

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

Rassegna delle relazioni e delle discussioni tenute al III Congresso Internazionale di Geotecnica

RICERCHE E PROVE SUL TERRENO IN POSTO

DINO TONINI (*)

I rapporti sull'argomento presentati alla Terza Conferenza internazionale della meccanica del suolo e della tecnica delle fondazioni, ammontano a diciannove ma, come da opportune norme di carattere generale, il relatore W. P. TURNBULL, del Corpo degli Ingegneri U.S.A., ha esteso il suo esame anche alle note pubblicate a partire dalla precedente Conferenza del 1948, in modo da presentare un quadro, il più possibile completo, dell'attuale situazione nel campo delle misure e dei controlli del terreno in posto. Questo esame verte soprattutto sulla letteratura tecnica degli Stati Uniti o di lingua inglese: infatti nella bibliografia relativa vengono citate circa 90 note delle quali una ventina europee e nessuna italiana.

Le note che seguono costituiscono essenzialmente un riassunto della esauriente relazione di W. J. TURNBULL tenuto conto del particolare interesse, per alcuni argomenti, dei tecnici italiani.

1) *Indagini geologiche e topografiche.*

Nelle ricerche di campagna vi è la tendenza ad un maggior impiego della geologia, della fotografia aerea ed anche della pedologia per l'esame delle condizioni del sottosuolo, per l'ubicazione di massima delle strutture e per la formulazione di un adatto ed economico programma per ulteriori ricerche con i metodi geofisici, acustici e sondaggi.

L'importanza della prospezione geologica per le strutture in roccia è ormai riconosciuta da molto tempo: infatti essa consente un'attendibile conoscenza delle condizioni del sottosuolo ed anche delle proprietà fisiche e meccaniche dei diversi tipi di roccia.

Più recente invece è l'applicazione della prospezione geologica ai terreni incoerenti.

L'assistenza del geologo è comunque di notevole importanza non soltanto nelle indagini preliminari, ma anche nella interpretazione finale dei risultati ottenuti con i diversi metodi ad evitare erronee interpolazioni od estrapolazioni per variazioni nelle condizioni di continuità.

Le fotografie aeree permettono rapidi ed economici rilievi delle caratteristiche geologiche e morfologiche di larghe estensioni di terreno mettendone spesso in evidenza variazioni difficilmente determinabili con rilievi in posto. Si può dire che le fotografie aeree stanno diventando indispensabili nella preparazione dei progetti relativi alla regolazione di corsi d'acqua, tracciamenti di strade e di ferrovie, aeroporti, dighe, canali e fondazioni di grandi strutture. La base per la interpretazione delle fotografie aeree è una completa conoscenza della geomorfologia e della dinamica dei terreni per l'azione del vento, dell'acqua, dei ghiacciai, del gelo, delle valanghe e delle frane.

Interessanti informazioni sul suolo sono contenute nelle carte e nelle relazioni agrarie, ma queste carte sono spesso di scarsa utilità per gli ingegneri non pratici con la terminologia, i simboli pedologici ed il grande impiego di nomi locali. Tuttavia l'utilità delle carte agrarie deve essere riconosciuta soprattutto per il tracciamento preliminare di strade, di aeroporti, ecc.

2) *Metodi geofisici.*

I principali metodi geofisici usati per l'esplorazione del terreno per scopi tecnici sono basati sulla variazione di resistenza elettrica e sulla rifrazione di onde sismiche, quantunque anche il metodo sulla variazione del magnetismo terrestre, più rapido e più

(*) Prof. Ing. Dino TONINI, Direttore Ufficio Studi Società Adriatica di Elettricità - Venezia.

economico, possa essere vantaggiosamente impiegato per l'ubicazione di intrusioni o lo studio dell'andamento delle irregolarità del fondo roccioso. Continui sono i progressi nella semplificazione e nella riduzione di peso della apparecchiatura di campagna; gli attuali misuratori di resistenza non sono che una frazione in volume e peso di quelli in uso qualche anno fa; le operazioni di rettifica sono state inoltre notevolmente semplificate e il rilevamento procede molto più velocemente. Gli oscillografi per le esplorazioni sismiche sono ora provvisti di un maggior numero di componenti e nello stesso tempo ridotti in volume e in peso, e talvolta sono anche connessi ad analizzatori per lo sviluppo degli oscillogrammi in campagna.

SÜSTRUNK (18 ⁽¹⁾) descrive le applicazioni dei metodi sismici in Svizzera. L'A. presenta una tabella della velocità delle onde longitudinali in tipici depositi sedimentari e rocce locali e discute in dettaglio la determinazione del modulo di YOUNG attraverso la misura della velocità delle onde. L'A. ritiene che i moduli dinamici così determinati siano molto più significativi dei moduli statici ottenuti da provini in laboratorio, inquantochè la presenza di piccole fessure nella roccia influenza la velocità delle onde in modo meno sensibile che non le prove statiche, tenuto poi conto della circostanza che le fessure della roccia sono spesso eliminate (almeno in parte) dalle iniezioni.

I metodi di indagine sismica del terreno sono applicati, da vari anni, in Italia (CALOI, SOLAINI, MORELLI, ecc.), che nella apparecchiatura e nella elaborazione dei risultati hanno introdotto vari e continui miglioramenti. Questi metodi sono correntemente usati (CALOI) per la determinazione del modulo elastico di una roccia (specie per mettere in evidenza le eventuali differenze tra sponda e sponda e tra sponda e fondazioni) del complesso di una diga, nonché delle variazioni del modulo elastico di una roccia o di una struttura con l'andar del tempo. E' augurabile che lo sviluppo delle misure, oltre a meglio precisare le correlazioni tra i moduli statici e dinamici, porti alla costituzione di una specie di scala dei *valori assoluti* dei moduli dinamici delle rocce, in base alla quale sia possibile una loro preliminare classificazione agli effetti delle caratteristiche costruttive.

Varie ricerche sono state effettuate da diversi enti per utilizzare gli ordinari metodi di sondaggio sonico per la determinazione dello spessore dei depositi di materiali sciolti ed incoerenti sul fondo degli alvei, laghi o baie, ma finora senza grandi successi. Risulta tuttavia che con le nuove e più perfezionate attrezzature approntate dalla *Edo Corporation* si sarebbe determinato l'andamento di uno strato roccioso sottostante a depositi incoerenti di fanghi, sabbia e ghiaia, fino ad una profondità di circa 40 m, con risultati in eccellente accordo con quelli ottenuti attraverso i sondaggi.

3) Sondaggi a penetrazione.

E' indubbio che i sondaggi a penetrazione costituiscono un mezzo rapido, economico e pratico per la prospezione del sottosuolo. I metodi statici (pressa

idraulica) sono in genere preferibili a quelli dinamici a percussione, ma questi ultimi sono più economici e possono essere vantaggiosamente impiegati in terreni duri o ghiaiosi o quando la ricerca si limiti a determinare la profondità del fondo roccioso. I sondaggi a penetrazione consentono di ricavare profili continui e molto dettagliati dei vari tipi di terreno e spesso mettono in evidenza stratificazioni ed irregolarità che sarebbe difficile determinare con altri metodi. Consentono inoltre, attraverso prove di carico su palificate e correlazioni statistiche, di ottenere dati attendibili per la determinazione della lunghezza e della capacità di carico dei pali.

I sondaggi forniscono dati qualitativi sulla resistenza, compressibilità e densità dei terreni, ma una notevole incertezza esiste ancora sull'attendibilità dei metodi normalmente impiegati per dedurre dalla resistenza all'avanzamento valori quantitativi delle suddette proprietà che dipendono da molti altri fattori (coesione, attrito interno, ecc.), dalla forma degli apparecchi e dal loro modo di impiego. Esperienze di laboratorio e prove in posto hanno indicato che in un terreno incoerente ed uniforme, la resistenza all'avanzamento aumenta dapprima linearmente con la profondità fino ad un certo punto che dipende dalla densità del mezzo, oltre il quale non si hanno altri incrementi pur con l'aumentare della profondità, mentre in terreni stratificati e non uniformi la resistenza all'avanzamento è influenzata, anche notevolmente, dalle proprietà del terreno sottostante e sovrastante l'estremità della sonda. Comunque è sempre richiesto un certo spessore di terreno uniforme per ottenere una resistenza all'avanzamento che sia veramente rappresentativa delle caratteristiche di quel particolare strato.

L'attrito laterale che si manifesta lungo un'asta di sondaggio è di solito determinato dalla resistenza alla rotazione, resistenza che con opportuni accorgimenti si può differenziare da quella all'avanzamento. Vari autori, tra i quali HUISINGA, hanno messo in evidenza che i valori che si ottengono normalmente sull'attrito laterale sono troppo bassi, dato che l'attrito stesso diminuisce per il continuo scorrere dell'asta nel terreno. Per questo BEGEMANN (1) propone di modificare la testata delle sonde aggiungendo dopo la punta un piccolo cilindro che consente di determinare l'attrito laterale locale della zona attraversata, prima che abbia a modificarsi per il funzionamento della sonda stessa. HAEFELI e FEHLMANN (4) danno a loro volta notizie di un'attrezzatura che può essere usata indifferentemente per sondaggi statici o dinamici comprendente un piccolo cilindro separato per la determinazione dell'attrito laterale locale, che secondo questi Autori aumenta anche di parecchie volte con il tempo.

L'attrito laterale incrementa notevolmente le difficoltà che si incontrano con gli ordinari mezzi quando si praticano sondaggi a notevole profondità; difficoltà alla quale si cerca di ovviare con speciali attrezzature introducendo l'asta dell'apparecchio di sondaggio a penetrazione in un tubo esterno rotante. Una di queste attrezzature è quella descritta da HVORSLEV (5) con la quale si possono effettuare sondaggi, in terreni compatti ed incoerenti, fino a 45 + 60 m di profondità, mentre nelle normali condizioni non si va oltre i

(1) Il numero tra parentesi è quello del rapporto citato.

20 ÷ 30 m. La varietà di attrezzatura è inoltre completata dai dispositivi per il prelievo dei campioni perché va da sé che i vari strati del sottosuolo non possono essere identificati in base alla sola resistenza alla penetrazione, senza che siano a disposizione i risultati di sondaggi con prelevamenti di campioni allo stato naturale eseguiti in prossimità.

In conclusione si può dire che i sondaggi a penetrazione presentano notevoli vantaggi e possibilità di applicazioni, ma molte ricerche basilari sono ancora da completare prima di poterli utilizzare al massimo.

4) Prove con le trivelle a palette.

L'uso di speciali « trivelle a palette » (vane test, moulinets) per determinare sul posto la resistenza al taglio di terreni coerenti non compatti va sempre più diffondendosi: notizie sui risultati ottenuti in varie esperienze e sulle correlazioni tra i risultati stessi sono contenuti nel rapporto di KANTEY (6).

L'esplorazione con le trivelle è più lenta di quella con i sondaggi e non dà luogo ad un profilo continuo, tuttavia si possono ottenere valori abbastanza attendibili sulla resistenza al taglio del terreno in posto. Questi valori sono in buon accordo con la resistenza alla compressione, senza contrazione laterale, di campioni non alterati provenienti da scavi poco profondi, ma in contrasto con le prove di compressione, indicano un aumento della resistenza al taglio con la profondità, il che si è potuto osservare su frane in terreni sciolti e coerenti.

SKEMPTON e HENKEL in un loro rapporto (17) dimostrano che le resistenze al taglio di alcune argille in condizioni normali di consolidamento ottenute con le prove con le trivelle sono in buon accordo con quelle che si hanno con prove triassali su campioni non alterati a tenore costante di acqua senza consolidamento, ottenute a qualsiasi profondità. Le resistenze al taglio per strati profondi risultano più basse se determinate con prove di compressione senza contrazione laterale, e troppo alte se ottenute con prove triassali a tenore costante d'acqua dopo il consolidamento. Questi Autori mettono in evidenza come l'entusiasmo per le prove con trivelle abbia portato in alcuni casi ad un uso non sempre del tutto appropriato e ad un'ingiustificata sfiducia sulla attendibilità delle prove normali. Le prove con trivelle rappresentano certamente un metodo di grande valore per la determinazione della resistenza al taglio del terreno in posto, ma è opportuno che siano ben definiti i limiti e le condizioni con le quali il metodo stesso può essere efficacemente impiegato.

5) Prove di carico in posto.

Uno dei primi metodi impiegati per la determinazione diretta della capacità di carico o portanza dei terreni è quello della piastra caricata con il quale metodo però si ottengono valori soltanto per profondità dell'ordine di alcune volte il diametro della piastra stessa. In alcuni casi è ancora necessario fare delle prove con piastre di vario diametro per eliminare gli

effetti dimensionali. Queste limitazioni sono attualmente conosciute e tenute nel debito conto per una migliore interpretazione dei risultati.

Notevoli miglioramenti sono stati introdotti nell'apparecchiatura mobile di prova, ma anche con questi miglioramenti, le prove con le piastre richiedono molto più tempo che non attraverso i sondaggi e le normali prove di penetrazione.

Al fine di rendere possibile l'applicazione del più recente tipo di prove con la piastra portante, una estesa serie di soddisfacenti correlazioni sperimentali è riportata nel rapporto di KHANNA, VARGHESE, HOON (7) dove figurano pure interessanti confronti tra i diagrammi carichi-assestamenti e i diagrammi deformazioni-tensioni ottenuti attraverso prove di compressione triassiale.

6) Prelevamento di campioni e prove di penetrazione.

Quantunque nessun rapporto tratti in modo specifico questo argomento il Relatore ricorda come negli U.S.A. siano molto sviluppati i sondaggi per rotazione e la stabilizzazione del foro con l'acqua di perforazione, in luogo di praticare il tubaggio. I sondaggi a lavaggio sono pure usati, soprattutto per modeste ricerche, mentre i sondaggi a pistone hanno la preferenza in alcune regioni. Quando si praticano i sondaggi per lavaggio o quelli rotativi, si ottengono di solito campioni significativi con l'ausilio di apparecchi preleva-campioni di caratteristiche standardizzate. La resistenza alla penetrazione dell'apparecchio preleva-campioni dà inoltre un'indicazione più o meno attendibile della consistenza e della densità dei terreni attraversati. Sulla resistenza all'avanzamento intervengono però molteplici fattori che si cerca attraverso prove sistematiche, tuttora in corso, di meglio definire.

Di grande importanza è il poter ottenere campioni *non alterati*, per il che sono state ideate diverse attrezzature, che consentono fra altro di avere campioni al naturale di terreni incoerenti anche al di sotto del livello della falda freatica.

Molto difficile, se non impossibile, l'ottenere campioni di rocce difettose, fessurate e cavernose senza una chiusura parziale o completa delle fessure e spesso senza una parziale perdita del campione. La struttura del terreno e della roccia può essere però fotografata in sito con speciali macchine da presa che si introducono nel foro del sondaggio. Vi sono tipi di macchine che possono essere usate in fori asciutti o bagnati con un diametro di soli tre pollici; uno specchio conico permette di riprodurre un settore di 360°, sia pure attraverso immagini distorte che vengono successivamente rettificate, proiettandole su uno schermo cilindrico.

7) Livelli e pressioni delle acque sotterranee.

La determinazione del livello delle acque freatiche e della piezometrica di quelle artesiane ha una notevole importanza in molte indagini del sottosuolo. Per questo sono impiegati normalmente i tubi piezometrici. L'attendibilità delle osservazioni è però spesso inficiata dal

fatto che l'influenza del tempo di corrivazione, le perdite per infiltrazione, i depositi e i gas nei terreni circostanti o nell'apparecchiatura non sono conosciuti e tenuti nel dovuto conto. Intumescenze relativamente grandi, ma temporanee, nei livelli delle acque sotterranee si notano spesso dopo piogge che hanno saturato gli strati superficiali del terreno. Secondo il rapporto di DERVIEUX, DROUHIN, GAUTIER (3) queste intumescenze sarebbero dovute più a variazioni di pressione dell'aria, rimasta imprigionata negli alveoli del terreno, piuttosto che ad un vero cambiamento del livello della falda freatica.

Numerosi sono i tipi di cellule piezometriche già entrate nell'uso corrente; di un nuovo elettro-piezometro a variazione di resistenza sono dati in un rapporto di *Plantema* (13) i dettagli costruttivi e di funzionamento. La sensibilità di questo strumento è 2300 micro-pollici per pollice, così che gli errori di osservazione vengono ridotti a meno dell'1%. L'elettro-piezometro viene sistemato in un involucro separato nell'interno dell'asta di sondaggio, in modo che le deformazioni dell'asta stessa non siano trasmesse al diaframma sensibile sì da influenzarne le indicazioni.

Le osservazioni sulle variazioni delle pressioni interstiziali durante la preparazione di una grande fondazione e di strutture in terra, forniscono indicazioni molto interessanti sulle condizioni delle tensioni e lo stato di consolidamento del terreno; dalle stesse osservazioni si hanno dati per valutare i coefficienti di sicurezza della costruzione o gli incrementi di carico sul suolo della fondazione. Esempi di queste misure e dei corrispondenti controlli sono descritti nel rapporto di SILVA (16).

8) Prove di permeabilità in campagna.

Le prove con pompe, ivi compresa la determinazione della curva di rigurgito con piezometri ausiliari, costituiscono il più vecchio e forse il più attendibile metodo usato per la determinazione della permeabilità di un terreno in sito. Si tratta però di prove costose che forniscono soltanto un valore globale del coefficiente di permeabilità.

In questi ultimi anni numerose sono state le ricerche per prove di campagna più semplici e di più limitata durata, nonché di metodi per la determinazione dei coefficienti di permeabilità nelle due direzioni orizzontale e verticale.

MATSUO, HONMACHI e AKAI in un loro rapporto (11) propongono di determinare la permeabilità dei terreni superficiali attraverso la differenza della velocità di filtrazione dell'acqua raccolta in due cunette artificiali di ugual sezione, ma di diversa lunghezza, a forma trapezoidale scavate nel terreno in esame. Resta così eliminata l'influenza della filtrazione attraverso le sezioni terminali delle cunette. Il coefficiente di permeabilità può allora venir calcolato attraverso le formule sviluppate per il caso più semplice del problema bidimensionale della filtrazione di un lungo canale.

I coefficienti di permeabilità possono, in teoria, essere determinati utilizzando pozzi trivellati e piezometri come permeatometri a carico crescente o decre-

scente, con risultati attendibili quando abbiano a verificarsi un complesso di circostanze favorevoli. Tuttavia le osservazioni sono spesso soggette ad errori a causa della influenza delle perdite per infiltrazione, sedimentazione, variazione di volume dei gas contenuti nel terreno o nel piezometro, e soprattutto perchè sovente il terreno nelle immediate vicinanze del pozzo sperimentale è stato disturbato e la sua permeabilità modificata durante la perforazione e l'installazione del piezometro.

9) Erosione e scioglimento del terreno da parte delle acque sotterranee.

Il movimento dell'acqua o dell'aria attraverso il terreno può portare a delle modifiche della sua macrostruttura. DERVIEUX, DROUHIN, GAUTIER (3) descrivono i grandi depositi di argilla dell'Africa del Nord i quali contengono numerosi canaletti o tubicini verticali. Canaletti simili sono stati riprodotti in laboratorio con campioni di un terreno argilloso, completamente rimaneggiato, sottoponendolo, dopo saturazione, a numerosi cicli successivi di evaporazione e di pioggia artificiale.

E' noto che il passaggio di una corrente di acqua in un terreno può provocare, quando il gradiente di pressione supera un certo valore critico, una erosione interna e la formazione, in terreni incoerenti, di piccoli o grandi meati. Similmente il passaggio di una corrente di acqua attraverso un terreno permeabile, o rocce fessurate, contenenti minerali solubili, può provocare la formazione di grandi meati o cavità. E' forse meno noto che meati o cavità di questo tipo tali da dar luogo a strutture cellulari, possono formarsi anche in terreni non permeabili come è stato riscontrato ad esempio, in larga scala, in alcune recenti ricerche effettuate dal Corpo degli Ingegneri americani.

E' ovviamente di notevole importanza poter determinare la presenza e le cause di canaletti, di cavità o di strutture cellulari in un terreno in modo da approntare, se richiesti, i rimedi più adatti. Queste irregolarità sono di solito denunciate dalla perdita delle acque di lavaggio o di trivellazione, dall'improvviso aumento delle velocità di perforazione o dalla diminuzione della resistenza alla penetrazione dell'asta di sondaggio. Comunque è estremamente difficile, se non impossibile, ottenere dei campioni che mettano in evidenza la reale struttura, non alterata, della formazione fessurata o cellulare, a meno che le cavità non siano state iniettate prima del prelevamento.

10) Variazioni nel contenuto in acqua del terreno in posto.

Le variazioni del contenuto in acqua negli strati superiori del sottosuolo provocate dalle precipitazioni, evaporazione, traspirazione e dalle interferenze con i processi ed i regimi naturali non hanno dato luogo a rapporti particolari. Tuttavia il Relatore, come per altri argomenti, ricorda come il sorgere di una costruzione o la copertura del terreno con uno strato più o meno impermeabile (pavimentazione di una strada o di un aeroporto ad esempio) possa interferire

con l'evaporazione e modificare i gradienti termici in modo da provocare spesso un incremento permanente nel contenuto di acqua nel suolo al di sotto della struttura o della pavimentazione. Il conseguente rigonfiamento del suolo e i non uniformi spostamenti delle fondazioni sovrastanti danno luogo a gravi problemi tecnici e costruttivi sui quali sono in corso numerose ricerche.

In contrasto con questo rigonfiamento del terreno, una diminuzione del contenuto in acqua con conseguenti assestamenti, può essere provocata dalla traspirazione di alberi a rapida crescita e da arbusti che si trovino nelle vicinanze della struttura o da un drenaggio dovuto al calore dovuto a bollitori, fornaci o forni, ubicati nella costruzione.

Ricerche sui problemi indicati o simili richiedono periodiche determinazioni dei contenuti in acqua o dei gradienti di umidità del terreno. Questi dati si possono ottenere con sondaggi, ma il procedimento è molto costoso e lento presentando inoltre l'inconveniente che ciascun campione è ottenuto da una posizione leggermente diversa, il che introduce un ulteriore fattore di disturbo nell'analisi dei risultati ottenuti. Numerosi metodi rapidi seppure indiretti, per la determinazione continua delle variazioni del contenuto in acqua del suolo in sito, si sono sviluppati negli ultimi anni; si ricordano in proposito i misuratori elettrici basati sulla variazione di resistività di blocchi di particolari sostanze (gesso, nylon, ecc.) interrate nel suolo; resistività che dipende dalla tensione dell'acqua funzione a sua volta dell'umidità del suolo, e i recentissimi misuratori a « neutroni » che consentono unitamente alla determinazione del contenuto in acqua anche quella della densità del suolo. Per le determinazioni del contenuto di umidità, è impiegata una sorgente di neutroni veloci che si trasformano, quando vengono in collisione coi nuclei di idrogeno, in neutroni lenti il cui numero, determinato con uno dei soliti contatori, è in correlazione con il contenuto d'acqua del suolo. Una sorgente emittente raggi gamma è invece usata per la determinazione della densità la quale è tanto maggiore quanto minore è il numero dei raggi misurati a causa della loro riflessione.

11) *Densità e resistenza del terreno in posto.*

I risultati di ricerche in campagna e in laboratorio relative alla densità e alla resistenza dei terreni in posto e alle correlazioni esistenti tra queste proprietà e le varie classificazioni del suolo sono esaminate nel rapporto di KANTY (6) con particolare riguardo ai depositi di argilla, normalmente consolidata, e alla costruzione di un terrapieno sperimentale.

La resistenza al taglio s aumenta linearmente con la profondità e si accorda con la equazione di COULOMB $s = c + n \tan \phi$ dove c è la coesione; n l'effettiva sollecitazione normale e ϕ l'angolo apparente di attrito interno. Un buon accordo è stato trovato tra i valori dell'angolo ϕ ottenuti con gli apparecchi a trivella, prove dirette e l'analisi di stabilità al banco di prova, mentre risultati discordi si sono avuti con le prove triassiali. Risultati diversi tra loro si ebbero pure per valori di c , a seconda del metodo usato per la deter-

minazione. Alcune di queste differenze sono state attribuite ai rimaneggiamenti cui fu sottoposta l'argilla e al suo contenuto di conchiglie.

SKEMPTON e HENKEL (17) forniscono a loro volta gli elementi di dettagliate analisi in campagna e in laboratorio relative alle caratteristiche di resistenza di argille post-glaciali, normalmente consolidate. E' stato così trovato che il rapporto tra la resistenza al taglio e l'effettiva sollecitazione normale è praticamente costante per ogni tipo di strato, e che vi è una relazione lineare tra questo rapporto e l'indice di plasticità. Le ricerche di SKEMPTON e HENKEL indicano che le differenze spesso riportate, tra i risultati ottenuti con le trivelle a palette e le varie prove di laboratorio possono ascrivere a differenze nel tipo e nella tecnica delle prove piuttosto che a rimaneggiamenti del terreno durante le prove. Gli Autori ritengono in conclusione che sia da attendersi un buon accordo tra i risultati ottenuti con le trivelle a palette e le prove triassiali per campioni a tenore di acqua costante e non drenati, se si tratta di argille non fessurate, sovraconsolidate e anche di argille normalmente consolidate, quando l'indice di plasticità sia basso o quando l'indice di attività, definito come il rapporto tra l'indice di plasticità e la percentuale di argilla, sia alto.

12) *Sollecitazione e deformazioni del terreno in posto.*

Misure di sollecitazioni nel terreno, sotto piastre caricate, sono descritte nel rapporto di PLANTEMA (15). Ricerche sull'argomento sono ancora in corso; è dato però di contare su risultati molto più attendibili che per il passato, dati i miglioramenti che si sono conseguiti nel campo delle cellule pressiometriche soprattutto nei riguardi della sensibilità e della attitudine a mantenere la taratura originaria in condizioni sfavorevoli e dopo lunghi periodi. Una di queste cellule viene descritta in altro rapporto del PLANTEMA (14). La cellula comprende una membrana molto sottile ed elastica strettamente connessa ad una piastra di base a coste. Lo spazio tra la membrana e la piastra è riempito con olio (con mercurio in tipi ulteriormente perfezionati) che trasmette la pressione sulla membrana ad un diaframma collegato con la piastra. Le deformazioni del diaframma sono a loro volta misurate attraverso lamine estensimetriche, a variazione di resistenza, che possono arrivare al numero di quattro, due in compressione e due in trazione in modo da formare un ponte completo. La taratura viene effettuata con una apparecchiatura che assomiglia ad una camera triassiale dove la cellula pressiometrica è collocata al centro di una notevole quantità di sabbia. La taratura ha messo in evidenza le eccellenti caratteristiche della cellula sotto carichi uniformemente distribuiti; per carichi non uniformi è stato proposto di aumentare lo spessore della piastra di base.

L'influenza del lento scorrimento viscoso del terreno sotto carico (compreso il peso proprio) è stata riconosciuta da vario tempo e quantunque speciali rapporti non siano stati presentati, il Relatore ricorda le ricerche sull'argomento del Prof. HAEFELI e dei suoi collaboratori. Quali mezzi di indagine vengono indicate le osservazioni delle variazioni di inclinazione a varie profondità di un foro, rivestito da una guaina di

gomma armata o di metallo flessibile. Si devono pure all'HAEFELI ricerche dell'azione del gelo sui terreni di fondazione, sulle strade e sugli aeroporti; ricerche che si avvalgono di molti dei risultati conseguiti nello studio delle nevi. Altre ricerche sull'argomento, che ha una speciale importanza dato lo sviluppo delle costruzioni nelle regioni artiche, sono in corso da parte di vari enti.

13) Costipamento dei terreni in posto.

Ogni qualvolta sia possibile e soprattutto quando si ha a fare con grandi strutture è consigliabile eseguire le prove sul grado di costipamento del terreno in campagna e con vari tipi di apparecchiatura, data la difficoltà di estendere i risultati di laboratorio alla situazione reale in posto. Tuttavia prove di laboratorio condotte con accuratezza possono fornire dati sufficientemente attendibili per la progettazione, ma le possibilità di differenze tra risultati di laboratorio e quelli di campagna dovrebbero essere contemplati nei contratti di appalto. Alcuni contratti prescrivono ad esempio che la densità ottenuta dalle prove di costipamento in posto sia una certa percentuale di quella optimum ottenuta da prove tipiche di laboratorio, ma piccole variazioni nelle caratteristiche del terreno o contrarie condizioni di tempo possono rendere queste condizioni estremamente onerose o di impossibile realizzazione. Inoltre un terreno con costipamento può mancare di altre caratteristiche come resistenza, compressibilità e permeabilità; proprietà che non dipendono soltanto dalla densità ma anche dal contenuto di umidità, dalla intensità di costipamento e dai mezzi seguiti per determinare il costipamento stesso.

LEWIS discute nel suo rapporto (9) la difficoltà in Gran Bretagna di riferirsi a specifici limiti del contenuto di umidità e della corrispondente densità nelle prove di costipamento, soprattutto a causa del clima umido e della prevalenza di terreni coerenti. In queste condizioni è generalmente necessario considerare i terreni con il loro contenuto naturale di acqua. Le caratteristiche dello stato finale di costipamento possono basarsi sul contenuto in aria oppure su una certa percentuale della densità a completa saturazione del terreno. In altre zone a clima umido, dove l'essiccamento presenta delle difficoltà, il terreno viene costipato con l'esistente quantitativo di umidità nel presupposto che sia sufficiente raggiungere la resistenza ridotta che si ha nel terreno semi-costipato con un alto grado di umidità. Risultati sul costipamento di terreni argillosi magri con compressori a zampa di montone e con compressori a pneumatici sono illustrati in un rapporto di TURNBULL e SHOCKLEY (19).

Le caratteristiche dei compressori a zampa di montone dipendono dalla resistenza del terreno. Varie prove sono state effettuate o sono tuttora in corso per determinarle nel modo migliore.

Il citato rapporto di LEWIS (9) contiene interessanti dettagli su un grande numero di prove di costipamento in campagna con diverse attrezzature e per diversi tipi di terreno. In generale si è trovato che i compressori pesanti lisci danno migliori risultati con i terreni e le condizioni climatiche della Gran Bretagna, mentre i compressori a pneumatici sono preferibili con terreni a superficie scabra.

I pesanti compressori a pneumatici hanno un impiego sempre più esteso nel costipamento del terreno con leggera o senza coesione e anche nei terreni coerenti. Di solito sono in grado di provocare il costipamento ad una maggiore profondità che con altri sistemi, consentono inoltre l'uso di strati più spessi nella costruzione dei terrapieni e delle dighe e sono particolarmente convenienti per il costipamento in profondità di strati naturali quando le condizioni di umidità siano favorevoli.

L'influenza delle vibrazioni durante il costipamento dei terreni con leggera o senza coesione ha formato l'oggetto di numerose ricerche: alcuni risultati ottenuti indicano che i vibratorii connessi con i compressori provocano, alle velocità normali, un costipamento suppletivo molto piccolo se non nullo, specialmente quando vengono usati compressori a pneumatici che attenuano le vibrazioni. D'altra parte, pesanti piastre vibranti e compressori ad urto provocano un buon costipamento in profondità quando il contenuto di umidità è favorevole. Il costipamento con le piastre vibranti e i compressori ad urto è di solito meno efficace di quello ottenuto con i compressori rotanti, ma può essere usato con vantaggio per estensioni limitate.

Un adatto controllo in campagna del costipamento del suolo è di grande importanza.

Davis a sua volta (3) richiama l'attenzione sulle interpretazioni errate che si hanno qualora si utilizzi la sola media aritmetica dei risultati, per cui propone metodi statistici di valutazione dello stesso tipo di quelli usati per il controllo di qualità. In particolare viene raccomandato l'uso delle curve di durata per la determinazione dei limiti ammissibili di variazione, mettendo in evidenza come l'impiego dei metodi statistici richieda la normalizzazione delle prove e dei metodi di prelevamento, l'analisi separata dei campioni di ciascuna zona in esame e a diverso grado di costipamento, nonché l'eliminazione dei campioni e delle prove non significative.

14) Stabilizzazione del terreno in posto.

La stabilizzazione del terreno è qui intesa nel senso restrittivo dei procedimenti relativi al mescolamento dei terreni base con altri terreni, sostanze bituminose, cemento, calce, clorati di calcio, silicati e vari altri prodotti chimici, naturali o sintetici. Alcuni dei prodotti chimici recentemente proposti per la stabilizzazione del terreno sono molto costosi, ma in ultima analisi possono risultare economici in quanto la quantità di additivo impiegato è inferiore all'uno per cento del terreno base trattato.

L'agente stabilizzatore può essere aggiunto al terreno base per intasamento o per iniezione, con mescolamento in posto o in impianti centralizzati o portatili. Un completo mescolamento è estremamente importante, ma è spesso difficile ottenerlo: recenti ricerche indicano che in molti casi, soltanto una piccola proporzione dell'agente stabilizzatore è efficace per la sua non uniforme distribuzione nel terreno base. Oggetto delle ricerche in corso è non soltanto quello di nuovi agenti stabilizzatori e di sempre più efficaci e più economici metodi per l'incorporamento, ma anche

quello di ottenere informazioni sulla struttura base, sulle proprietà fisiche e chimiche del suolo e sui fenomeni che accompagnano la stabilizzazione.

Due rapporti relativi alla stabilizzazione del terreno trattano del cemento come additivo. I risultati che si ottengono sono soddisfacenti nei terreni granulari e leggermente coerenti, mentre si incontrano difficoltà nelle argille e nei terreni contenenti materiali organici. MACLEAN e CLARE (10) hanno trovato che argille con tenore di liquidità superiore al 75% possono essere stabilizzate quando una piccola quantità di calce idrata viene aggiunta al cemento. Questi Autori mettono in particolare rilievo come il materiale organico contenuto nel terreno impedisca l'indurimento del cemento combinandosi con gli ioni di calcio del cemento stesso: ad evitare questo si suggerisce di aggiungere una soluzione dal 2 al 3% di un sale di calcio, ad esempio, clorato o idrossido di calcio.

MEHRA (12) presenta i risultati di sistematiche e assai interessanti ricerche sull'impiego del cemento per aumentare la resistenza alle vicende atmosferiche dei terreni impiegati nella costruzione di capanne con pareti in terra battuta. E' stato trovato che una adeguata resistenza si può ottenere con un'opportuna selezione e un appropriato mescolamento dei terreni localmente disponibili e che il disgregamento delle pareti durante la stagione umida dei monsoni può essere evitato con l'aggiunta del 2,5% di cemento.

Lo stesso Autore ha pure trovato che una buona aderenza tra la terra battuta e un intonaco di sabbia e cemento può ottenersi con un lavaggio delle pareti con boiaccia di cemento e che un intonaco normale può trasformarsi in un intonaco impermeabile e resistente alle intemperie con l'aggiunta del 5% di speciali emulsioni bituminose.

MACLEAN e CLARE hanno trattato anche delle principali relazioni che presiedono le variazioni di umidità del terreno e descrivono i risultati della stabilizzazione di terreni coerenti con sostanze protettive o impermeabilizzanti. E' stato trovato che l'idroclorato di furfural-anilina riduce l'assorbimento del terreno, la sua efficacia dipendendo però dal carico sulla superficie e dall'altezza della falda freatica. Una speciale resina sintetica, resorcirol-formaldeide, presenta un notevole effetto impermeabilizzante, conferendo inoltre una resistenza addizionale non soltanto ai terreni umidi, ma anche ai terreni alcalini.

Un grande numero di esperienze sulla stabilizzazione del terreno è in corso negli U.S.A. utilizzando materiali come il silicato di sodio, la lignina, il furfural-anilina, l'acrilato di calcio e varie altre resine. Una eccellente rassegna sull'effetto dei polimeri, sul modo e sul tempo di polimerizzazione, sulle proprietà del terreno, è presentata nel rapporto di LAMBE (8).

15) Osservazioni su strutture complete.

L'importanza della osservazione delle caratteristiche delle strutture e delle loro fondazioni durante e dopo la costruzione non ha bisogno di essere illustrata. Queste osservazioni forniscono dati interessanti per

la verifica e il perfezionamento delle teorie generali e dei criteri di progettazione, e sono spesso richieste per la determinazione delle condizioni di avanzamento e di carico finale della costruzione.

La misura più importante e comune è quella degli spostamenti verticali di una struttura o di punti all'interno di costruzioni in terra e del terreno di fondazione. Le aste con i segnali di riferimento collocate nei punti di osservazione sono generalmente protette da tubi contro gli effetti laterali e l'influenza di movimenti del terreno sovrastante. Nottolini inseriti nelle sezioni del tubo, alle quote desiderate durante la costruzione, consentono l'osservazione degli spostamenti in diversi punti usando speciali sonde a gravità (torpedo).

In molti casi è anche opportuno misurare gli spostamenti orizzontali e gli spostamenti lineari ed angolari nei giunti di espansione e nelle fessure. Strumenti speciali ad alta sensibilità sono stati ideati a questo scopo: essi consentono la misura di movimenti molto piccoli e lenti (estensimetri, dilatometri, ecc.).

I movimenti orizzontali nel terreno di fondazione o nell'interno delle strutture in terra si possono determinare installando un tubo di metallo flessibile o di gomma armato e misurando le variazioni di inclinazione del tubo stesso alle varie quote per mezzo di un inclinometro orientato. Con questi inclinometri si possono anche misurare le inclinazioni e le posizioni della punta di appoggio dei pali in acciaio o in cemento armato.

Il Relatore ricorda che notizie sui metodi e sull'attrezzatura per queste osservazioni sono disperse generalmente in numerosi articoli e costituiscono in molti casi soltanto una modesta parte di rapporti aventi attinenza con altri soggetti. Una trattazione sistematica dell'argomento si trova comunque nella seconda parte del libro sulle fondazioni di SCHULTZE e MUHS e in quello dell'HUGGENBERGER.

16) Proposte per la discussione.

Il Relatore nel concludere il suo rapporto esprime il parere che gli argomenti sui quali è più auspicabile una discussione e un ulteriore sviluppo di studi e di ricerche, siano i seguenti:

1) *Determinazione della densità, della resistenza e di altre proprietà del terreno in posto, come ad esempio prove con apparecchi a penetrazione e prove con trivelle a palette.*

2) *Fattori che debbono essere presi in considerazione per la scelta del tenore in acqua, per la messa in opera e per l'esecuzione del controllo della densità e dell'umidità dei terreni costipati in cantiere.*

3) *Sollevamenti o abbassamenti dannosi di costruzioni leggere, causati da un cambiamento artificiale del regime naturale della umidità del terreno di fondazione.*

Il Relatore ritiene inoltre che il problema del prelevamento, conservazione e preparazione di campioni inalterati per le prove dovrebbe costituire l'oggetto di nuove discussioni e richiamare maggiormente l'attenzione dei progettisti e dei costruttori.