

Miglioramento delle caratteristiche dei terreni; criteri generali di intervento

A. CROCE*

SOMMARIO: La possibilità di effettuare utilmente un intervento sui terreni (sciolti e lapidei) per migliorarne le caratteristiche e la scelta del tipo di intervento vengono ricondotte alla conoscenza dei modi e dei limiti entro i quali i fattori costitutivi dei terreni medesimi ne determinano le proprietà meccaniche.

Si pone poi in evidenza la necessità di avvalersi di queste tecniche entro un quadro progettuale chiaramente individuato.

Uno dei temi trattati nel X Convegno Nazionale di Geotecnica (Bari, ottobre 1970) è stato quello del Miglioramento delle caratteristiche dei terreni.

L'Associazione Geotecnica Italiana, oltre a promuovere la presentazione di comunicazioni, aveva affidato ad un gruppo di cinque relatori il compito di tratteggiare nelle linee essenziali lo stato delle conoscenze acquisite in questo settore fra i più moderni ed interessanti della Geotecnica.

L'ampiezza del tema ha posto i relatori di fronte alla necessità di scegliere fra una trattazione di tutti gli argomenti necessariamente rapida ed una trattazione invece di pochi argomenti in modo da dare, di questi, una visione non troppo scarna e schematica. I relatori hanno ritenuto preferibile la seconda alternativa ed hanno quindi portato l'attenzione sui procedimenti di intervento dinamico (R. Jappelli), statico (G. Calabresi) e per iniezione di altre sostanze (F. Mercogliano) illustrandone le finalità, gli schemi teorici e le tecniche esecutive, le questioni di progetto e di controllo; sono state inoltre lumeggiate alcune questioni di carattere generale derivanti dall'impiego dei vari procedimenti nella realizzazione delle grandi opere di ingegneria (V. Bevilacqua).

L'inquadramento generale del tema è stato oggetto della relazione svolta dall'A. della nota che segue e che riproduce con poche modifiche il testo letto al Convegno.

1. - La Geotecnica è a buon diritto una delle più moderne branche dell'Ingegneria, benché si occupi di problemi che l'uomo ha dovuto da sempre risolvere. Fra questi un posto importante

occupa il miglioramento delle caratteristiche dei terreni.

Si può in proposito ricordare che fin da tempi antichissimi la terra è stata impiegata come materiale da costruzione: l'argilla asciugata al sole o cotta in rudimentali fornaci è stata usata dall'uomo per scopi svariati, per costruire capanne ed edifici, per fabbricare oggetti di uso domestico o tavolette per incidervi iscrizioni; la terra lentamente costipata a sottili strati costituisce il materiale con il quale vennero formati in India già in epoche remote argini e piccole dighe.

Anche i terreni presenti nel sottosuolo hanno attirato l'attenzione degli antichi costruttori, che si sono applicati a migliorarne le caratteristiche grazie alle esperienze che al trascorrere dei secoli andavano accumulandosi.

Il lento evolversi di un tipico metodo di miglioramento dei terreni in sito può essere colto ad esempio attraverso la storia della città di Venezia. In questa illustre e meravigliosa città molte delle costruzioni più antiche sono fondate, limitatamente ai muri delle facciate prospicienti i canali, su pali di legno non più lunghi di un paio di metri con interassi da 30 a 50 cm, diametro di 12÷15 cm: una vera selva di pali molto corti che ottenevano quindi, come risultato, il costipamento di uno strato superficiale, relativamente sottile, di terreno argilloso molto compressibile e poco resistente.

In seguito, e cioè verso il 1600, la città cominciò ad arricchirsi di edifici cospicui oltre che per pregi architettonici anche per mole. Si avvertì allora il bisogno di accrescere la lunghezza dei pali, che però non vennero portati fino ai terreni dotati di buone proprietà meccaniche, presenti intorno ai 15 m di profondità e

* Prof. ing. Arrigo CROCE, ordinario di *Tecnica delle Fondazioni e Costruzioni in Terra (Geotecnica)* nella Facoltà di Ingegneria della Università di Napoli.

capaci quindi di assorbire molto meglio i carichi.

Come a Venezia così altrove, al trascorrere dei secoli l'arte di migliorare le proprietà meccaniche dei terreni è andata affinandosi, ma conservando il carattere di attività eminentemente pratica e concettualmente rudimentale. D'altronde ancora pochi decenni fa il miglioramento dei terreni era ritenuto, ed era effettivamente, un procedimento empirico non suscettibile di analisi teoriche e di verifiche sperimentali; niente di più che un artificio costruttivo affidato all'intuito.

Oggi il problema si pone in modo radicalmente diverso: l'ingegnere non si limita a porsi la domanda del *come* eseguire l'intervento; egli si chiede anche ed innanzi tutto il *perchè* dell'intervento e si applica a *prevederne* i risultati su basi teorico-sperimentali.

Gli esempi di recenti interventi per migliorare le proprietà dei terreni si affollano alla mente. Per la grandiosità e la complessità dell'opera, e non meno per la forza della suggestione che emana da un paese di civiltà millenaria e per il contributo non secondario recato dal nostro Paese, ricorderò la grande diga che sbarrò il corso del Nilo ad Aswan. Per risolvere i difficili problemi posti dalle dimensioni dell'opera, dall'imponenza del corso d'acqua, dalle condizioni geologiche e geotecniche dei luoghi vennero condotti lunghi e complessi studi e svolte esperienze raffinate ed accuratissime, al termine dei quali fu affidato un ruolo, decisivo per la realizzazione dell'opera, alle tecniche di miglioramento: i terreni di fondazione della diga sono stati impermeabilizzati mediante iniezioni, il nucleo della diga è stato formato con argilla compattata ed il salvataggio dei templi di Abu Simbel, all'altra estremità del lago, è stato reso possibile dal preventivo consolidamento della roccia arenaria nella quale trentatré secoli fa erano state scolpite le immagini di Ramsete II e della regina Nefertari.

Il campo di impiego delle tecniche per il miglioramento dei terreni, come or ora si è accennato, è molto vasto e può dirsi che di anno in anno le occasioni e le possibilità si moltiplicano.

Il settore dell'ingegneria che tradizionalmente trae profitto da questi procedimenti è quello delle grandi dighe di sbarramento, in cui si rende sempre necessario intervenire per migliorare o, quanto meno, per verificare e garantire la capacità di tenuta dei terreni e per assicurare la continuità fra terreni e manufatto. E' appena

il caso di aggiungere che, poichè le nuove opere vengono inevitabilmente impostate in luoghi nei quali le condizioni geologiche sono meno favorevoli che per il passato, gli interventi risultano oggi molto più difficili e complessi.

Sviluppo prodigioso hanno assunto negli ultimi decenni strade, ferrovie, costruzioni marittime. Le loro dimensioni ed i loro requisiti sono ben diversi da quelli del recente passato e pertanto le opere d'arte hanno preso uno slancio inaspettato: i ponti e i viadotti, le gallerie ferroviarie, stradali e metropolitane, i moli e le dighe foranee sono assai spesso opere di concezione nuova ed arditissima e richiedono frequentemente interventi che rendano il terreno atto ad assorbire azioni statiche e dinamiche molto impegnative.

Il progresso sempre più rapido della società ha posto anche l'esigenza di organizzare il territorio su vasta scala al fine di accogliere convenientemente nuovi insediamenti urbani ed industriali con nuovi e più ampi impianti portuali, aeroportuali e così via. Molto spesso ciò significa rendere disponibili ed utilizzabili grandi aree su terreni molto cedevoli, soggette ad inondazioni od addirittura costantemente al disotto delle acque del mare o di lagune o di paludi. Occorre quindi sopraelevarle per mezzo di estesissimi e più o meno alti rilevati e facendo in modo che vi si possano costruire opere di vario genere senza pregiudizievole, eccessivi cedimenti.

Problemi meno spettacolari, ma più numerosi e difficili pongono all'inverso i centri abitati esistenti, che molto spesso debbono essere nel nostro Paese risanati e ristrutturati per adeguarli alle mutate esigenze degli abitanti. In questi casi assai spesso l'intervento urbanistico si intreccia indistricabilmente con la lotta a movimenti franosi in atto o potenziali, lotta impari con le forze della natura, ma alla quale non possiamo sottrarci per molti motivi. Ci troviamo allora di fronte alla necessità di *consolidare* il centro abitato ossia di effettuare molteplici tipi di interventi attivi e passivi.

Interventi di dimensioni complessive di gran lunga inferiori di quelli prima ricordati ma di valore culturale incommensurabile sono stati e vengono operati per la conservazione, il restauro, l'accessibilità dei monumenti e scavi archeologici. A titolo di esempio si possono citare l'Ara Pacis Augustae, recuperata mediante congelamento del terreno nel 1938, la cripta della Basilica di S. Nicola in Bari, una volta completamente invasa dalle acque e per quasi un secolo inaccessibile ai fedeli, restituita poi alla sua

funzione con un intervento operato nel 1954, i già ricordati templi di Abu Simbel salvati nel 1966 dalla sommersione nelle acque del serbatoio di Aswan.

Questi pochi cenni sono sufficienti per porre in evidenza come il miglioramento delle caratteristiche dei terreni, potendo modificare le ipotesi sul tipo di risposta che il sottosuolo può dare all'azione esercitata dai manufatti e sulla disponibilità di materiali da costruzione, amplia le possibilità creative dell'ingegnere e fa quindi parte integrante, allorché ne sia dimostrata la validità, delle soluzioni progettuali.

Non si deve tuttavia sottovalutare il contributo, spesso determinante, che queste tecniche recano in situazioni di emergenza nel caso di lavori in terreni di caratteristiche scadenti. Sempre più frequente, ad esempio, è il ricorso a questi procedimenti nello scavo delle gallerie: in molte formazioni geologiche le sorprese non sono evitabili, anche dopo accuratissimi studi, per il rapido mutare delle condizioni locali ed uomini e macchine vengono improvvisamente a trovarsi in situazioni assai gravi; in questi casi un intervento sui terreni, rapido e ben diretto, può ristabilire in breve tempo la situazione.

2. - Qualsiasi opera di ingegneria e specificamente di ingegneria civile deve rispondere a finalità generali che sono sempre di natura socio-economica, deve possedere appropriate doti di funzionalità e deve presentare, inoltre, determinati requisiti tecnici. Sotto quest'ultimo punto di vista può dirsi che deve sussistere un soddisfacente rapporto di compatibilità fra le azioni esterne cui l'opera è assoggettata e le sue capacità di assorbirle.

Come *opera* va inteso in questa sede l'insieme del manufatto e del corpo di terreno in sito al quale è vincolato od addirittura solo questo ultimo se il manufatto manca, come nel caso di una pendice.

Per raggiungere lo scopo possiamo intervenire secondo quattro direttrici:

a) sulle azioni esterne: una direttrice di intervento di questo tipo è, ad esempio, quella che si assume quando, per *difendere il suolo*, si tende a regolare i corsi d'acqua ed i deflussi superficiali in genere, ad effettuare sistemazioni idraulico-forestali ed idraulico-agrarie, a contenere l'azione aggressiva delle onde marine sui litorali mediante opere opportune di difesa;

b) sul manufatto, se esso esiste od è previsto, modificandone struttura, forma, dimensioni;

c) sulla geometria del corpo di terra che interessa, come ad esempio nel caso di una pendice il cui profilo può essere modificato con rilevati al suo piede e riduzioni alla sua sommità;

d) sulle proprietà fisico-meccaniche dei terreni.

All'ultima delle direttrici indicate si vuole alludere quando si parla di *miglioramento del terreno*, miglioramento cioè del terreno nelle sue proprietà intrinseche [PENTA, 1942] ovvero miglioramento del terreno punto per punto.

Con il termine *terreno* si è inteso fin qui indicare genericamente tutti i materiali naturali poco o molto resistenti, poco o molto deformabili e cioè l'insieme delle *rocce sciolte* e delle *rocce lapidee*. Ed effettivamente nello sterminato campo dei materiali naturali si passa con gradualità dalle une alle altre e, se è vero che è facile apprezzare le marcate differenze che esistono fra i termini estremi, non è men vero che nell'ampia fascia di transizione ci si imbatte in materiali che possono essere indifferentemente indicati con l'uno o con l'altro termine.

D'altronde è già stato autorevolmente osservato [SKEMPTON, 1961] come una distinzione concettuale fra rocce e terreni non sia ammissibile e si debba piuttosto ritenere che le leggi che reggono il comportamento delle une e delle altre siano fundamentalmente le stesse.

Tali considerazioni ben si addicono anche all'argomento del quale qui si tratta. Alcuni tipi di intervento si applicano, come poi si vedrà, sia alle rocce sciolte sia alle rocce lapidee. Inoltre molte formazioni naturali sono costituite da un fitto susseguirsi ed intercalarsi di materiali volta a volta sciolti e lapidei sicchè oggetto dell'intervento è il *terreno* nella sua più lata accezione.

Sarebbe dunque artificioso e non rispondente alla realtà operare una rigida distinzione fra miglioramento delle rocce sciolte e miglioramento delle rocce lapidee; occorre invece trattare del miglioramento delle loro proprietà unitariamente. Ciò non toglie però che nel seguito, per rendere più spedito il discorso, converrà concentrare l'attenzione ora su materiali chiaramente riportabili allo schema astratto di rocce sciolte, ora a quello di roccia lapidea ed allora, per

semplicità, si parlerà rispettivamente di *terreno* o di *roccia*.

Per ultimo osserveremo come il termine *miglioramento* presuppone una preesistente condizione del materiale, il che si verifica ovviamente nel caso dei materiali naturali in sito e non quando essi vengano estratti per usarli poi, come materiali da costruzione. Ed infatti i problemi che si presentano nei due casi sono nel loro insieme molto diversi, anche se trattandosi comunque di problemi geotecnici talune questioni siano ad essi comuni.

3. - Il problema del miglioramento dei materiali naturali si pone, in sede tecnica, nel contesto di quelle più ampie ed articolate finalità assegnate all'opera di ingegneria che si intende realizzare. Nella ricerca delle soluzioni siamo fatalmente indotti ad operare la consueta operazione mentale di sostituire al materiale naturale un modello al suo confronto estremamente semplice caratterizzato da certe proprietà da noi stessi definite ed a proporci poi di modificare una sola di queste proprietà, quella cioè che a preferenza delle altre entra in gioco nel quadro generale dell'opera.

In realtà il materiale subisce il nostro intervento nella sua complessa eppure unitaria costituzione e da ciò segue che, nel modificare la proprietà desiderata, noi modifichiamo, al tempo stesso, anche le altre. Comunque, sono appunto le *proprietà* del materiale che rappresentano la mira finale del nostro intervento; esse vanno tenute distinte dai fattori che descrivono la costituzione del materiale stesso e che sono un po' il filo conduttore lungo il quale si snoda l'intervento stesso.

I *fattori significativi* in rapporto alla finalità da raggiungere non sono però tutti i fattori che caratterizzano la costituzione del materiale, ma solo quelli sui quali riusciamo ad intervenire. A ben riflettere questi sono:

a) la *porosità* ed il *contenuto d'acqua* nelle argille, nei limi, nelle sabbie, nelle ghiaie;

b) le *fasi* presenti nei pori dei terreni sciolti o nelle fratture delle rocce;

c) lo *stato di sollecitazione interna* nelle rocce.

Qualche volta nel caso delle argille, ma in verità assai raramente, il fattore sul quale si interviene è la *composizione mineralogica*.

Variando questi fattori costituzionali, noi in-

duciamo una modifica nelle proprietà dei materiali. Quale rapporto intercorre, allora, fra fattori e proprietà in termini non solo qualitativi, ma anche quantitativi?

La risposta a tale quesito è il presupposto logico di qualsiasi intervento ed è quindi il primo passo da compiere, poichè solo così è possibile individuare, in relazione ai materiali presenti ed alle finalità da raggiungere, i fattori significativi sui quali operare l'intervento stesso ed i limiti nei quali esso può risultare efficace.

L'argomento investe tutta la ricerca di base della Geotecnica e non può quindi essere esaurito, nemmeno alla lontana, in questa sede. Cionondimeno può essere non inutile lumeggiare qualcuno dei suoi aspetti salienti per porre in evidenza come sia possibile dare una risposta razionale al quesito innanzi proposto. A tal fine prenderemo in considerazione le tre proprietà fondamentali: permeabilità, resistenza a rottura, deformabilità.

Cominciando dalla *permeabilità* e dai terreni (rocce sciolte), osserveremo come questa proprietà dipenda da numerosi fattori.

Dipende anzitutto dalla composizione granulometrica e per le argille più fini anche dalla composizione mineralogica. Dipende altresì dalla natura del fluido in movimento e precisamente dalla sua viscosità cinematica e dalla sua composizione chimica.

Se poi si considerano i terreni nella loro sede, occorre tener presente che i depositi naturali sono quasi sempre costituiti da stratificazioni od intercalazioni di terreni più o meno diversi fra loro e, quand'anche siano omogenei, sono formati da particelle non isometriche e perciò orientate secondo una giacitura preferenziale. Per l'una o per l'altra ragione, o per entrambe, la permeabilità dei depositi naturali è una proprietà che in dipendenza dei particolari stratigrafici assume valori diversi e, per di più ed assai spesso, diversi a seconda della direzione.

I fattori accennati e che riguardano la natura, le dimensioni, la forma delle particelle costituenti il terreno, le caratteristiche del fluido, i particolari stratigrafici dei depositi in sito sono tutti fattori che esercitano grande influenza sulla permeabilità. Quando però si effettua un intervento volto a modificare la permeabilità di un dato terreno, questi fattori non possono essere variati, salvo ed eccezionalmente la composizione mineralogica, e rappresentano quindi una costante del problema.

La permeabilità di un dato terreno dipende

però anche dalla *porosità* ed appunto questo fattore è da prendere in considerazione. Modificando la porosità di un terreno, quale variazione di permeabilità possiamo attenderci?

Le figure 1 e 2 danno risposta, in linea esemplificativa, alla domanda⁽¹⁾. Per un dato terreno, variandone la porosità, possiamo determinare una variazione di permeabilità notevole, ma non superiore ad 1-2 ordini di grandezza. Ben più ampio, ed anzi straordinariamente ampio, è il campo di variazione della permeabilità a seconda della granulometria, come mostra la fig. 1.

Orbene le formazioni naturali comprendono quasi sempre materiali diversi più o meno stratificati. La loro capacità di tenuta è legata principalmente ai materiali a granulometria grossa non solo quando questi costituiscono la maggior parte della formazione, ma anche quando costituiscono intercalazioni continue ed estese, sebbene in tal caso la possibilità di elevate filtrazioni si verifichi solo per moti secondo la giacitura delle intercalazioni medesime. Data l'elevata permeabilità dei terreni a granulometria grossa (v. fig. 1), una diminuzione della loro porosità non può quindi conseguire un risultato tanto cospicuo da modificare radicalmente la capacità di tenuta della formazione.

Questo spiega come il problema di ridurre la permeabilità dei terreni in sito sia rimasto insoluto fino a quando non sono stati adottati i procedimenti che già venivano impiegati nelle formazioni lapidee e che sono ispirati ad un differente criterio.

Le rocce (rocce lapidee) sono costituite da sostanza solida per sé stessa praticamente impermeabile, ma che ben di rado è continua in quanto la formazione è interessata da discontinuità di vario genere e di varia origine.

Riferendoci alle discontinuità dovute alle fratture, il grado di fratturazione delle formazioni rocciose è assai vario a seconda dell'estensione, dell'apertura e della reciproca distanza delle fratture medesime.

Queste possono essere a volte molto fitte ed orientate a caso, fino all'estremo limite delle cataclasi e delle miloniti nelle quali la roccia è così frantumata o triturrata da rassomigliare molto da vicino a materiali detritici od a ghiaie; in genere sono più o meno distanziate e sono

orientate secondo una sola o poche giaciture.

Ai fini del problema in esame assumono importanza le caratteristiche delle fratture: a volte molto strettamente serrate, a volte aperte con distanza fra i lembi di centesimi o di decimi di mm od ancora di più, nel qual caso si può parlare più propriamente di spaccature.

La resistenza al moto dell'acqua dipende dall'apertura delle fratture e dalla scabrosità delle superfici che le delimitano. Se poi la frattura è ripiena di un materiale, come ad esempio una breccia di frizione, interviene la permeabilità del materiale di riempimento.

Questi caratteri della fratturazione ed in particolare l'apertura delle fratture non possono essere modificate poichè la deformabilità della roccia nel suo insieme è ridottissima ed inoltre il suo comportamento è praticamente elastico entro ampi limiti.

Non essendo possibile modificare l'ossatura della formazione lapidea ossia la geometria delle fratture, il fattore significativo al fine di modificare la permeabilità è da identificare nelle sostanze che occupano le fratture ed in genere i vuoti, e cioè aria, acqua, materiali solidi più o meno fini e dispersi. Introducendo altre sostanze che scaccino, sostituiscano, modifichino le fasi presenti nei vuoti è possibile modificare la permeabilità della roccia.

Seguendo questo ordine di idee circa mezzo secolo fa furono effettuati i primi interventi iniettando nelle fratture delle formazioni rocciose miscele cementizie. In seguito queste tecniche di intervento si sono evolute tanto da poter essere trasferite ai terreni (rocce sciolte), anche molto fini.

Si è giunti così alla conclusione che per modificare la permeabilità non conviene intervenire sulla geometria del mezzo — la porosità dei terreni e lo stato di fratturazione delle rocce —, ma sulle sostanze presenti rispettivamente nei pori e nelle fratture.

La riuscita dell'intervento è legata pertanto non al comportamento proprio del materiale da trattare, ma alle sostanze di apporto ed alla misura e all'uniformità con le quali penetrano nel materiale.

Modificando la porosità di un terreno, si possono invece indurre variazioni tecnicamente rilevanti nelle sue *proprietà meccaniche*.

Consideriamo dapprima sulla scorta di prove di compressione triassiale, particolarmente idonee a dare informazioni in proposito, i terreni incoerenti quali sabbie e ghiaie. A seconda della

(¹) I diagrammi riportati nel testo sono basati su dati sperimentali estratti in parte dalla letteratura, ed in parte dall'archivio dell'Istituto di Geotecnica di Napoli (I.G.N.).

I simboli e la terminologia adottati sono quelli della Associazione Geotecnica Italiana [1963].

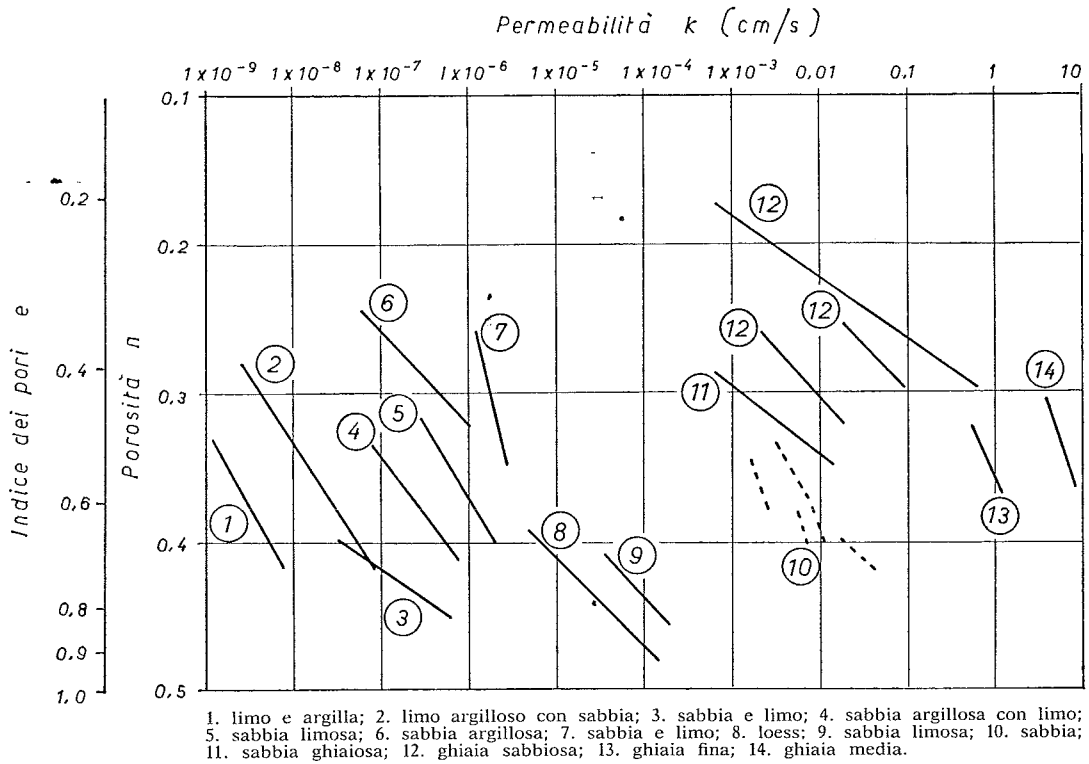


Fig. 1. - Relazione fra la porosità e la permeabilità di alcuni terreni naturali. CEDERGREEN [1967]; LAMBE, WHITMAN [1969]; I.G.N.

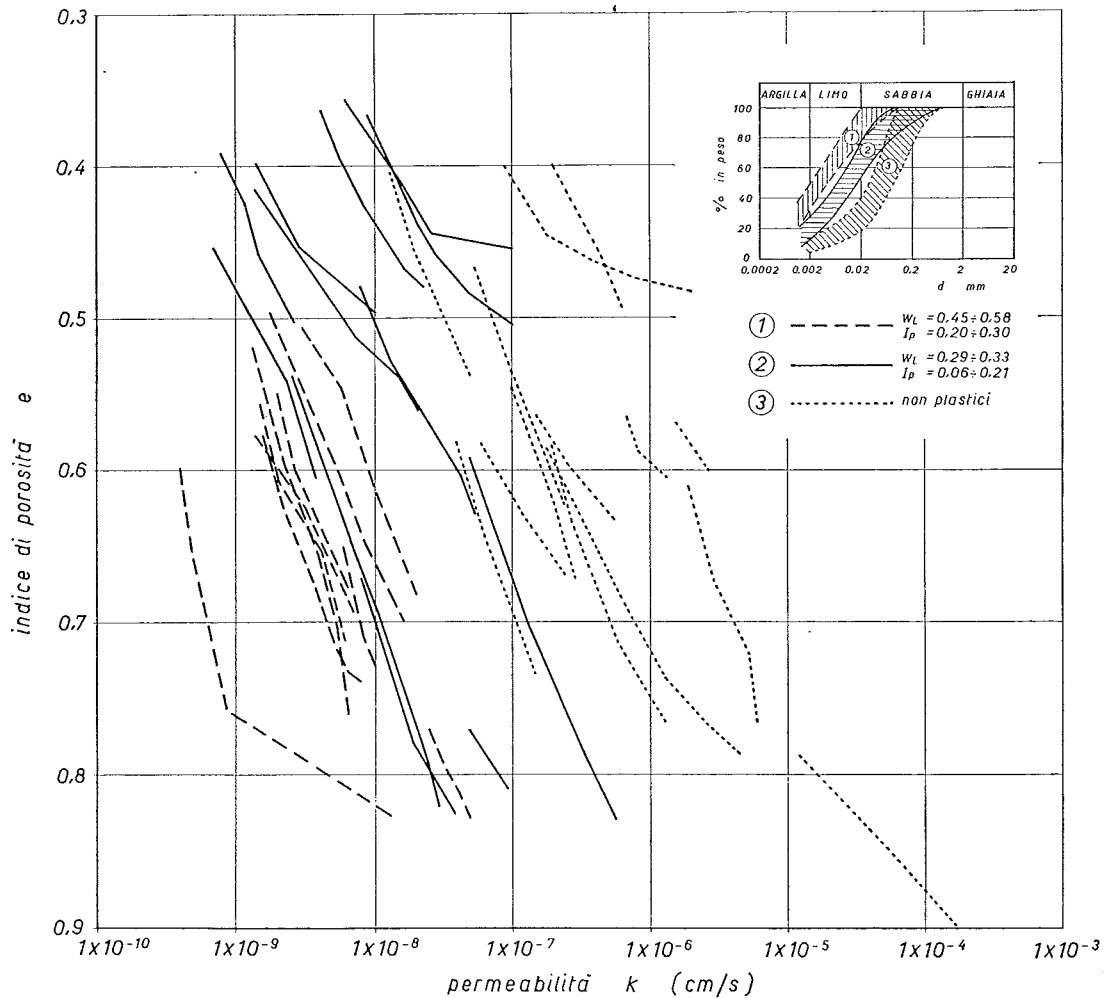


Fig. 2. - Relazione fra la porosità e la permeabilità di alcuni terreni a grana fina di origine fluviale provenienti dal medio corso dei fiumi Tevere e Volturno. I.G.N.

porosità alla quale si trovano nell'intervallo compreso fra porosità minima e massima, presentano un comportamento diverso.

Se inizialmente poco addensati (p. es. in fig. 3 per $e_0 = 0,41$), essi vengono deformati da un carico assiale sempre crescente fino ad un massimo in corrispondenza del quale la deformazione prosegue sotto carico costante. Quando invece gli stessi materiali sono molto addensati (in fig. 3, $e_0 = 0,16$), il carico raggiunge un

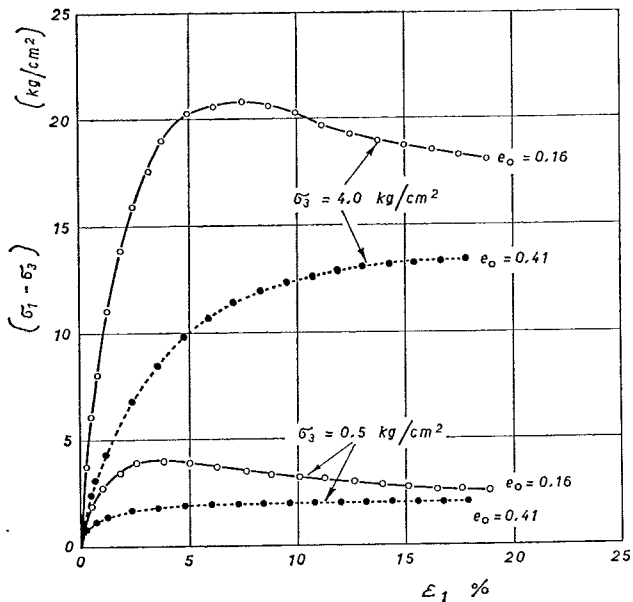


Fig. 3. - Relazioni tensioni-deformazioni in prove triassiali drenate su terreni alluvionali a grana grossa del fiume Fortore, costipati alle porosità e_0 indicate in figura e con contenuto d'acqua $w = 5\%$. I.G.N.

massimo; successivamente la deformazione può ancora crescere, ma è sufficiente applicare un carico minore che tende poi a divenire costante. Tali andamenti sono indipendenti dalla pressione di contenimento σ_3 .

Inoltre gli stessi materiali, fintantoché le deformazioni sono limitate, sono capaci di una resistenza ben maggiore allorquando sono molto addensati. Alle grandi deformazioni invece la capacità di resistenza è poco diversa quale che

sia la porosità iniziale.

Per conseguenza, se con procedimenti opportuni si riesce a diminuire la porosità di un terreno incoerente, si ottiene un aumento della capacità di resistenza massima, che inoltre viene mobilizzata con deformazioni ridotte.

L'aumento dell'angolo di attrito che così si può raggiungere (v. fig. 4) dipende dalle caratteristiche del terreno ed è, ad ogni modo, dell'ordine di $5^\circ \div 10^\circ$. Variazioni di questa entità significano un miglioramento di notevole rilievo nei riflessi dei problemi di stabilità.

Passando ai terreni a granulometria finissima, le argille che pongono problemi di miglioramento sono in genere le argille sature di acqua, per le quali quindi si può indifferentemente considerare il contenuto d'acqua o la porosità iniziali. E' inoltre da notare che è sufficiente considerare le argille normalmente consolidate, poiché le argille sovraconsolidate posseggono in ogni caso proprietà meccaniche relativamente soddisfacenti.

Un'argilla normalmente consolidata sotto una certa pressione di consolidazione p_c possiede un contenuto d'acqua w_0 .

Fra p_c e w_0 intercorre, per una data argilla, una relazione univoca che può essere determinata sperimentalmente, ad esempio con prove di

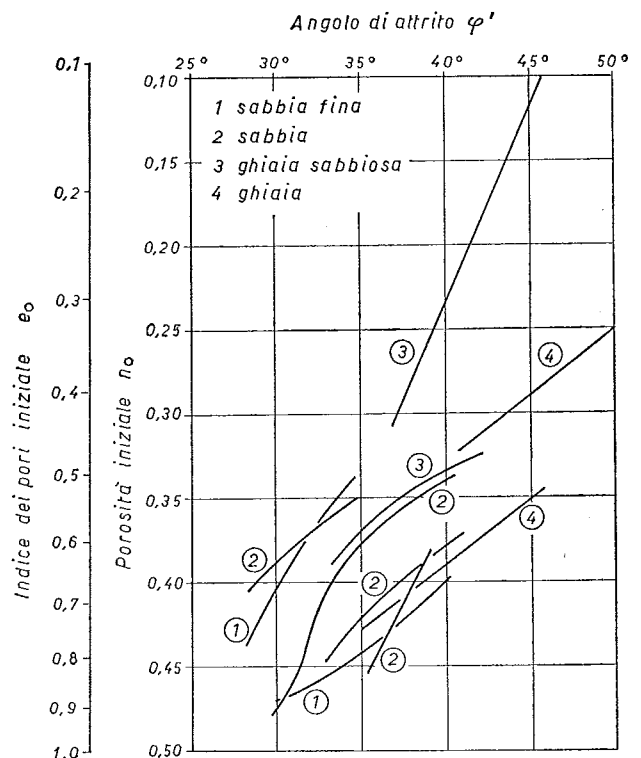


Fig. 4. - Relazione fra la porosità iniziale e l'angolo di attrito di alcuni terreni a grana media e grossa. BJERRUM, KRINGSTAD, KUMMENEJE [1961]; LAMBE, WHITMAN [1969]; ROWE [1962]; I.G.N.

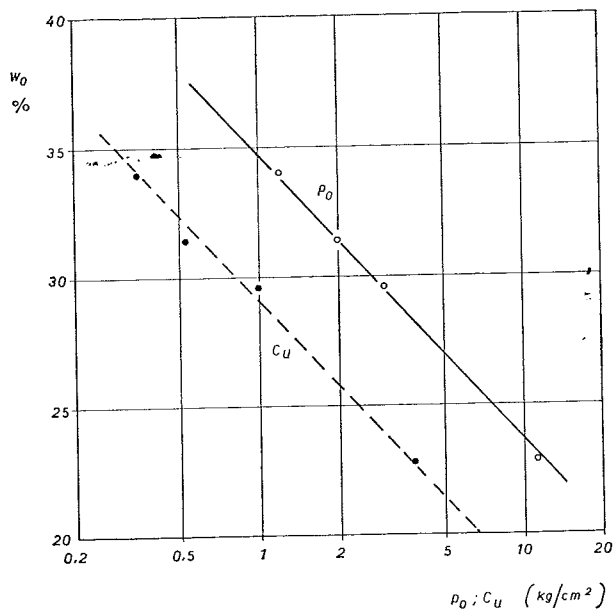


Fig. 5. - Relazioni fra contenuto d'acqua iniziale w_0 , pressione di consolidazione p_0 e coesione non drenata c_u . Limo con argilla di origine deltizia (delta Padano); $w_L = 0,53$; $I_p = 0,27$. I.G.N.

compressione isotropa (v. fig. 5). Se quella stessa argilla viene portata a rottura variando le sollecitazioni ma senza che il contenuto di acqua abbia la possibilità di modificarsi (ed è questa la condizione che nei problemi tecnici più di frequente interessa, condizione che in laboratorio si realizza nelle prove cosiddette non drenate), la sua capacità di rottura espressa ad esempio dalla grandezza $c_u = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ è univocamente determinata.

Ciò significa che un'argilla in sito normalmente consolidata ha assunto un contenuto naturale di acqua e quindi una porosità dipendenti dalla profondità del punto che si considera rispetto alla superficie del suolo ed ha corrispondentemente assunto una certa capacità di resistenza a rottura. Se allora, con tecniche adeguate vengono ridotti il contenuto d'acqua e conseguentemente la porosità, si raggiunge lo scopo di conferire al materiale una maggiore resistenza (v. fig. 6).

Questo guadagno di resistenza a rottura, a parità di variazione di contenuto di acqua, è diverso da terreno a terreno. Volendo ottenere un certo incremento di resistenza a rottura di una data argilla normalmente consolidata, occorre determinare un decremento del suo contenuto iniziale di acqua tanto maggiore quanto più questo è elevato.

In definitiva può dirsi che, sia che si tratti di sabbie e di ghiaie sia che si tratti di ar-

gille, la porosità del materiale si presenta come un fattore significativo ai fini del miglioramento della capacità di resistenza a rottura.

Lo stesso può dirsi anche in relazione alla deformabilità, intesa come gradiente delle deformazioni per rapporto agli incrementi di sollecitazione che le determinano: la deformabilità di un terreno, come è ben noto, diminuisce infatti al diminuire della sua porosità.

Per le argille normalmente consolidate, se si fa riferimento ad esempio alla condizione di compressione edometrica, ci si può avvalere della relazione che lega il relativo modulo all'indice di porosità per stabilire quale sia l'incremento che il modulo stesso subisce per effetto di un certo decremento della porosità del terreno.

Per i terreni incoerenti si potrebbe citare ancora una volta l'esperienza di laboratorio sulla scorta della fig. 3, che pone in evidenza la deformabilità diversa dello stesso terreno a seconda della porosità. Volendo però considerare nel loro insieme i grandi depositi naturali in sito, ricorderemo come la diga di Vernago sul torrente Senales in Alto Adige poggia su un poderoso ammasso di ghiaie con sabbia le cui caratteristiche mineralogiche e di tessitura sono molto uniformi in quanto determinate dai ca-

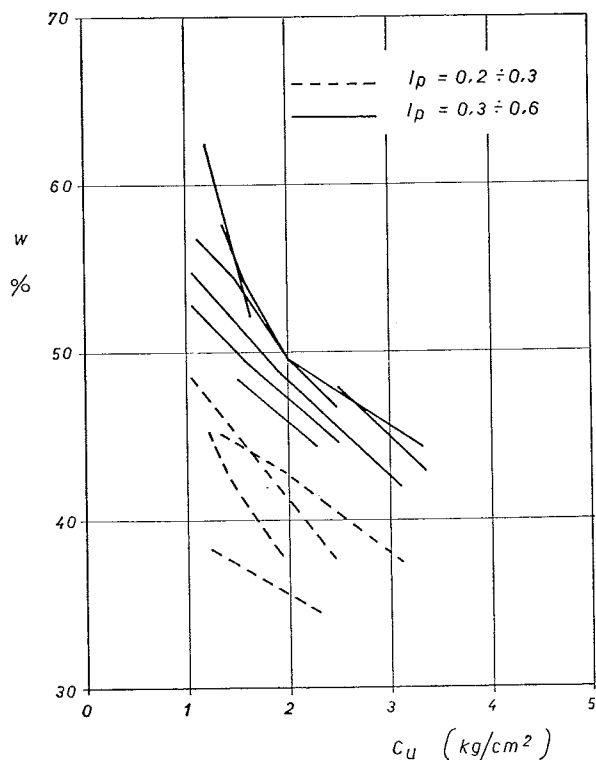


Fig. 6. - Relazione fra contenuto d'acqua w e resistenza (coesione non drenata) c_u . Terreni naturali a grana fina di origine lagunare (pianura Pisana). I.G.N.

ratteri geomorfologici, ben definiti, della zona. La porosità invece presenta una marcata discontinuità come è provato dai sondaggi e dalle indagini geosismiche: in alto, fino ad una profondità dalla superficie esterna dell'ordine di circa 40 m, la porosità è nettamente maggiore che nei terreni sottostanti.

Alla diversa porosità corrisponde una diversa deformabilità (v. fig. 7) come risulta dall'interpretazione data ai valori dei cedimenti verificatisi nel piano di posa della diga.

Correlazioni analoghe si possono ricavare dalle misure che sistematicamente vengono eseguite nei materiali posti in opera mediante compattamento nelle dighe di terra. La fig. 8, benchè si riferisca a terreni non proprio uguali quanto a granulometria, pure pone chiaramente

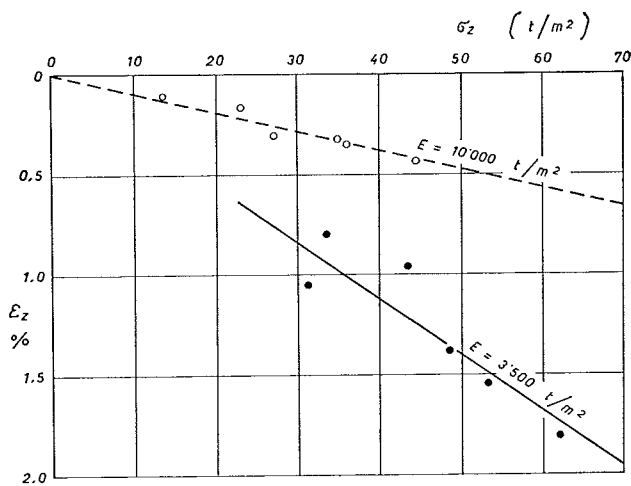


Fig. 7. - Deformabilità di terreni a grana grossa in sito; depositi di conoide torrentizio a profondità comprese fra 10 e 50 m dal p.c. (linea continua) e fra 50 e 200 m (linea a tratti). CROCE *et al.* [1963].

in evidenza l'influenza di un maggiore addensamento dei terreni incoerenti sulla deformabilità.

4. - Fra fattori costitutivi e proprietà dei terreni intercorrono dunque stretti rapporti che le conoscenze già acquisite ed i progressi continui della ricerca in questo settore precisano e chiariscono incessantemente. E' così possibile individuare i fattori sui quali, in relazione ai materiali presenti, conviene intervenire per raggiungere determinati scopi.

Ai fini del miglioramento dei terreni e delle rocce in sito i fattori significativi possono essere, come si è visto, la porosità ed il contenuto di acqua, le fasi presenti nei pori o nei vuoti, lo stato di sollecitazione interna delle rocce (v. tabella).

Questi fattori possono essere modificati con procedimenti svariati, ma che fondamentalmente attuano tre tipi di intervento ben distinti a seconda dei fattori sui quali si intende operare.

Un primo tipo di intervento mira a modificare la struttura del materiale apportandovi energia di varia natura. Come si è visto, solo i terreni nel senso stretto del termine si prestano ad un tale tipo di intervento; i fattori che specificamente vengono modificati sono la porosità ed il contenuto di acqua e le finalità che possono essere raggiunte sono essenzialmente quelle legate alle proprietà meccaniche dei terreni medesimi.

L'apporto di energia può essere realizzato applicando azioni meccaniche sia dinamiche che statiche, azioni elettriche ed azioni termiche. I

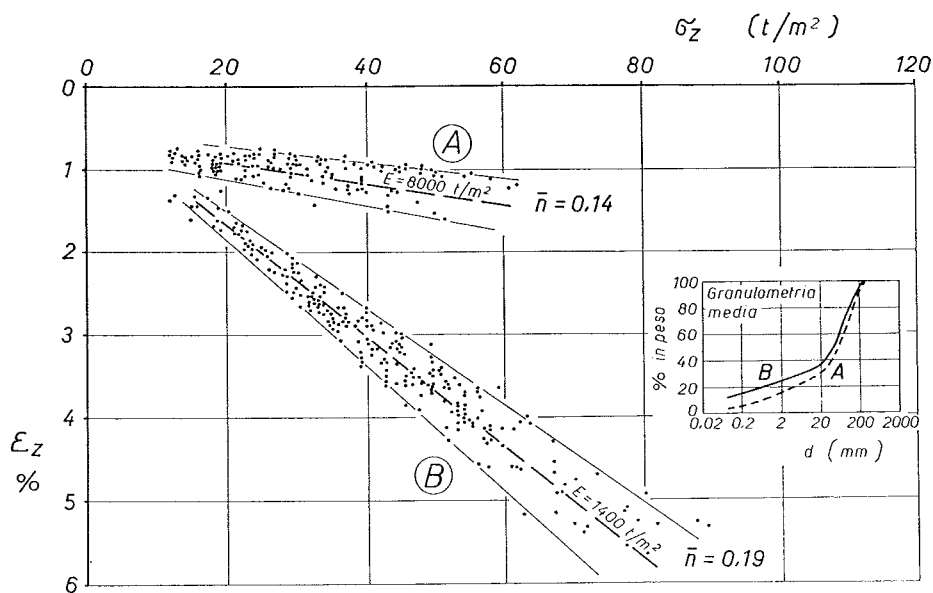


Fig. 8. - Deformabilità di terreni a grana grossa posti a rilevato; A, terreni fluvio-glaciali; B, alluvioni. PELLEGRINO [1965].

Miglioramento dei terreni in sito

Fattore oggetto dell'intervento	Tipo di intervento	Terreni	Metodi	Procedimenti
Porosità contenuto di acqua	Per apporto di energia	Ghiaie Sabbie	Dinamici	Vibrazione da superfici esterne (magli, rulli, ecc.) Vibroflottazione Costipamento con pali Esplosivi
		Limi Argille	Statici	Applicazione di carichi in superficie Abbassamento della quota piezometrica Dreni per accelerare la consolidazione
		Limi Argille	Elettrici	Consolidazione elettrosmotica Stabilizzazione elettrosmotica
		Limi Argille	Termici	Congelamento Riscaldamento
Fasi presenti nei pori o nei vuoti	Per aggiunta di altre sostanze	Ghiaie, sabbie Rocce fratturate, fessurate, cavernose	Iniezioni	Di cementi e miscele cementizie Di silicati Di resine sintetiche
Stato di sollecitazione interna	Per introduzione di elementi resistenti a trazione	Rocce stratificate e fessurate	Chiodatura	Bulloni, chiodi
			Precompressione	Ancoraggi

metodi dinamici sono particolarmente indicati per migliorare le proprietà delle ghiaie e delle sabbie, gli altri risultano validi nei limi e nelle argille.

Ciascuno di questi metodi si articola in svariati procedimenti, al qual proposito è da notare che taluni procedimenti assumono la loro piena validità nel quadro di un certo metodo di intervento, ma possono assolvere una funzione assai utile, benchè non altrettanto caratterizzante, nel contesto di un altro metodo. La vibroflottazione ad esempio è un tipico procedimento dinamico che trova il suo settore di impiego più significativo nelle ghiaie e nelle sabbie; può però essere adottata per realizzare dreni di sabbia atti ad accelerare la consolidazione di limi ed argille ed in tal caso interviene come tecnica sussidiaria nel quadro di un metodo di intervento statico.

Conviene ancora aggiungere che dei procedimenti qui in esame quello della stabilizzazione elettrosmotica interviene non solo sulla porosità

e sul contenuto di acqua, ma anche sulla costituzione mineralogica delle argille.

L'intervento sulle fasi presenti nei pori, quando si tratta di terreni, o nelle fratture e cavità, nel caso delle rocce, consiste nella sostituzione, in tutto od in parte, delle fasi medesime con altre sostanze dotate di proprietà idonee a raggiungere la finalità desiderata. In genere, come si è visto, questo tipo di intervento mira a conferire maggiore capacità di tenuta alle rocce fratturate, fessurate, cavernose oppure alle ghiaie e sabbie molto permeabili, ma a volte viene attuato allo scopo di migliorare le caratteristiche meccaniche del materiale.

Il terzo tipo di intervento ha per oggetto lo stato di sollecitazione interna delle rocce e si esplica con la introduzione di elementi resistenti a trazione.

Questo tipo di intervento mira a risolvere problemi di carattere statico, legati in genere alla presenza di superfici di discontinuità, come fratture o piani di stratificazione e giunti quasi

sempre presenti nelle formazioni lapidee. A seconda del problema tecnico da risolvere ed alle caratteristiche della formazione l'intervento può consistere in un semplice trasferimento di carichi, quasi sempre rappresentati dal peso di parti superficiali di roccia, a zone più lontane della formazione (chiodatura) oppure può avere una più complessa finalità e cioè quella di ricostituire la capacità di resistenza allo scorrimento della roccia lungo le superfici di discontinuità realizzando nella roccia stessa un opportuno stato artificiale di sollecitazione interna (precompressione).

Le considerazioni svolte nelle pagine precedenti vuoi fra i rapporti intercorrenti fra fattori costitutivi e proprietà dei terreni e delle rocce, vuoi sui tipi di intervento dimostrano come il miglioramento dei terreni sia fra le tecniche delle quali l'ingegneria civile oggi si avvale in forma razionale, sulla base cioè di impostazioni e di studi teorici e sperimentali. Il miglioramento dei terreni non è frutto quindi di improvvisazione a meno di quei casi di emergenza, non infrequenti, nei quali l'indugio non è consentito; è invece l'oggetto di una progettazione razionalmente concepita ed il risultato di una realizzazione intelligentemente condotta ed affinata in sede esecutiva.

Il punto cruciale di questo seguito logico e coordinato di operazioni sta all'inizio, nel chiarire accuratamente le finalità da raggiungere e nello stabilire le caratteristiche dei terreni sui quali si intende intervenire. Una conoscenza approfondita del sottosuolo, che consideri da vicino particolari stratigrafici e variabilità di natura e di condizioni iniziali dei terreni, è essenziale per la riuscita dell'intervento e, per ottenerla, non bisogna esitare a dedicarvi tempo ed energie anche al di là di quanto sarebbe sufficiente in un normale problema di fondazione.

Su queste basi è possibile valutare, seguendo la via delineata nelle pagine precedenti, se le finalità che si vogliono raggiungere sono effettivamente perseguibili ed attraverso quale metodo e con quali procedimenti o combinazione di procedimenti. Si può così inquadrare il

progettato miglioramento dei terreni nel contesto generale di tutta l'opera che si vuole realizzare e quindi verificare se esso rappresenta una direttrice preferibile ad altre possibili direttrici di intervento.

A questo punto si potrebbe considerare conclusa la progettazione di massima ed aperta la via alla progettazione esecutiva.

La progettazione esecutiva, mirando a precisare in tutti i particolari le operazioni da compiere per realizzare l'intervento e quindi modalità e mezzi, durate e costi, si diversifica radicalmente a seconda del metodo ed in parte a seconda del procedimento. Le relative impostazioni teoriche e le questioni tecnologiche non possono quindi formare oggetto se non di trattazioni particolari, che vanno al di là dei limiti che qui ci siamo prefissi di rispettare.

Quali i futuri sviluppi di questo settore della Geotecnica? Indubbiamente assai ampi soprattutto se i progressi di carattere tecnologico, che indubbiamente si verificheranno, troveranno la loro giustificazione e verranno applicati in stretto coordinamento con la ricerca di base e se grande attenzione verrà dedicata alla verifica sperimentale dei risultati.

BIBLIOGRAFIA

- A.G.I. (1963): *Nomenclatura geotecnica e classifica delle terre*. Geotecnica, n. 4.
- BJERRUM L., KRINGSTAD S., KUMMENEJE O. (1961): *The Shear Strength of Fine Sand*. Proc. V Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Paris, Vol. I.
- CEBERGREEN H. R. (1967): *Seepage, Drainage and Flow Nets*. John Wiley, New York.
- CROCE A., DOLCETTA M., FINZI D., MARTINELLI D. (1963): *Compressibility of Soils of Glacial Origin*. Proc. Europ. Conf. on Soil Mech. Found. Eng., Wiesbaden, Vol. I.
- LAMBE T. W., WHITMAN R. V. (1969): *Soil Mechanics*. John Wiley, New York.
- PELLEGRINO A. (1965): *Geotechnical Properties of Coarse-Grained Soils*. Proc. VI Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Montreal, Vol. I.
- PENTA F. (1942): *Natura e classifica dei terreni in rapporto alle fondazioni*. Roma.
- ROWE P. W. (1962): *The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact*. Proc. Roy. Soc. A269, pp. 50-527.
- SKEMPTON A. W. (1961): *Presidential Address*. Proc. V Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Paris, Vol. III.

SUMMARY

General criteria in the improvement of soil properties.

The paper represents the introductory report of the panel discussion on the theme: «Improvement of soil properties: results and perspectives from the theoretical, constructional and economical viewpoint» at the X Italian Geotechnical Conference held in Bari, October 1970.

The feasibility of a successful improvement of soils

and rocks properties and the choice of the best technique are related to the knowledge of the relationships between the constitutive factors of soils and their mechanical properties.

The need of considering the use of improvement techniques within the framework of a clear design scheme is underlined.