

Recensioni

Influenza dei fattori geologici sulle proprietà tecniche delle rocce sciolte (*Influence of geological factors on the engineering properties of sediments*).

KARL TERZAGHI - *Economic Geology*, Fiftieth Anniversary Volume, 1955, pagg. 557-618.

Il Prof. Karl TERZAGHI ha pubblicato in questi ultimi anni una serie di interessanti articoli su alcuni dei più diffusi periodici di Ingegneria Civile.

L'illustre Autore si è proposto in questi articoli due scopi. Il primo è quello di riesaminare i fondamenti della moderna Geotecnica per inquadrarli nell'ambito della Geologia e della Ingegneria Civile in base agli insegnamenti derivanti dalla sua lunga e profonda esperienza personale. Il secondo scopo è quello di effettuare una sintesi delle attuali conoscenze intorno ad alcuni degli argomenti più difficili e controversi della materia; gli elementi per questa sintesi sono tratti ancora in gran parte dalla sua esperienza personale e per il resto dai contributi più significativi apparsi nella letteratura tecnica.

La personalità dell'A. ed il grande interesse tecnico degli argomenti trattati rendono oggi lo studio di questi articoli un indispensabile completamento delle nozioni contenute nei due notissimi volumi *Theoretical Soil Mechanics* e *Soil Mechanics in Engineering Practice*, che trovano posto già da tempo, anche in Italia, nelle biblioteche di molti ingegneri civili.

In *Mechanics of landslides* (1) TERZAGHI ha trattato i fenomeni di frana in tutta la loro generalità, esaminandone le caratteristiche e le cause: *Origin and functions of Soil Mechanics* (2) è una sintesi storico-critica della Geotecnica dalle origini ai nostri giorni; nella memoria *Anchored bulkheads* (3) della quale pubblicheremo la recensione in uno dei prossimi fascicoli di questa rivista, TERZAGHI analizza il comportamento delle palancole con ancoraggio. Il più recente di questi articoli *Evaluating coefficients of subgrade reactions* (4), rappresenta un tentativo di chiarire il vero significato del coefficiente di sottofondo, del quale tanto comunemente si avvalgono gli ingegneri in molti calcoli di progettazione e di verifica.

(1) TERZAGHI K. - *Mechanics of landslides* - Berkeley Volume - Geol. Soc. of America, 1950 (rec. a cura di V. Cotecchia in *Geotecnica* 4, 1954).

(2) TERZAGHI K. - *Origin and functions of Soil Mechanics* - Trans. A.S.C.E. Vol. C.T. (rec. a cura di R. Jappelli in *E. E.* 4, 1955).

(3) TERZAGHI K. - *Anchored bulkheads* - Trans. A.S.C.E., Vol. 119, 1954, pagg. 1243-1280.

(4) TERZAGHI K. - *Evaluating coefficients of subgrade reactions* - *Geotechnique* Vol. V, 1955.

L'articolo che qui recensiamo, è forse uno dei più significativi, in quanto, lasciando da parte gli argomenti classici della Meccanica del Terreno, quali i due ultimi cui abbiamo accennato, rappresenta il concreto tentativo di aprire nuovi indirizzi alla Geotecnica mediante lo studio diretto dell'influenza esercitata dai fattori geologici sulle proprietà tecniche delle rocce sciolte. Sull'importanza di questa impostazione geologica degli studi e delle indagini geotecniche il Prof. TERZAGHI ha già più volte richiamato l'attenzione: come egli ha accennato nella breve prefazione scritta in occasione della pubblicazione del primo numero di questa rivista, la Geotecnica non è in grado di raggiungere i suoi scopi pratici se non viene intesa come mezzo per determinare le conseguenze tecniche di determinati aspetti geologici.

Nell'introduzione l'A. illustra innanzitutto il significato dell'espressione « *proprietà tecniche delle rocce sciolte* », tra le quali sono comprese tutte quelle proprietà che determinano il comportamento delle rocce sciolte medesime durante e dopo la costruzione delle opere di ingegneria.

L'influenza che i fattori di carattere geologico esercitano su queste proprietà è stata intuita dai tecnici fin dal secolo scorso; solo recentemente però è stato possibile esprimere numericamente queste proprietà e tradurre quindi in relazioni definite i legami esistenti fra esse ed i fattori geologici; l'A. osserva anzi che, prima dell'avvento della Geotecnica, molte delle proprietà più importanti delle rocce sciolte, quali l'attività e la sensitività dei materiali a grana fina e la porosità critica delle sabbie, non erano conosciute.

I fattori geologici che possono esercitare influenza sulle proprietà tecniche delle rocce sciolte vengono suddivisi dall'A. in tre grandi gruppi:

- a) fattori petrografici;
- b) modalità di trasporto e deposito;
- c) cambiamenti che intervengono dopo il deposito.

L'A. osserva che le nostre conoscenze intorno all'influenza di tutti questi fattori sulle proprietà meccaniche delle rocce sciolte sono ancora molto frammentarie e precisa che lo scopo dell'articolo è quello di riassumere nelle grandi linee quanto è oggi noto sull'argomento.

a) Fattori petrografici

Tra i fattori petrografici che esercitano la loro influenza sulle proprietà tecniche delle rocce sciolte, l'A. considera la composizione granulometrica, la composizione mineralogica e la forma dei granelli, la presenza dell'acqua e dell'aria nei pori, la composizione chimica dei complessi di adsorbimento.

L'A. rileva che tra la composizione mineralogica e la composizione granulometrica esiste una certa relazione. Gli elementi con diametro compreso fra 0,002 e 2 mm sono costituiti in prevalenza da frammenti, poco o per niente alterati, di quarzo, feldspato, calcite e mica; nella frazione $< 0,002$ mm prevalgono invece i minerali argillosi come la caolinite, la illite e la montmorillonite, originati da una profonda alterazione dei minerali costituenti originariamente le rocce stesse.

L'A. passa quindi ad esaminare l'influenza che i fattori petrografici, cui ora si è accennato, esercitano sulle seguenti proprietà: indice di porosità, permeabilità, plasticità, sensitività, attività, compressibilità, resistenza alle sollecitazioni esterne, andamento dei cedimenti nel tempo.

Indice di porosità

E' ben noto che l'indice di porosità e di un aggregato perfettamente incoerente di particelle equidimensionali è compreso entro limiti determinati: 0,35 ed 1,00. Senonché se si lascia sedimentare una sospensione di polvere di quarzo in acqua si ottengono valori di e superiori all'unità; il valore di e , e perciò la porosità del deposito, è tanto maggiore quanto minore è la dimensione dei granelli. L'A. ricorda i risultati di alcune sue esperienze eseguite nel 1925 ed avanza un'ipotesi per interpretarli.

Permeabilità

La permeabilità, oltre che nei problemi di filtrazione, ha una grande importanza nei problemi cedimenti-tempo ed in quelli dei rapporti fra la resistenza al taglio e la velocità di applicazione delle sollecitazioni esterne.

L'A. ricorda che per le sabbie a granulometria uniforme con elementi isometrici il coefficiente di permeabilità dipende dalla composizione granulometrica e dall'indice dei pori e può essere stimato mediante una delle note formule a tale scopo proposte. Se però la sabbia contiene una percentuale anche piccola di particelle a forma di scaglie, come la mica, queste formule perdono la loro validità.

Nel caso dei materiali a grana fina il coefficiente di permeabilità dipende in maniera molto marcata dalla natura dei complessi di adsorbimento; se ad esempio in una bentonite gli ioni Na vengono sostituiti con ioni Ca il coefficiente di permeabilità, a parità di indice di porosità, diviene molte volte più elevato.

Sul coefficiente di permeabilità esercitano dunque la loro influenza un gran numero di fattori e per stabilirne il valore non si può che eseguirne di volta in volta la determinazione sperimentale. Solo per la sabbia pulita valgono in prima approssimazione, come si è accennato, le relazioni empiriche che legano la permeabilità alla granulometria ed alla porosità.

Plasticità

L'esperienza ha dimostrato che i materiali più coerenti e più compressibili sono quelli che mostrano in

maniera più marcata le proprietà dei materiali plastici, e che per questi materiali esistono delle relazioni a carattere statistico tra la plasticità e molte altre proprietà che interessano la tecnica. Per questa ragione la plasticità dei materiali a grana fina è stata ed è oggetto di studi molto approfonditi.

L'A. illustra il noto criterio di classificazione dei terreni a grana fina basato sui limiti di consistenza e le relazioni che sussistono fra questi limiti, la composizione granulometrica, la composizione mineralogica e la natura dei complessi di adsorbimento. Per documentare la sua esposizione l'A. si avvale della carta di plasticità introdotta da A. CASAGRANDE nel 1948.

Sensitività

Se si effettua una prova di compressione a dilatazione trasversale libera su di un campione intatto di argilla e si ripete poi la prova dopo aver rimaneggiato il materiale e ricostituito il campione con lo stesso contenuto d'acqua e la stessa porosità iniziali, si ottengono dei valori della resistenza alla compressione in generale differenti nelle due prove. Al rapporto fra la resistenza alla compressione misurata sul campione intatto e quella misurata sul campione rimaneggiato si dà il nome di *sensitività* dell'argilla.

L'A. fornisce le possibili spiegazioni di questo comportamento delle argille e si sofferma ad illustrarne le conseguenze pratiche.

Le ragioni della diminuzione di resistenza conseguenti al processo di rimaneggiamento sono due. Innanzitutto il rimaneggiamento provoca una distruzione della struttura del materiale. In secondo luogo esso annulla quella parte di resistenza dovuta al fenomeno della tixotropia; ciò è provato dal fatto che lo stesso materiale rimaneggiato riacquista una gran parte della sua resistenza se viene lasciato riposare nelle medesime condizioni iniziali per un tempo sufficientemente lungo. L'effetto della tixotropia dipende in maniera assai marcata dalla composizione mineralogica: esso è massimo per i minerali argillosi del gruppo della montmorillonite.

La sensitività è inoltre legata all'indice di liquidità: più alto è tale indice, più alta è la sensitività. Le argille più sensitive hanno quasi sempre un indice di liquidità superiore ad uno.

Dalle notizie finora disponibili nella letteratura tecnica risulta che la maggior parte delle argille più sensitive appartiene al gruppo delle argille glaciali oppure a quel particolare gruppo di argille che, depositatesi inizialmente in mare profondo ed emerse in un secondo tempo, sono state sottoposte dopo l'emersione ad un processo di lisciviazione.

Nelle argille di origine glaciale la resistenza dopo rimaneggiamento diminuisce notevolmente in conseguenza della distruzione della struttura esistente in condizioni naturali.

Nelle argille del secondo gruppo l'elevata sensitività è da porsi in relazione con la sostituzione nei complessi di adsorbimento degli ioni Na con ioni Ca.

L'A. illustra infine le profonde differenze che sussistono dal punto di vista tecnico tra il comportamento delle argille normali e quello delle argille

molto sensitive, ricordando l'aspetto dei fenomeni di frana nei terreni in cui prevalgono queste ultime.

Attività

La relazione che intercorre tra i limiti di consistenza e la composizione granulometrica può essere espressa anche da un altro parametro, denominato da SKEMPTON nel 1953 «*indice di attività*»; esso è il rapporto tra l'indice di plasticità e la percentuale $< 0,002$ mm.

L'A. ricorda che l'attività dipende essenzialmente dalla composizione mineralogica e che, a parità di composizione mineralogica, può subire variazioni molto notevoli a seconda della natura dei complessi di adsorbimento; passando ad esempio, da montmorillonite calcica a montmorillonite sodica l'indice di attività aumenta da 1,5 a 7,2.

Compressibilità

In questo paragrafo l'A. si limita a considerare le formazioni di rocce sciolte «*normalmente consolidate*», cioè quelle formazioni dalla cui superficie non sono mai stati rimossi i carichi applicati, rimandando al capitolo seguente l'esame della compressibilità delle rocce sciolte precomprese.

Dopo aver discusso dei rapporti esistenti fra la forma della curva indice di porosità-carichi applicati e la sensitività delle argille, l'A. si sofferma ad illustrare l'influenza del fattore di forma dei granelli sulla compressibilità. Questo fattore viene definito come rapporto fra il peso dei granelli di forma appiattita presenti in un campione ed il peso secco totale del campione.

Per i materiali incoerenti costituiti da miscele di sabbia e mica l'esperienza dimostra che l'indice di porosità iniziale e la compressibilità aumentano rapidamente all'aumentare del fattore di forma.

Anche i materiali con elevato contenuto di minerali argillosi sono costituiti da una miscela di granelli isometrici e di granelli di forma appiattita; in questi materiali, però, il fattore di forma non è il solo parametro che influenza la compressibilità. Questa dipende infatti in maniera marcata dalla natura del complesso di adsorbimento, come è dimostrato da alcune recenti esperienze.

La compressibilità delle argille dipende quindi da due elementi distinti: il fattore di forma e l'insieme delle forze di attrazione e repulsione molecolare che hanno sede nei complessi di adsorbimento. L'A. fa osservare l'impossibilità di distinguere sul piano sperimentale gli effetti di questi due fattori.

Decorso dei cedimenti nel tempo

L'A. illustra la ben nota differenza di comportamento che esiste fra i materiali incoerenti e quelli coerenti dal punto di vista del decorso dei cedimenti nel tempo.

Per quanto riguarda i materiali incoerenti l'A. accenna agli studi di A. CROCE compiuti sui tipici materiali vulcanici del napoletano. Questi studi hanno dimostrato che anche per i materiali incoerenti esiste un sensibile effetto secondario, che, per i mate-

riali vulcanici sui quali sono state effettuate le indagini, è dovuto principalmente allo schiacciamento ed alla frantumazione dei singoli granelli sotto l'azione del carico.

Passando a discutere dei materiali coerenti saturi l'A., dopo aver riassunto i fondamenti della teoria della consolidazione, si sofferma sull'effetto secondario e richiama l'attenzione sulla relazione intercorrente fra l'intensità dell'effetto secondario e la natura del liquido che riempie i pori del materiale.

I cedimenti delle strutture, da attribuire ad effetto secondario, hanno un decorso nel tempo che varia all'incirca tra 0 e 2,5 cm/anno; è da rilevare però che, sebbene l'effetto secondario possa essere agevolmente osservato e misurato in laboratorio, i tentativi finora eseguiti per prevedere questi cedimenti sulla base di prove di laboratorio non hanno sortito esito soddisfacente.

Nel caso dei materiali coerenti non saturi è possibile avvalersi ancora della teoria della consolidazione, adattandola opportunamente per tener conto della presenza della fase gassosa. L'A. pone però in evidenza che il meccanismo della relazione che intercorre fra il carico applicato e l'indice di porosità di una roccia sciolta con elevato contenuto di aria non è stato ancora sufficientemente chiarito, nè è nota l'influenza che alcuni fattori di carattere chimico fisico esercitano su questa relazione.

Resistenza alle sollecitazioni esterne

La resistenza alle sollecitazioni esterne dipende, come è noto, dal valore della pressione neutra nell'istante della rottura. Tale pressione può essere considerata suddivisa in due parti: la prima è la pressione idrostatica esistente nel punto in esame prima dell'applicazione dello sforzo di taglio; la seconda parte della pressione neutra è quella che si desta all'atto dell'applicazione dello sforzo medesimo.

Il valore della pressione idrostatica può considerarsi noto. La seconda parte della pressione neutra, quella che si desta all'atto dell'applicazione dell'incremento di sollecitazione, dipende dalla natura del materiale. Per i materiali incoerenti questa pressione può essere positiva o negativa a seconda del valore della porosità del materiale; se la porosità è superiore alla porosità critica, la pressione è positiva, altrimenti essa è negativa. Per i materiali coerenti la pressione neutra è sempre positiva.

L'A. accenna poi al problema di porre in relazione la resistenza al taglio con le proprietà indici delle rocce sciolte. In questo settore sono stati di recente effettuati importanti studi, i quali sembrano dimostrare che tra i limiti di consistenza, la sensitività e la resistenza al taglio esistano delle relazioni di carattere generale. Allo stato attuale delle nostre conoscenze, data la grande complessità del problema, non è ancora possibile stabilire il grado di attendibilità di queste relazioni.

Prima di terminare il paragrafo l'A. accenna all'influenza della durata di applicazione dello sforzo sul valore della resistenza al taglio, influenza che è particolarmente sensibile nei materiali a grana fina e che acquista una grande importanza nello studio dei problemi di stabilità dei pendii.

b) Modalità di trasporto e di deposito

In questo capitolo l'A. esamina l'influenza dei fattori geologici, che intervengono nella genesi delle formazioni di rocce sciolte, sulle proprietà delle rocce sciolte medesime.

Secondo l'A. la conoscenza di questi fattori è ancora oggi molto frammentaria; ma ogni progresso in questo settore è di grande importanza pratica, perché riduce le incertezze esistenti nell'interpretazione dei risultati delle esplorazioni in sito e delle prove di laboratorio.

Granulometria dei depositi fluviali

La composizione granulometrica dei materiali alluvionali è generalmente variabile da punto a punto a causa della variabilità della distribuzione delle velocità dell'acqua sul fondo dell'alveo ed a causa delle variazioni stagionali della portata, che determinano periodi alterni di erosione e di deposito. L'A. accenna all'importanza delle relazioni statistiche nello studio di questi problemi e cita i risultati ottenuti al riguardo da alcuni autori. Particolare attenzione viene rivolta a quei caratteristici depositi fluviali di ghiaie prive di qualsiasi frazione sabbiosa, che nella letteratura anglosassone prendono il nome di *open work gravel*. Questi tipi di depositi, sulla cui origine ancora molto resta da chiarire, consistono in lenti e straterelli inglobati nel restante materiale.

La presenza di questi depositi di ghiaia, che hanno dimensioni limitate a qualche diecina di metri di lunghezza ed un paio di metri al massimo di spessore, non altera di regola le proprietà dei banchi alluvionali, nei quali essi sono inglobati. Non mancano esempi però, che l'A. cita, in cui questi depositi hanno creato difficili problemi, specialmente nella costruzione di dighe e gallerie, a causa della loro elevata permeabilità.

Compattezza dei materiali incoerenti depositati in acqua

Le proprietà meccaniche dei materiali incoerenti dipendono quasi esclusivamente dal grado di compattezza (altrimenti detto *densità relativa*), con il quale si presentano in sito. L'A. cita numerosi esempi, nei quali sono state rilevate differenze di comportamento fra sabbia sciolta e sabbia compatta: cedimenti di opere fondate su sabbia sciolta, cedimenti differenziali di opere fondate su depositi con grado di compattezza molto variabile, bassa resistenza al taglio di depositi di sabbia sciolta al di sotto della falda. Risulta quindi che la conoscenza del grado di compattezza è fondamentale ai fini di una adeguata descrizione dei materiali incoerenti.

Secondo l'A. il metodo che meglio si presta per la valutazione del grado di compattezza in sito è quello penetrometrico. Dalla forma stessa dei profili penetrometrici si può rilevare se un deposito sia sciolto o compatto: in generale accade che, nel primo caso, la resistenza alla penetrazione è all'incirca indipendente dalla profondità, mentre nel secondo essa cresce linearmente con essa.

Passando ad esaminare i fattori, che determinano

il grado di compattezza di un deposito, l'A. pone in evidenza l'influenza della dimensione dei granelli e la velocità, con la quale si è formato il deposito. Il senso, nel quale agiscono questi fattori, non è sempre chiaramente riconoscibile, come si rileva dai numerosi casi, che l'A. illustra traendoli dalla sua personale esperienza e dalla letteratura.

Il « till » e i depositi di origine glaciale

I depositi di origine glaciale, che nella letteratura anglosassone prendono il nome di *till sheets*, sono costituiti da una miscela caotica di argilla, sabbia e ciottoli; essi hanno origine dallo sfregamento prodotto dal movimento dei ghiacciai e sono comuni in molte regioni del Nordamerica.

In alcuni di questi depositi è possibile distinguere uno strato profondo di grande compattezza, sormontato da uno strato superficiale meno compatto. La compattezza dello strato profondo è dovuta all'elevata pressione a suo tempo esercitata dal ghiacciaio.

L'esperienza ha dimostrato che i depositi di *till* formati nella stessa epoca geologica presentano caratteristiche granulometriche assai simili entro vaste regioni; le caratteristiche del *till* variano però da una regione all'altra e questa variabilità si riflette su problemi tecnici sia per quanto riguarda l'impiego di questo materiale nella costruzione di dighe di terra, sia nella costruzione di gallerie e fondazioni di strutture in genere.

Altro caratteristico deposito, da noi poco frequente, è quello delle argille *a varve*, costituite da sottili intercalazioni molto regolari di *silt* ($0,002 < d < 0,06$ mm) più o meno argilloso e di colore corrispondente più o meno scuro. Queste argille si formano per sedimentazione dei materiali solidi trasportati in estate dalle acque provenienti dallo scioglimento dei ghiacciai. Lo spessore di ogni coppia di straterelli varia dall'ordine di alcuni millimetri fino a quello di parecchi decimetri.

L'A. ricorda che le proprietà più importanti di questi depositi, dal punto di vista tecnico, sono una elevata sensibilità ed una notevole prevalenza della permeabilità in direzione orizzontale rispetto a quella nella direzione verticale e riporta alcuni dati in proposito.

Depositi di origine eolica

Passando a trattare dei depositi di origine eolica l'A. fa distinzione fra depositi dunali e loess.

I depositi dunali sono costituiti dalle frazioni più grossolane dei prodotti di alterazione da agenti atmosferici nei climi aridi, oppure da quei granelli di rocce sciolte che vengono trasportati dal vento senza sollevarsi ad altezze dal piano di campagna superiori ad alcuni decimetri.

Il loess invece è costituito dalle frazioni più sottili che vengono trascinate dal vento fino a distanze anche grandi dal luogo di origine, andando a formare depositi che possono raggiungere lo spessore di alcune centinaia di metri.

I depositi di loess ricoprono ampie regioni in tutti i continenti e pertanto lo studio delle proprietà fisiche di questi materiali ha una grande importanza.

Il loess si presenta in sito più o meno cementato; sulla natura di questo cemento e del legame che si esplica in conseguenza fra i granelli l'A. riporta alcuni dati.

Caratteristica molto importante del loess ai fini tecnici è il cospicuo cedimento che consegue alla saturazione; questo processo provoca infatti il discioglimento del cemento e quindi il riassetto dei granelli in una posizione di equilibrio più stabile. L'A. cita esempi di cedimenti di strutture fondate sul loess e ricorda infine un procedimento tecnico, recentemente adottato per migliorare le caratteristiche meccaniche di questo materiale, basato su iniezioni di *silt* (5).

Altra caratteristica notevole del loess è l'elevata permeabilità del materiale in direzione verticale rispetto a quella in direzione orizzontale; ciò dipende dalla presenza di un gran numero di minutissimi canalicoli, dovuti a radici che attraversano la massa in direzione verticale.

Depositi originati da frane

L'A. descrive le caratteristiche dei depositi originati da movimenti franosi sia in terreni sciolti che in rocce lapidee alterate; questi depositi possono talvolta assumere estensione e potenza tali da acquistare grande importanza dal punto di vista tecnico.

c) Cambiamenti che intervengono dopo il deposito.

In quest'ultimo capitolo l'A. illustra quei fenomeni che si verificano dopo il deposito dei materiali e che determinano variazioni nelle loro proprietà originarie. Fra di essi l'A. distingue i seguenti: cambiamenti chimici, fessurazione, precompressione, essiccamento, variazioni di temperatura e contenuto di acqua.

Cambiamenti chimici

Se la superficie esterna di un deposito di rocce sciolte resta soggetta per un certo tempo all'azione degli atmosferici, si verifica un'alterazione chimica dello strato più superficiale, consistente di regola in un aumento del contenuto di minerali argillosi; questo processo, che viene comunemente indicato con il termine *argillificazione*, può modificare profondamente le caratteristiche geotecniche del deposito, provocando un aumento di plasticità ed una diminuzione del coefficiente di permeabilità.

L'A. illustra le conseguenze tecniche di questo fenomeno. Nel settore delle dighe di terra non mancano esempi di nuclei costruiti con materiali naturali argillosi prodotti da alterazione di depositi costituiti originalmente da materiali incoerenti. Nel campo delle fondazioni l'alterazione dello strato più superficiale di una formazione di rocce sciolte può creare problemi singolari di progettazione e di co-

struzione. L'A. cita a questo proposito i casi delle città di San Paulo, in Brasile e del Cairo, in Egitto.

Infine un caso particolare di alterazione chimica, che determina gravi conseguenze tecniche, è quello che si verifica talvolta nelle argille marine, dopo che queste siano emerse al di sopra del livello del mare. In speciali circostanze queste argille, inizialmente normali, possono trasformarsi con il tempo in argille molto sensitive; secondo gli studiosi norvegesi, che hanno indagato a fondo su questo fenomeno, ciò accade in conseguenza di un lento processo di lisciviazione che sostituisce gli ioni sodio con quelli potassio, riducendo il limite di fluidità e l'indice di attività e provocando un aumento della sensitività.

Fenomeni di fessurazione

Alcune argille normalmente consolidate, molte argille preconsolidate e praticamente tutte le argille di origine alluvionale si presentano in sito più o meno intensamente spaccate o fessurate. Le spaccature costituiscono nel loro complesso una rete che interseca la formazione in tutte le direzioni; la distanza fra le singole spaccature può variare da alcuni millimetri fino a parecchi decimetri. Anche l'aspetto delle pareti delle spaccature è diverso a seconda dei casi; queste possono essere opache o lucide, piatte o molto irregolari.

Circa le cause che hanno originato le spaccature l'A. osserva che per le argille normalmente consolidate non esiste ancora una spiegazione soddisfacente del fenomeno. Nelle argille preconsolidate le spaccature si sono formate probabilmente in seguito a differenze di deformazioni causate dall'applicazione e dalla rimozione dei carichi, mentre in quelle di origine alluvionale le cause sono da ricercarsi nelle variazioni stagionali di contenuto d'acqua che provocano periodiche contrazioni ed espansioni del materiale.

Passando ad esaminare le conseguenze tecniche della fessurazione delle argille, l'A. si sofferma sulle frane e sui problemi delle gallerie, citando alcuni esempi. Da questi si deduce che nel caso delle argille fessurate le frane si verificano perché la resistenza al taglio va gradualmente diminuendo nel tempo con un andamento che in qualche caso è stato anche possibile determinare.

Precompressione

L'A. illustra in questo paragrafo le particolari proprietà delle argille che sono state per il passato sottoposte a carichi di intensità più elevata dell'attuale (argille precomprese).

Queste proprietà hanno alcune importanti conseguenze tecniche. Nei materiali coerenti la riduzione dell'indice di porosità dovuta alla precompressione provoca un aumento permanente della coesione; pertanto la resistenza al taglio di un'argilla precompressa è sempre maggiore di quella che la stessa argilla, normalmente consolidata, avrebbe posseduto sotto lo stesso carico.

La compressibilità di un materiale precompressa, per valori del carico minori del carico di precom-

(5) v. anche: G. E. JOHNSON - *Stabilization of soil by silt injection method* - Proc. A.S.C.E. vol. 79, n. 323 (E. E. 8, 1954, recensione a cura di R. Jappelli).

pressione, è inferiore a quella che si avrebbe sotto lo stesso carico se il materiale fosse normalmente consolidato.

Questi due fatti hanno una grande importanza sia nei problemi di stabilità dei pendii, sia nello studio delle opere di fondazione in genere.

Il rigonfiamento del fondo di scavi in argille fortemente precomprese può essere molto importante e creare seri problemi tecnici, poiché l'aumento di volume determinato dalla rimozione del terreno cresce con il crescere del carico di precompressione.

Nelle argille precomprese accade infine in qualche caso che, quando il carico verticale agente su di una formazione viene ridotto, gli sforzi orizzontali non diminuiscono nello stesso rapporto degli sforzi verticali; in conseguenza di ciò può accadere, ad esempio, che le sollecitazioni orizzontali agenti sulle armature nelle gallerie siano maggiori di quelle verticali.

Essiccamento

Quando la superficie di un deposito di rocce sciolte si trova a contatto dell'atmosfera ha inizio nello strato più superficiale un processo di evaporazione.

In conseguenza di ciò si destano le forze di capillarità e l'acqua risale dagli strati più profondi verso la superficie. L'azione della capillarità determina le stesse conseguenze meccaniche di un pesante sovraccarico applicato in superficie e provoca pertanto una diminuzione della porosità ed un incremento della resistenza al taglio dello strato superficiale.

Questo fenomeno, che determina un miglioramento delle proprietà meccaniche della crosta superficiale, può avere in alcune zone un'importante influenza sui criteri di progettazione delle opere di fondazione. L'A. fa osservare però che lo spessore dello strato superficiale più compatto è generalmente molto variabile da punto a punto, e pertanto, per poter fare assegnamento con sicurezza su di esso come terreno di fondazione, occorre rilevarne lo spessore con una serie di sondaggi molto ravvicinati su tutta l'area occupata dalla struttura.

Non sempre però l'esistenza dello strato superficiale di materiale più compatto rappresenta un fattore favorevole dal punto di vista tecnico; occorre tener presente infatti che a contatto dell'acqua le forze di capillarità si annullano e che di conseguenza il materiale rigonfia.

L'A. ricorda a questo proposito alcune recenti indagini compiute negli Stati Uniti; da esse risulta che in questi casi l'entità del rigonfiamento è tanto maggiore quanto più elevato è l'indice di plasticità.

Variazioni di contenuto d'acqua e di temperatura

In questo paragrafo l'A. illustra le conseguenze tecniche delle variazioni di contenuto d'acqua che si verificano nella parte superficiale dei depositi di rocce sciolte in relazione all'alternarsi delle stagioni.

In questa categoria di fenomeni rientrano l'alternarsi dell'imbibizione e dell'essiccamento dei terreni nelle regioni con clima arido ed i fenomeni di gelo e disgelo, che hanno luogo nelle regioni con clima da moderato a freddo.

Questi fenomeni determinano periodici spostamenti (cedimenti o innalzamenti) dei punti della superficie del terreno, provocando seri danni alle opere; essi hanno luogo solo nei terreni a grana fina.

L'A. accenna infine ai problemi geotecnici che si presentano nelle regioni del permafrost, dove i fenomeni descritti si verificano in scala molto più vasta e presentano aspetti singolari.

Variazioni della posizione della falda

Come si è già detto in precedenza la resistenza al taglio delle rocce sciolte dipende dalla pressione neutra; essa è tanto minore quanto maggiore è il valore di questa pressione.

Lo studio dei problemi di stabilità di una formazione di rocce sciolte è perciò legato alla conoscenza del valore della pressione neutra, che dipende a sua volta dalle oscillazioni che subisce il pelo libero della falda.

L'A. descrive alcuni casi tipici di instabilità di pendii dovuta all'innalzamento del pelo libero della falda; tra questi sono interessanti quelli che si riferiscono agli edifici di due centrali idroelettriche nella Columbia Britannica.

In questo stesso paragrafo l'A. accenna ai problemi di sifonamento e ne illustra le conseguenze con alcuni esempi.

d) Conclusioni

Dopo aver così dettagliatamente illustrato l'influenza dei vari gruppi di fattori di carattere geologico sul comportamento delle rocce sciolte, l'A. ne trae come conseguenza che il comportamento delle rocce sciolte medesime dal punto di vista tecnico può essere previsto con soddisfacente precisione solo se di esse sono note le principali proprietà fisiche.

L'esperienza ha dimostrato che la semplice classificazione sulla base dell'esame visivo o di sole indagini petrografiche non solo non è sufficiente ma anzi può indurre spesso in errore. Solo con prove di laboratorio su campioni intatti o con prove in sito è possibile determinare con sufficiente attendibilità le proprietà delle rocce sciolte più significative ai fini tecnici. Compiute queste indagini occorre fare il passo più difficile; questo consiste nel collegare fra di loro i dati necessariamente frammentari raccolti nelle indagini stesse e nell'interpretarli opportunamente per formare gli schemi in base ai quali passare alla progettazione delle opere.

La parte fondamentale del lavoro di interpretazione dei dati consiste nello stabilire il profilo del terreno avvalendosi dei dati raccolti lungo una serie di verticali opportunamente distanziate fra di loro. Il profilo del terreno è determinato dalle vicende geologiche della formazione, che a loro volta esercitano la loro influenza sulle proprietà fisiche delle rocce sciolte, come è dimostrato nell'articolo qui recensito.

Ne deriva che la conoscenza delle relazioni che intercorrono tra le vicende geologiche di una formazione e le proprietà fisiche delle rocce che la compongono ha un'importanza veramente fondamentale.

R. Jappelli