlerà quindi volutamente di rapporti quantitativi tra i vari componenti dato che essi non sarebbero generalizzabili.

La pasta cementante del Caliche, nell'area ove fu osservato il fenomeno, è una massa biancastra, di aspetto tufaceo, piuttosto leggera ma dura da rompere. La frazione grossolana è composta da granelli di Quarzo, sabbie eterogenee e vetro vulcanico nero.

L'Analisi Chimica, eseguita su materiale essiccato a 105 °C e macinato 2 volte, ha denunciato: materiale sostanzialmente costituito da Nitrato di Na, Solfato di Ca, Silicati di Fe, Al, K.

Il Nitrato di Na è parzialmente insolubile.

Il Solfato di Ca (gesso) è solo parzialmente idratato e quindi fortemente igroscopico.

I Silicati di Fe ed Al costituiscono la parte più dura del campione.

L'Analisi Diffrattometrica, condotta sulla parte più fina della pasta cementante macinata, dispersa in acqua e concentrata per evaporazione in modo da ottenere una disposizione il più possibile ordinata dei cristalli, denuncia la presenza marcata di gesso e di un minerale argilloso caratterizzato da una distanza tra i piani basali dell'ordine di 10 Å, distanza che non si modifica saturando il materiale con glicerina. Ciò classificherebbe il minerale argilloso come Illite. In fig. 5 è riprodotto uno dei diffrattogrammi più tipici.

La presenza di Illite come minerale argilloso predominante è giustificata dalle condizioni di meteorizzazione instauratesi alla fine della evolu-

zione geologica della regione, condizioni rimaste poi stabili per un tempo assai lungo.

La degradazione di rocce ignee acide in am-

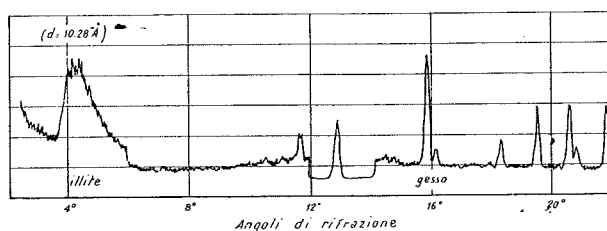


Fig. 5. - Diffratogramma di un campione di Caliche della Pampa de La Joja (laboratorio Università di Roma).

biente di scarse precipitazioni e drenaggio carente, ove cioè gli alcali scissi dalla roccia madre non vengono allontanati dall'area di degradazione, ha come prodotti finali preferenziali Illiti e Montmorilloniti. Le prime tendono a formarsi in ambienti di forte concentrazione di K, condizione favorita dall'originario ambiente marino di deposizione dei terreni dell'altopiano. La presenza di Ca, reso certamente disponibile dalla dissoluzione delle masse calcaree e gessose ancor oggi visibili sulla Cordillera, oltre che presente in forma di solfato come indicano i diffratogrammi, è un fattore che favorisce la formazione di Illiti mentre blocca l'accrescimento di strutture Kaolinitiche.

4. Una possibile spiegazione.

S'è vista la dolce morfologia del terreno, la stabilità di scarpate artificiali prossime alla verticale, l'apparire di fessure a entrambi i lati del canale, più ampie ed estese a valle che a monte, fatti tutti che contraddicono la cinematica di un comune fenomeno di instabilità di pendio.

L'andamento delle fessure, secondo 2 o 3 direttrici tra loro formanti angoli tra 90° e 120°, la larghezza delle fessure e la mancanza di dislocazione tra le labbra di una stessa fessura sembrano quasi il risultato di una contrazione pressoché isotropa del terreno cioè il collasso di una massa portata dalla evoluzione geologica in condizioni di metastabilità.

Pur non essendo completamente chiaro il meccanismo del fenomeno è sostanzialmente di questo tipo la spiegazione che crediamo si possa dare all'accaduto e ciò in base ad alcuni concetti sulla compressibilità delle argille e a risultati sperimentali relativi alle Illiti che richiamerò brevemente.

I minerali argillosi sono, in maggioranza, cristalli a struttura stratificata equidirezionale, ri-

conducibile alla successione periodica di insiemi planari ottaedrici di Gibsite $2\text{Al}_2\text{OH}_6$, Brucite $2\text{Mg}, 2\text{OH}_6$ e di insiemi planari tetraedrici di Silice SiO_4 , il cui spessore è inferiore a 5 Å.

Mentre ciascun insieme planare (sia tetraedrico che ottaedrico) può accrescersi indefinitamente in direzione laterale, l'accrescimento del cristallo nel senso dello spessore (cioè per addizione ritmica di insieme planari) è ostacolato dalla debolezza dei legami corrispondenti a determinati livelli (tipico il debole legame tra insiemi ottaedrici in contatto tra loro).

Da questa disuniformità tra le possibilità di accrescimento nelle tre direzioni principali risulta la marcata tendenza dei cristalli di minerali argillosi ad assumere forma lamellare. Nel caso specifico delle Illiti, formate dalla sequenza degli insiemi planari Silice-Brucite-Silice legati tra loro da atomi K, l'unità mineralogica ha generalmente dimensioni dell'ordine di 10 Å in spessore e 1000 Å in larghezza e lunghezza.

Caratteristica dei minerali argillosi è la loro spiccata possibilità di scambio ionico cioè la capacità di bloccare un certo numero di ioni nella immediata vicinanza del cristallo, capacità generalmente più forte in senso cationico che in senso anionico. La capacità di scambio cationico delle Illiti varia tra 10 e 40 meq/100 gmo ed è tanto minore quanto più grandi sono le dimensioni del singolo cristallo. Secondo alcuni sperimentatori la capacità di scambio risente anche del contenuto d'acqua del minerale e diminuirebbe con il diminuire di questo (17 meq/100 gmo per minerale mantenuto 2 giorni a 105 °C, 9 meq/100 gmo per minerale mantenuto 2 giorni a 700 °C).

Le ragioni della capacità di scambio ionico sono generalmente individuate nella sostituzione isomorfa di parte degli atomi Mg^{++} , Al^{++} , Si^{+++} dei reticoli tetraedrici e ottaedrici fondamentali con atomi dimensionalmente compatibili di Fe^{+++} , Ca^{++} , Na^+ , K^+ , Li^+ o di ossigeni O^{--} con ossidrilici OH^- . La differenza tra la valenza dell'atomo fondamentale a quella dell'atomo sostituito si manifesta come una deficienza elettrica dell'unità cristallina. La forma appiattita dei cristalli permette la percezione di queste deficienze elettriche alla superficie del cristallo che appare così disseminata di cariche negative o positive. Segno ed ubicazione delle cariche variano da minerale a minerale. Nel caso specifico delle Illiti esse sono prevalentemente di segno negativo (favorendo quindi uno scambio cationico) e concentrate verso i bordi dei cristalli.

I cationi trattenuti dal cristallo per saturare le sue cariche negative, lo circondano assumendo

una distribuzione diffusa cioè una concentrazione decrescente con la distanza in forma esponenziale secondo la legge di Gouy-Chapman-Overbek. Questa distribuzione diffusa è dovuta sia al forte diametro degli ioni idrati sia, soprattutto, al loro livello termico che li forza in uno stato di movimento continuo.

Una argilla sarà quindi meglio intesa se guardata come un insieme di elementi formati da un « doppio strato »: un termine cristallino fisso in un reticolo definito che trattiene un termine ionico diffuso, in continuo movimento, di segno elettrico opposto. L'insieme assume uno spiccato comportamento colloidale. La concentrazione ionica nel doppio strato è molto maggiore che nel liquido intercrystallino.

L'interazione tra più doppi strati, cioè l'azione reciproca tra cristalli di argilla, è una forza di repulsione R' che inizia quando due doppi strati vengono in contatto.

Variando la concentrazione ionica del liquido intercrystallino varia lo spessore del doppio strato e varia proporzionalmente la forza repulsiva R' : essa diminuisce se il doppio strato si deprime ed aumenta se il doppio strato si espande.

In questo senso si può quindi parlare di una pressione osmotica (o di rigonfiamento), risultante dalla differenza di concentrazione ionica in prossimità dei cristalli e nel medio, come una delle forze principali che contribuiscono ad equilibrare l'insieme dei cristalli bilanciando l'azione di una forza esterna, per esempio la gravità.

La legge di Van't Hoff può essere presa come base per calcolare la pressione osmotica in funzione delle concentrazioni

$$P_s = RTc_o (c_c/c_o + c_o/c_c - 2)$$

con: R = costante dei gas, c_o = concentrazione ionica del medio, c_c = concentrazione del doppio strato nel piano equidistante da 2 cristalli.

E' chiaro che esistono valori di c_o e c_c che rendono P_s negativa, raggiungendo i quali cioè la pressione di rigonfiamento di una argilla si riduce gradualmente, annullandosi e divenendo alla fine una tensione di ritiro.

Anziché parlare di pressioni si può altrettanto bene parlare di variazioni di volume, specie se il sistema di sollecitazioni è solo la gravità, come nel nostro caso, e se i cristalli hanno la possibilità di muoversi per ricercare una nuova distanza di equilibrio.

La fig. 6 riporta le variazioni di volume di una Illite in equilibrio rispetto a pressioni differenti, conseguenti alla variazione di concentrazione di

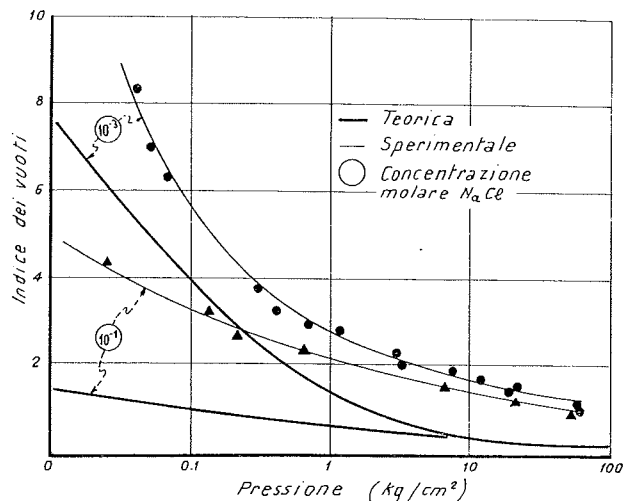


Fig. 6. - Cambio di volume di una Illite in funzione della concentrazione di NaCl nel liquido interstiziale, per differenti pressioni applicate (Bolt).

NaCl nel medio, sia calcolate in base alla legge di Van't Hoff, che sperimentali.

Va notato, agli effetti di una eventuale valutazione quantitativa, che la fig. 6 si riferisce a Illite $Na < 2 \mu$. Dati sperimentali indicano una riduzione progressiva dell'entità delle variazioni di volume per minerale a granulometria più grossolana.

Avvicinando quanto s'è ora brevemente ricordato alle linee della storia geologica della regione sembra possibile pensare che le masse di Caliche abbiano potuto formarsi con componente Illitica predominante ed in medio a forte concentrazione di NaCl.

Durante la fase di emersione e sollevamento della piattaforma continentale la concentrazione ionica si è lentamente abbassata per dilavamento da acque di pioggia e di fiume.

All'instaurarsi in forma permanente dell'ambiente desertico, l'evoluzione del fenomeno si è quasi certamente arrestata.

È, forse, iniziata allora una nuova fase durante la quale, per il diminuito contenuto d'acqua della massa la sua capacità di scambio, cioè di trattenere ioni assorbiti può essere diminuita: ciò avrebbe reso alcuni ioni liberi di allontanarsi. Per le particolari condizioni ambientali, alcuni degli ioni del doppio strato si possono essere disidratati riducendosi notevolmente in dimensioni (lo ione Na idratato ha un raggio di 7,8 Å mentre disidratato ha un raggio di soli 0,9 Å).

Entrambi questi fenomeni, verificandosi, avrebbero prodotto una ulteriore depressione del doppio strato e la diminuzione delle forze repulsive intercrystalline. Il terreno avrebbe dovuto, d'accordo, cambiare di volume contraendosi.

L'estrema lentezza e gradualità di entrambi questi processi ha permesso però allo scheletro del Caliche di accollarsi gradualmente e di assorbire attraverso legami di tipo minerale-minerale, preesistenti o recenti, gli sforzi prima assorbiti dai doppi strati interagenti e respingentisi.

Così, lentamente, pochi punti rigidi e sovrasollecitati si sono trovati a mantenere nelle sue dimensioni originali un terreno che altrimenti avrebbe subito una contrazione.

Si è giunti ad una situazione metastabile, simile a quella di una argilla sensitiva ma in terreno arido.

Qualche scossa sismica di particolare intensità ha fatto cedere in parte il terreno ed aperto fessure poi cicatrizzate con sabbia e polveri lentamente litificate. In prossimità di queste aree collassate il Caliche ha praticamente ritrovato una condizione di equilibrio. Altrove, in zone ancora integralmente metastabili, gli scoppi dei calamucos esplosi per scavare il canale, hanno scosso

la struttura al di là delle sue riserve di resistenza e le contrazioni non hanno tardato a manifestarsi sommandosi in grandi fratture distese su un reticolo regolare a testimoniare l'andamento isodirezionale del collasso.

Questa spiegazione giustifica anche il subitaneo apparire delle contrazioni ed il loro veloce smorzamento. Non chiarisce il come le deformazioni verticali possano essere state, come pare dalle poche osservazioni fatte, alquanto inferiori a quelle orizzontali. Con tutta probabilità, ritardando di qualche mese la messa in opera del rivestimento del canale, esso non avrebbe sofferto danni.

BIBLIOGRAFIA

- GRIM R. E. (1953) - *Clay Mineralogy*. Mc Graw Hill, New York.
- BOLT G. H. (1956) - *Physico-Chemical analysis of the compressibility of pure clays*. Geotechnique, vol. 6 n. 2.
- LAMBE T. W., WHITMAN R. (1969) - *Soil Mechanics*. Wiley e Sons, New York.

SUMMARY

A metastable desert soil

During excavations for an irrigation canal on the Peruvian coastal desert, extensive unusual cracking of the surrounding ground took place. Fissures followed a reticular pattern and opened often in excess of 30 cm.

The geological history of the area, connected to the rising process of the coastal platform, favored the formation of Illite type clay minerals, whose presence was

confirmed by X-ray diffraction tests and chemical analysis, within a Caliche mass.

Based on theoretical and experimental considerations on Illite compressibility at different pore fluid ionic concentration, an explanation of the phenomenon is attempted on the basis of a sudden collapse of a metastable structure formed in geological times through the gradual leaching of Illite, causing double layer depression without the corresponding reduction of soil volume.