

Su alcune applicazioni dei procedimenti per il miglioramento delle caratteristiche dei terreni

V. BEVILACQUA *

SOMMARIO: Contributo alla Relazione Generale sul tema: «Miglioramento delle caratteristiche dei terreni: risultati e prospettive sotto l'aspetto teorico, esecutivo ed economico». X Convegno di Geotecnica, Bari, 26-27 ottobre 1970.

1. Premessa

Mi limiterò ad avanzare alcune considerazioni su alcuni metodi e tecniche di miglioramento delle caratteristiche dei terreni che negli ultimi due decenni hanno trovato applicazione, più o meno estesa, nella pratica dell'ingegnere.

Le mie considerazioni saranno angolate dal punto di osservazione di colui che, esplicando la propria attività nel campo delle costruzioni idroelettriche e non essendo specificatamente competente in materia geotecnica, si è trovato spesso di fronte alla necessità di impostare problemi tecnici, a volte di concepire la fattibilità di una opera, di predisporre ed affermare scelte tecnico-economiche, in situazioni strettamente condizionate dalla valutazione delle caratteristiche dei terreni in relazione all'opera progettata.

L'ingegnere in tale posizione è guidato, da un lato dalle conoscenze apprese dalla Geotecnica e dall'apprezzamento dei contributi che tale scienza può fornire alla soluzione dei problemi, dall'altro dalla valutazione delle possibilità tecnologiche di intervento, in ordine naturalmente non solo alla attuazione efficace di una idonea tecnica operativa, ma all'accertamento che essa possa essere impiegata entro quei ben definiti ordini di tempo e di spesa in cui va inquadrata la realizzazione intera dell'opera stessa.

Le conoscenze geotecniche — è noto — o anche semplicemente la disposizione a recepire le impostazioni e le formulazioni geotecniche, sono nella pratica professionale dell'ingegnere, acquisizioni piuttosto recenti.

Del resto recenti sono certamente la scienza e gli impulsi ad essa dati, e solo da pochi anni l'ingegnere che ha a che fare con grandi opere in ogni settore dell'ingegneria civile e idraulica si è abituato a considerare la dettagliata conoscenza delle caratteristiche dei terreni come un

elemento fondamentale nel gioco dei fattori che regolano la concezione, la programmazione e la realizzazione dell'opera.

Nell'ambito di queste premesse, richiamerò sul tema in discussione alcuni aspetti significativi di applicazioni del passato e accennerò a più recenti sviluppi di tecniche e a prospettive che attualmente si intravedono, nell'intento di sollecitare l'intervento dei presenti.

Considererò dapprima l'argomento delle iniezioni sotto il profilo dei risultati raggiunti nel campo delle costruzioni idrauliche, in particolare come sistema per limitare la permeabilità dei terreni di fondazione delle dighe, che in molti casi si pone come alternativa alla realizzazione di diaframmi murari o plastici, e come mezzo d'opera per lo scavo di gallerie in terreni difficili.

Richiamerò poi alcune applicazioni di metodi di miglioramento delle caratteristiche geotecniche dei terreni, che non hanno avuto finora grande diffusione ma che possono avere campi di applicazione di non trascurabile interesse, come è messo in evidenza da impieghi non numerosi ma certamente di rilievo che negli ultimi anni si sono avuti in Italia e all'estero; intendo riferirmi principalmente ai metodi dell'elettrosmosi e del congelamento.

2. Iniezioni

La tecnica per la realizzazione di schermi di tenuta profondi mediante iniezioni ha ricevuto negli ultimi 15-20 anni un notevole impulso, anche in conseguenza dell'introduzione dei sistemi di iniezione detto dei tubi «à manchettes» che consente una più efficace ed uniforme distribuzione delle miscele nel terreno. In effetti l'impiego delle iniezioni con appropriata tecnologia ha permesso la realizzazione, nel campo delle dighe di materiali sciolti fondate su ban-

* Dott. ing. Vincenzo BEVILACQUA, ENEL, Roma.

chi permeabili di forte potenza, di opere che non moltissimi anni addietro sarebbero state inconcepibili.

La serie di queste realizzazioni, aperta nel 1955 da Serre-Ponçon, ha come esempi di maggior rilievo le dighe di Silverstein in Germania, Mission in Canada e Mattmark in Svizzera e ancora, tra le più recenti, Assouan in Egitto e Durlassboden in Austria.

Caratteristica comune dei terreni di fondazione di queste dighe è la loro elevata permeabilità naturale, con coefficienti di permeabilità k dell'or-

dine di $10^{-1} \div 10^{-2}$ cm/sec, valore che viene ridotto dalle iniezioni a 10^{-4} cm/sec e inferiori.

E' ovvio che qualità di materiali iniettati, profondità e spessori di ciascuno schermo sono strettamente dipendenti dalle particolari caratteristiche locali affrontate: le profondità raggiungono comunque anche i 100÷150 m e gli spessori in testa, grosso modo dell'ordine di 20÷30 m, sono in relazione al carico cui sono sottoposti. I dati caratteristici più significativi di intercettazione delle filtrazioni, sono riportati nella tabella che segue:

	Serre Ponçon (Francia)	Sylvenstein (Germania)	Mission (Canada)	Notre-Dame de-Commiers (Francia)	Mattmark (Svizzera)
Data di realizzazione (anni)	1955 - 1957	1957 - 1958	1958 - 1959	1960 - 1961	1961 - 1962
Carico di ritenuta H (m)	110	40	60	40	110
Spessore terreno attraversato (m)	115	100	150	50	80
Superficie diaframma (m^2)	4.200	5.200	6.200	7.200	20.100
Volume terreno interessato da iniezioni (m^3)	97.000	60.400	95.500	90.000	460.000
Spessore max di diaframma (m)	35	18	15,5	15	35
Spessore medio del diaframma (m)	24	12	15,5	12,5	23
Volume miscela liquida iniettata (m^3)	49.700	40.200	46.200	32.400	214.000
Peso materiali secchi (tonn)	24.800	13.000	19.500	15.800	65.000
Cadente piezometrica minima (sullo spessore max in testa)	3,14	2,22	3,88	2,67	3,14
Cadente piezometrica media (sullo spessore medio)	4,58	3,48	3,88	3,20	4,80
Materiali secchi per m^3 di miscela iniettata (tonn/ m^3)	0,50	0,32	0,42	0,49	0,30
Materiali secchi per m^3 di terreno iniettato (kg/ m^3)	255	215	205	175	145
Materiali secchi per m^2 di diaframma (kg/ m^2)	5.900	2.500	3.150	2.200	3.230
Miscela iniettata per m^2 di diaframma (m^3/m^2)	11,8	7,8	7,5	4,5	10,6
Miscela iniettata per m^3 di terreno trattato (m^3/m^3)	0,51	0,66	0,49	0,36	0,46
Volume di terreno trattato per m^2 di diaframma (m^3/m^2)	23,0	11,5	15,1	12,5	23
Permeabilità media terreno prima iniezione ($k = \text{cm/sec}$)	1×10^{-1}	5×10^{-1}	2×10^{-1}	$8,6 \times 10^{-1}$	2×10^{-2}
Permeabilità media terreno dopo iniezioni ($k = \text{cm/sec}$)	5×10^{-5}	5×10^{-4}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-5}

Applicazioni di questo tipo nel campo delle dighe non hanno incontrato, in Italia, un parallelo sviluppo, salvo alcuni casi particolari, nei quali le iniezioni hanno però avuto per lo più il carattere di interventi integrativi di altri provvedimenti, nella fattispecie diaframmi murari (paratie).

Le paratie non sono, evidentemente, un provvedimento per migliorare le caratteristiche geotecniche del terreno ma un mezzo atto ad ottenere per altra via lo stesso risultato dello schermo iniettato. Il nostro Paese è stato antesignano nell'applicazione nel campo delle dighe delle paratie murarie profonde, eseguite nelle recenti applicazioni per trivellazione in presenza di fanghi di bentonite. Si contano numerose realizzazioni di rilievo di questo sistema di intercettazione delle filtrazioni (S. Valentino, Maria al Lago, Vernago, Zoccolo) che inoltre ha estesissimo impiego nel campo delle arginature fluviali, edifici sotterranei ecc. La preferenza data alle paratie è stata probabilmente incentivata dalla presenza sul mercato nazionale di esecutori altamente specializzati in questa tecnologia, ma certamente hanno avuto deciso peso nella scelta anche le perplessità, invero non del tutto superate anche se si possono provare numerosi risultati positivi, come Serre Poncon, sull'efficacia e sul comportamento a lungo termine degli schermi iniettati.

Personalmente credo che le due soluzioni, schermo con iniezioni e paratia muraria, siano in molti casi entro limiti di profondità di 50÷60 m delle soluzioni alternative pienamente valide tecnicamente e tra di loro competitive per quanto attiene ai costi.

Naturalmente un corretto confronto economico deve tenere conto anche dei diversi oneri che l'una o l'altra soluzione comportano per le opere particolari di collegamento con il sistema di tenuta del rilevato, i tempi di esecuzione ecc.

In molti casi il problema della scelta tra le due soluzioni deve essere, peraltro orientato da valutazioni circa l'efficienza, anche a lungo termine, del dispositivo di tenuta in dipendenza delle particolari situazioni in considerazione. La paratia è una struttura rigida e si può quindi pensare alla eventualità di sue rotture locali in presenza di forti dislocazioni differenziate dei terreni in cui essa è inserita; lo schermo di iniezioni è, invece, un tipo di struttura capace di meglio adattarsi agli assestamenti anche fortemente differenziati; ma suscettibile — a differenza della paratia — di continuo impoverimento della sua struttura per migrazione dei

fini sotto forti gradienti. Peraltro vi è a favore dello schermo iniettato la facoltà di intervenire con riprese di trattamenti in fase di esercizio dell'opera, e spesso in realtà si ha notizia dalla letteratura tecnica di tali interventi. Sono questi, a mio avviso, fattori fondamentali dai quali dipende la scelta tra i due sistemi, quando essi per altri aspetti siano comparabili.

Nel campo dello scavo delle gallerie in formazioni incoerenti o anche in formazioni lapidee minutamente fratturate da potersi ricondurre alle precedenti in presenza di acqua in forte pressione e quantità, o meno, le iniezioni si sono dimostrate un mezzo d'opera di grande efficacia, il cui impiego è ormai generalizzato nella moderna tecnologia di scavo, anche se di volta in volta richiede, nelle situazioni più «difficili», una laboriosa messa a punto di formule, di miscele e di metodi di iniezione.

Trattasi però in questi casi di condizioni nelle quali l'avanzamento sarebbe con ogni altro sistema molto più difficile, aleatorio e costoso se non praticamente impossibile. Esempi di rilievo sono noti dalla letteratura e anche per memorie presentate a questo Convegno, ed io fornirò alcuni elementi concernenti una galleria per scopo idroelettrico in corso di scavo nel massiccio del Pollino, in Basilicata.

In questa galleria che è di valico ed ha lunghezza di oltre 7 km con sezione di circa 17 m², sono state incontrate, nella tratta centrale di quasi tre chilometri, estreme difficoltà per la diffusissima fratturazione della formazione rocciosa (dolomia) e per la presenza di acqua in gran quantità (500 l/sec) e ad elevata pressione (fino a 17 kg/cm²).

Sono state progettate e sperimentate diverse tecniche di avanzamento, ma l'unica suscettibile di concreti risultati si è dimostrata il preventivo trattamento con iniezioni di miscele chimiche e cementizie, che hanno peraltro richiesto un eccezionale impegno per la selezione delle composizioni delle miscele, dei metodi di perforazione ed iniezione delle attrezzature, dell'organizzazione delle lavorazioni e di tutto il cantiere.

La tecnica esecutiva che all'atto pratico ha consentito i migliori risultati è stata quella di trattare dal fronte della galleria tratte dell'ordine di 50 m, di far seguire lo scavo con mezzi usuali e l'immediata posa di mezzi di sostegno dello scavo stesso (centine metalliche e calcestruzzo spruzzato).

Ciascun ciclo ha inizio con la formazione sul fronte di scavo di un rivestimento in gunite

dello spessore di circa 10 cm nel quale vengono intestati 20 fori profondi m 3,50 disposti su due superfici coniche coassiali di cui quella interna di 4 fori ha inclinazione 1/50 sull'asse galleria, e quella esterna (16 fori) ha inclinazione 1/22,5. Per l'esecuzione dei fori si adottano perforatrici a rotazione \varnothing 85 mm. Vengono inoltre perforati per 6,50 m, impostandosi 5 m alle spalle del fronte, n. 8 fori da 100 mm destinati ad essere ripresi in seguito per drenaggi di alleggerimento della pressione d'acqua.

Tutti i 28 fori vengono incamiciati con tubi metallici che vengono intasati contro la roccia circostante a mezzo di iniezione di miscela cementizie e quindi provati con acqua a forte pressione (100 kg/cm²).

Si dà quindi corso alla perforazione sempre a rotazione con estrazione del nucleo dei 20 fori da iniezione fino alla profondità di 20÷25 m.

I fori, di norma non rivestiti per la tratta oltre i 3,50 m, vengono iniettati fino a rifiuto con pressione di 80 ÷ 100 kg/cm², usando una miscela di silicato monosodico con cloruro di calcio, formamide e acido acetico.

Alla iniezione di silicato segue quella con miscela di boiaccia 1/1 di cemento forzata fino a 100 kg/cm².

Il ciclo perforazione — iniezione con silicato — iniezione di cemento viene successivamente eseguito per le tratte 20 ÷ 35 m e 35 ÷ 50 m con diametri di perforazione decrescenti.

Il consumo di miscela di silicati mediamente è dell'ordine di 1 m³ al m di galleria (ca 50 m³ per trattamento completo).

Durante le pause per il consolidamento delle miscele viene effettuato il progressivo approfondimento dei fori esterni di drenaggio, che vengono mantenuti sempre arretrati rispetto alle tratte in corso di iniezione. Al termine delle iniezioni i dreni vengono prolungati qualche metro oltre la testa dei fori di iniezione.

Completato il ciclo del trattamento e della costituzione dei dreni si dà inizio allo scavo con l'impiego di circa 40 fori da mina, sulla sezione e consumo di circa 2 kg di esplosivo per mc di roccia.

Lo scavo viene arrestato a ca 5 m dal termine della zona iniettata, in modo da mantenere nel fronte un tampone di materiale trattato di congruo spessore sia per la stabilità che per la intestatura dei fori del successivo ciclo.

Il miglioramento delle caratteristiche dei terreni per l'esecuzione di scavi di gallerie, è sufficiente, nella normalità dei casi, si conservi per il tempo necessario alle operazioni di scavo e

alla messa in opera dei mezzi di sostegno delle pareti provvisorie o definitive; tempi decisamente brevi oggi con la generale adozione di calcestruzzi spruzzati a rapida esecuzione e presa subito a tergo dell'avanzamento, con la immediata messa in opera, in lavori altamente meccanizzati, di rivestimenti prefabbricati in grado di sviluppare prontamente l'azione di sostegno.

3. Elettrosmosi

Il metodo dell'elettrosmosi per il consolidamento dei terreni limoso-argillosi, pur non avendo frequenti applicazioni, ha dato risultati che merita rammentare.

La prima applicazione in Italia — ed in essa mi sono trovato direttamente interessato — risale al 1950 ed aveva lo scopo sperimentale di consolidare una pendice di terreno (limo-argillosi) in movimento, sottostante l'imbocco di una galleria idraulica nella valle del Sarca di Campiglio.

Le notizie sul metodo all'epoca erano assai scarse in quanto si aveva conoscenza soprattutto di alcuni studi ed esperimenti del Prof. CASAGRANDE e perciò nel laboratorio di cantiere vennero condotte dapprima prove orientative per passare quindi, dopo il buon esito di esse, alla applicazione in posto. La estensione della superficie trattata era modesta, pari a circa 800 m².

Ad un primo trattamento superficiale con iniezione di elettrodi in tubo di alluminio (sia catodi che anodi, profondi 2,50 m), venne fatto seguire un trattamento in profondità, disponendo un catodo unico alla base di un pozzo di circa 25 m di profondità esistente per altre ragioni.

Si applicarono tensioni dell'ordine di 300 V (le distanze tra anodi e catodo raggiungevano i 30 m ÷ 40 m) con cadute di tensione di circa 10 volt/m e con un consumo di circa 10.000 kWh, cioè circa 12 kWh per m² di superficie trattata, e circa 4 kWh/m³ considerando interessata una profondità media di terreno di circa 3 m.

Prove di carico in posto sul terreno trattato mostrarono un comportamento nettamente migliore di quelle effettuate su terreno naturale e su terreno solamente drenato per gravità.

Numerose rilevazioni effettuate sulla riduzione del contenuto di acqua dopo varie durate di trattamento, e sulla velocità di decantazione delle sospensioni di terreno in acqua, mostrarono chiaramente l'esistenza di correlazione tra quan-

tà di energia, modifiche del contenuto d'acqua, stato di agglomerazione delle particelle di terreno.

Non mi risulta che per molti anni in Italia si siano avute applicazioni, ed anche all'estero non sono stati resi noti sviluppi di rilievo, fino a tempi recenti in cui si sono realizzati interessanti impieghi.

Ritengo che a tale sistema si debbano riconoscere notevoli prospettive attuali e future.

La meccanica del consolidamento elettrolitico si può riportare ad uno schema facilmente intuitivo.

Se si crea una differenza di potenziale tra due punti di un terreno che contenga acqua (soluzione elettrolitica) si provoca la migrazione dell'acqua verso il polo negativo.

Il moto è rappresentato in prima approssimazione da una legge del tipo di quella di Darcy per i moti di filtrazione:

$$q = K_e E A$$

dove:

q è la portata

E è la differenza di potenziale

A la sezione

Se si esprime la portata q in cm³/sec, il gradiente di potenziale E in volt/cm ed A in cm², il coefficiente K_e ha le dimensioni cm²/volt sec.

In realtà K_e non è una costante per ogni tipo di terreno, ma è anche dipendente dalla durata di applicazione della differenza di potenziale in ragione delle mutazioni delle caratteristiche indotte nel materiale.

Casagrande ha indicato peraltro che questo valore K_e è dell'ordine di 5×10^{-5} cm²/volt sec, ed invero l'ordine si mantiene invariato in un vasto campo di caratteristiche di terreni suscettibili di essere trattati col procedimento elettrosmotico.

La espressione sopra indicata della portata elettrosmotica permette di calcolare la portata di acqua sottratta sotto un dato valore del gradiente di potenziale elettrico. Problema sostanziale, specie ai fini di previsione di spesa, è il predeterminare la intensità della corrente elettrica che si stabilisce con la differenza di potenziale e che può variare in ordini di grandezza molto estesi, in dipendenza di fattori quali contenuto d'acqua, capacità di scambio e contenuto di elettroliti nel terreno.

Il fenomeno elettrosmotico è spiegato come segue.

Una micella di materiale argilloso è dotata di

attività elettrica superficiale, dovuta agli strati di cariche negative che sono disposte sulle facce del pacchetto. Le molecole d'acqua presenti si dispongono perciò in prossimità delle facce del pacchetto con le terminazioni positive (H⁺) verso la superficie del pacchetto, orientandosi quindi tutte nello stesso modo, per un primo strato e gradualmente perdendo l'iso orientamento con la distanza. Gli strati di acqua rimangono perciò legati con forze coulombiane al solido (acqua di assorbimento). Oltre alle molecole d'acqua si fissano elettricamente alla superficie i cationi presenti, che legano altra acqua, in misura più o meno elevata a seconda delle loro caratteristiche.

Si genera così un campo elettrico, in cui le cariche negative sono distribuite su di un piano (la superficie basale della micella) e le cariche positive sono diffuse nello spazio antistante.

Se si introduce una differenza di potenziale nel terreno, le cariche elettriche positive trasmano verso il catodo e inducono per attrito il moto all'acqua circostante, elettricamente neutra.

Si sviluppano contemporaneamente al moto dell'acqua un complesso di fenomeni elettrochimici, tra loro interdipendenti, alcuni dei quali irreversibili. Tra di essi è sostanziale il cosiddetto scambio di basi, cioè per quello che interessa più comunemente le applicazioni, la sostituzione di cationi ferro e alluminio, ai cationi sodio e potassio.

I cationi ferro e alluminio, ed altri più complessi, fissandosi alle micelle danno luogo a reazioni con formazione di composti che modificano in maniera irreversibile le caratteristiche delle micelle e del loro stato di agglomerazione.

Le caratteristiche geotecniche del terreno subiscono modificazioni che variano a seconda della natura dei terreni, il grado di attività, la durata del trattamento, ed altri fattori. Si ottiene riduzione di umidità (maggiore nei terreni inattivi), con conseguente miglioramento delle caratteristiche meccaniche in genere dell'ordine di qualche per cento, ed una forte riduzione dell'indice di plasticità.

Per portare un esempio di applicazione recente nel campo delle costruzioni idrauliche cito l'intervento elettrosmotico per stabilizzare le argille di fondazione della West Branch Dam del Mahoning River nell'Ohio, U.S.A.

Si tratta di un rilevato in terra della lunghezza di circa 3.000 m, e dell'altezza di 25 m che si estende per il tratto centrale di circa 700 m.

Quando la costruzione era arrivata pressochè alla cresta, si manifestarono nella parte centrale dei rapidi movimenti di assestamento e scorrimento che richiesero per il loro arresto la rimozione immediata di 4÷5 m di rilevato.

I terreni di fondazione erano costituiti per un primo tratto da 7 ÷ 8 m di sabbie limose alluvionali, quindi per 15 m di argilla limosa assai soffice seguita da limi più densi e sabbie limose per alcuni metri, soprastanti ad argille molto compatte fino a profondità non precisata.

I limiti di liquidità dello strato-argilloso limoso, sotto le sabbie limose, variavano tra 26 e 50% con prevalenza di valori intorno al 40%.

Gli indici di plasticità corrispondenti assumevano valori compresi fra il 9 ed il 28%; il contenuto naturale d'acqua — compreso fra il 21 ed il 40% — era di norma alquanto inferiore al limite di liquidità.

Il drenaggio elettrosmotico delle argille sottostanti la fondazione fu deciso al fine di accelerare la riduzione delle pressioni interstiziali ed ebbe una durata di circa 6 mesi. Interessò un tratto centrale di circa 300 m; sia gli anodi che i catodi erano costituiti da rotaie di acciaio.

La tensione applicata tra gli elettrodi di opposta polarità variò tra 150 e 90 volt.

La potenza installata era di oltre 2.500 kW e la intensità massima erogata di circa 11.000 A a 150 V.

I risultati furono giudicati assai soddisfacenti e la costruzione poté essere rapidamente completata. Il comportamento dell'opera è perfettamente normale.

Un altro esempio recente è la stabilizzazione di uno strato di argille al limite di liquidità, per scavare attraverso di esse la fondazione, contenuta tra due argini, di un tronco di muro di banchina del porto di Anversa.

In Italia si hanno alcune applicazioni in campo autostradale negli ultimi anni (autostrada dei Fiori, Bologna-Canosa, Salerno-Reggio Calabria).

I risultati a quanto mi è stato riferito sono buoni, il sistema è rapido.

Il costo non è basso certamente, ma neppure è di ordine proibitivo; può essere stimato intorno alle 1.000, 1.500, 2.000 L/m³ trattato, in ragione del consumo di energia (che peraltro ha incidenza modesta; consumo da 3 a 10 kWh/m³) di elettrodi e di elettroliti aggiunti.

Un cenno ad una particolare applicazione del metodo elettrosmotico: la trasmigrazione elettrosmotica è stata impiegata come veicolo per

iniettare soluzioni stabilizzatrici in terreni a basso coefficiente di permeabilità e per ridurre le pressioni di iniezione, dove non fosse consentito agire con pressioni molto elevate.

Mi pare di poter concludere che il consolidamento per elettrosmosi rivesta grande interesse ed abbia notevoli prospettive di sviluppo; una più ampia diffusione dei risultati delle applicazioni finora eseguite, potrebbe risultare assai utile.

4. Congelamento del terreno

La stabilizzazione del terreno mediante congelamento è da considerarsi un mezzo d'opera per casi del tutto particolari. Il metodo è certamente assai costoso specie quando i movimenti d'acqua di falda siano rilevanti e pone anche dei problemi per l'esecuzione degli scavi e per l'esecuzione delle strutture definitive quando esse siano in calcestruzzo. In condizioni proibitive ha dato, peraltro, dei risultati soddisfacenti.

Ricordo che nel 1949 adoperammo questo metodo per l'attraversamento in galleria di una profonda gola interrata con materiale ghiaioso e limoso saturato di acqua e nel quale esistevano anche percolazioni di una certa entità.

La soluzione consisteva nel costituire in posto, tra le due opposte sponde rocciose, un cilindro a forte spessore di terreno congelato resistente ai carichi esterni. Entro di esso, una volta effettuato lo scavo del materiale interno, si sarebbe poi gettato un tubo-ponte in calcestruzzo armato. La resistenza del materiale congelato, almeno di quel tipo, è notevolmente elevata; ciò risultò da prove estesamente condotte presso il Politecnico di Milano.

I provini a -5°C avevano resistenza alla compressione non confinata da 50 a 100 kg/cm² e quelli congelati a -20°C arrivavano a resistenze di 150 kg/cm².

Molto elevato, in particolare, è risultato il valore del carico di rottura a flessione.

Per il congelamento del terreno fu impiegata una potenza frigorigena a 300.000 Cal/ora, con circuito primario ad espansione di ammoniacca e circuito di circolazione nel terreno a salamoia. Le temperature della salamoia potevano variare da -28 a -10°C .

Tale elasticità è stata impiegata per forzare il processo di congelamento iniziale concentrando in limitate sezioni del circuito la intera potenza e per compensare, poi, in un secondo tem-

po, le sole perdite termiche.

Il sistema era stato precedentemente usato in ampia scala per lo scavo di alcuni tronchi della metropolitana di Mosca, per lo scavo di un tunnel sotto la Schelda ad Anversa e, in Italia, per portare alla luce l'Ara Pacis di Augusto a Roma.

Ai tempi attuali il metodo del congelamento è usato abbastanza correntemente nello scavo di pozzi per miniere in terreni acquiferi che non possono essere iniettati con successo.

Non vedo, oggi, particolari prospettive a questo mezzo d'opera specie nei nostri climi: da un lato per il suo alto costo, dall'altro perchè lo sviluppo di altri sistemi consente di raggiungere più economicamente e rapidamente comparabili risultati.

In argomento di trattamenti termici del terreno, può essere interessante notare che si va sviluppando una tecnica di consolidamento del terreno attraverso il riscaldamento ad elevata temperatura.

Tale metodo sta trovando impiego nell'URSS e nell'Europa Orientale. E' utilizzato per stabilizzare banchi di terre argillose o loess in vista della costruzione di immobili e consiste nel bruciare gas liquidi o altri combustibili gassosi immessi a pressione entro fori di diametro 15 ÷ 20 cm approfonditi per circa 20 metri nel terreno. Si ottengono così, dopo trattamenti di 8 ÷ 10 giorni, delle zone cilindriche di terreno di diametro 1,5 ÷ 2,5 m ben consolidate; infatti l'effetto dell'alta temperatura provoca un notevole incremento permanente nelle caratteristiche meccaniche del terreno ed una riduzione della sensibilità all'acqua. Secondo diversi applicatori del metodo, esso sarebbe addirittura più economico, in determinate condizioni, della creazione di una palificata.

5. Terre miscelate

L'impiego delle terre miscelate con leganti idraulici è una pratica che va trovando applicazione sempre crescente, specie nel campo delle costruzioni stradali.

Il fine che si persegue è generalmente quello del miglioramento delle caratteristiche meccaniche di terre che allo stato naturale hanno poco pregio, sia che ciò occorra per accrescerne la portanza come piani di appoggio e sia per estenderne il campo di lavorabilità come terre d'apporto.

La stabilizzazione viene di solito effettuata in sito, mentre con le tecniche di miscelazione

delle ghiaie con cemento in appositi impianti centralizzati si sconfinava piuttosto nel campo delle cosiddette miste cementate, veri e propri calcestruzzi magri.

L'uso di questi ultimi è stato generalizzato nella attuale sezione tipo adottata nelle Autostrade del Gruppo IRI, che ne hanno introdotto uno spessore di 20 cm tra lo strato di misto granulare e gli strati bitumati.

Tornando alle tecniche di stabilizzazione l'aggiunta di cemento in ragione del 3 ÷ 4% in peso della terra viene di solito applicata a terre aventi grana da sabbie limose fino a ghiaie.

Il meccanismo di azione del cemento è legato ai ben noti fenomeni di presa ed indurimento.

Più complesso si presenta invece il meccanismo di azione della calce che, in forma di CaO o di Ca(OH)₂, viene aggiunta alle terre argillose in ragione del 3 ÷ 6% in peso, sempre con il fine di migliorarne la portanza e creare la possibilità di operare con tali terre anche in condizioni di elevata umidità.

L'effetto macroscopico dell'aggiunta di calce è un rapido cambiamento delle proprietà fisiche delle terre, che da plastica diviene friabile e compattata assume l'aspetto di una roccia tenera.

Uno degli effetti dell'aggiunta della calce è l'aggiunta di ioni OH⁻ e Ca⁺⁺ che sviluppano forze elettriche sufficienti a formare dei « ponti » tra le particelle argillose, che vengono così a riunirsi per un'azione simile a quella della « flocculazione ».

Sotto il profilo delle caratteristiche geotecniche l'aggiunta della calce abbassa il contenuto dell'acqua libera ed aumenta considerevolmente il valore dei limiti di liquidità e di plasticità, con riduzione globale dell'indice plastico I P.

La resistenza alla compressione uniassiale a dilatazione trasversale libera aumenta notevolmente sia a breve sia a lungo termine.

Le esperienze compiute dimostrano che occorre stabilire, in base a prove, entro quali limiti del contenuto d'acqua occorre operare e quale sia la percentuale ottima di calce da aggiungere in quanto l'effetto migliorante può variare sensibilmente da terra a terra.

Mi pare di poter concludere che negli ultimi decenni vi è stato un grande sviluppo nelle conoscenze geotecniche e nelle metodologie per cui sono oggi possibili sostanziali miglioramenti delle caratteristiche del terreno e sono concepibili realizzazioni di strutture e di opere su tali terreni del tutto inconcepibili una volta. Oltre ai metodi più diffusi dei quali è stato fatto, dai

relatori che mi hanno preceduto, una ampia disamina ed una approfondita messa a punto sotto il profilo scientifico e tecnico, vi sono tecniche di recente sviluppo che già hanno avuto appli-

cazioni di non trascurabile rilievo, che possono risolvere vantaggiosamente situazioni di particolare impegno, non superabili facilmente con i sistemi sinora più affermati.

SUMMARY

Improvement of soil properties: some case histories.

The paper represents a contribution to 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.