

IL CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO MEDIANTE JET-GROUTING

Prof. Pietro Lunardi
Università di Parma

INTRODUCTION

The transformation of cohesionless sand into sandstone, which in nature occurs in very long periods of time, during diagenesis, under very strong pressures referable to lithostatic loads or tectonic forces, can now be produced by artificial means on-site: in particular with the «jet-grouting» technique.

Jet-grouting owes its origins to the experiences acquired some decades ago in the oil drilling industry when unblocking rod string locked at great depths.

Applied for the first time in the civil engineering field by Cementation Co. in Pakistan, about in 1950, and subsequently taken by the Japanese, it was introduced into Italy about ten years ago and systematically used in various civil engineering works with increasing success, thanks to the development of adequate equipment (pumps, automatic drilling rigs, etc.) and suitable design plans.

Jet-grouting, therefore, is still a fairly young technology and is still susceptible to evolution. Here, after having shown the current state of the art, we shall show:

- suitability to different types of ground;
- design criteria;
- recent technological developments;
- jet-grouting technique in civil and environmental engineering works;
- some case histories.

PREMESSA

La trasformazione di sabbia in arenaria, che in natura avviene con lenti processi diagenetici a fronte di fortissime pressioni riconducibili ai carichi litostatici o alle spinte tettoniche, oggi può essere prodotta nei terreni in posto con mezzi artificiali: in particolare con la tecnica di consolidamen-

to «jet-grouting».

Essa trae le proprie origini dalle esperienze fatte qualche decina di anni fa in campo petrolifero per lo sbloccaggio delle batterie d'aste in perforazioni a grandi profondità.

Applicata per la prima volta in campo civile dalla Soc. Cementation in Pakistan nel 1950 circa e successivamente ripresa dai giapponesi, è stata introdotta in Italia da circa dieci anni ed impiegata sistematicamente in varie opere di ingegneria civile con crescente successo, grazie alla messa a punto di adeguate attrezzature (pompe, sonde automatiche, ecc.) e di appropriati schemi progettuali.

Il jet-grouting, quindi, è una tecnologia piuttosto giovane ed ancora suscettibile di evoluzioni.

In questa sede, dopo averne illustrato lo stato dell'arte, si discuteranno:

- le possibilità di applicazione nei diversi tipi di terreno;
- i criteri di progettazione e

dimensionamento;

- i controlli in corso d'opera;
- le innovazioni più recenti;
- le possibilità di applicazione del sistema nelle opere d'ingegneria civile ed ambientale;
- alcune applicazioni realizzate.

TECNICA DEL JET-GROUTING

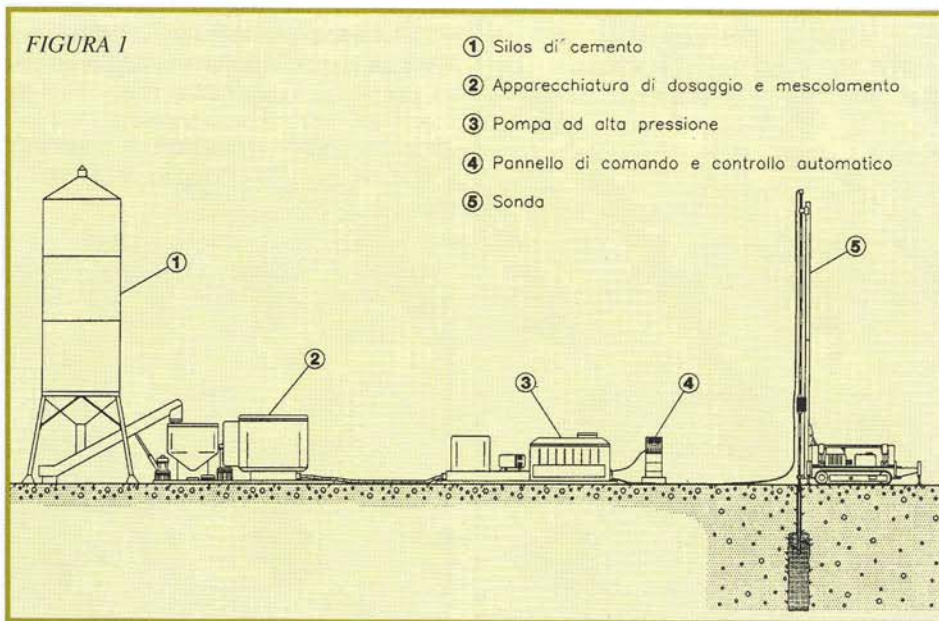
Metodologie operative ed attrezzature

La tecnologia «jet-grouting» consiste nell'iniettare, attraverso perforazioni di piccolo diametro (da 7 a 10 cm) volumi controllati di miscela cementizia in volumi controllati di terreno.

Il trattamento può essere eseguito con tre diverse metodologie, le prime due perfezionate in Italia, la terza di origine giapponese:

- 1) iniezione di sola miscela (sistema monofluido);

FIGURA 1



- 2) iniezione di aria e miscela (sistema bifluido);
- 3) iniezione di aria, acqua e miscela (sistema trifluido).

Nel jet-grouting monofluido la disgregazione del terreno avviene attraverso l'azione della miscela cementizia che ha anche la funzione di stabilizzazione.

Nel jet-grouting bifluido l'azione disgregante è affidata ancora al getto di miscela ad altissima pressione, ma questo è guidato da un anulo d'aria compressa a circa 8 - 12 bar che ne limita la dispersione aumentandone, di conseguenza, il potere penetrante.

Nel jet-grouting trifluido la stessa è invece demandata all'azione di un getto d'acqua (a circa 400 bar) a guida d'aria (a circa 5 bar) che realizza un processo di rottura e scavamento del terreno completamente indipendente da quello d'iniezione.

Il getto successivo di miscela, che avviene con pressioni dell'ordine di 50 bar, sostituisce il terreno scavato con la miscela stabilizzante.

Le oggettive condizioni di operatività dei cantieri, in termini di spazi disponibili, fasi di lavoro e soprattutto tipo di terreno da trattare, determinano di volta in volta il metodo più appropriato di perforazione ed iniezione.

La Figura 1 mostra schematicamente le attrezzature necessarie per la realizzazione di un trattamento jet-grouting:

- silos di cemento (1);
- apparecchiatura di dosaggio e mescola-

mento (2);

- pompa ad alta pressione da 400 a 500 CV di potenza (3);
- pannello di comando e controllo automatico (4);
- sonda per l'esecuzione del trattamento (5).

La sonda (Figura 2) è dotata di una batteria d'aste cave (1) con giunti di tenuta ad alta pressione; essa è connessa inferiormente alla valvola d'iniezione ed all'attrezzo di perforazione, di solito un tricono.

Nel sistema monofluido, l'asta superiore è connessa, attraverso la testa di adduzione ed un tubo flessibile (2) alla pompa pneumatica ad alta pressione.

Aste da 60, 76 e 90 mm di diametro esterno sono misure standard.

L'attrezzatura adoperata per eseguire il jet-grouting con i sistemi bi-fluido e trifluido è munita di una testa di adduzione che assicuri il flusso separato di miscela/aria e di miscela/aria/acqua, spinti ciascuno dal proprio apparato di pompe e compressori.

Le aste usate per il jet-grouting bi-fluido (da 76 a 90 mm di diametro esterno) hanno due vie coassiali che permettono il flusso separato di aria e miscela.

Il sistema tri-fluido richiede invece aste (da 76 a 90 mm di diametro esterno) a tre vie per permettere all'aria, all'acqua ed alla miscela di fluire separatamente.

Al di sopra della testa di perforazione si trova la speciale valvola d'iniezione ad alta pressione, costituita da un cilindro d'acciaio, di circa 40 cm di lunghezza, dello stesso diametro delle aste, sulla cui parete laterale sono praticati uno o più fori per l'alloggiamento degli ugelli; all'interno, è munita, alla base, di una strozzatura centrale di circa 2 cm di diametro, situata al di sotto dei fori per gli ugelli.

Durante la perforazione il fluido di perforazione, passando attraverso la strozzatura, raggiunge lo scalpello.

Per disporre la valvola all'assetto att'o all'iniezione ad alta pressione è sufficiente lasciar cadere all'interno delle aste una sfera d'acciaio di dimensioni leggermente superiori a quelle della strozzatura della valvola.

La sfera, impedendo l'uscita della miscela dal fondo, attraverso la strozzatura, fa sì che vengano alimentati gli ugelli laterali.

Nei sistemi bifluido e trifluido la valvola d'iniezione è equipaggiata con più vie per alimentare gli ugelli con i diversi fluidi.

Si impiegano, normalmente, da uno a quattro ugelli, con diametri che vanno da 1,5 a 3,0 mm, generalmente sfalsati 1,0÷2,0 cm l'un l'altro. Recentemente sono stati usati ugelli di diametro maggiore, che ovviamente richiedono pompe ad alta portata.

Il foro si esegue usualmente a rotazione o a rotopercolazione.

L'avanzamento a rotazione è preferibile nei terreni a granulometria media-fine, in quanto richiede sonde leggere.

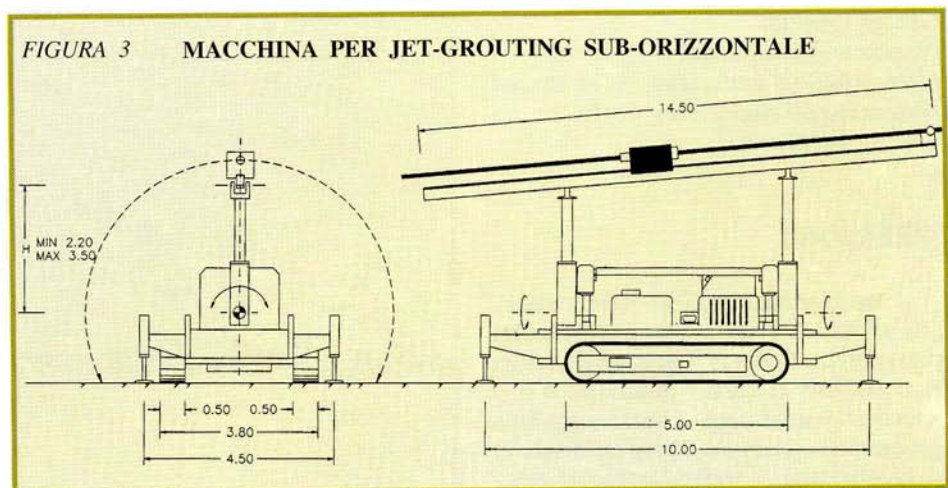
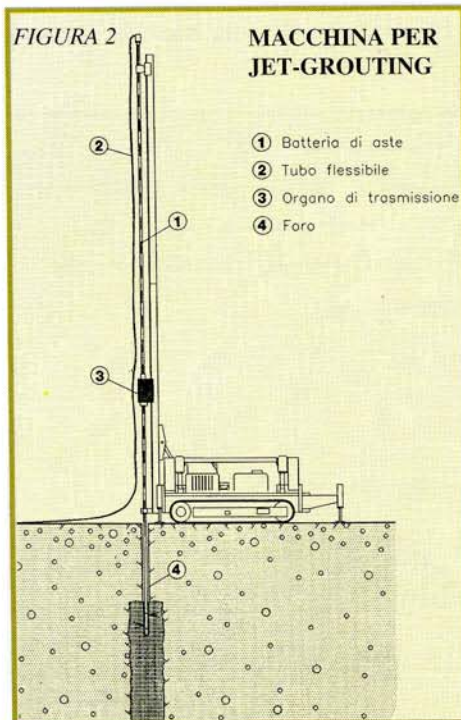
In terreni incoerenti grossolani, e/o in presenza di blocchi lapidei, la rotopercolazione può essere più conveniente in termini di produzione, ma richiede attrezzature più ingombranti se si vogliono minimizzare i tempi di manovra.

La perforazione del terreno viene generalmente eseguita con la stessa sonda usata per l'iniezione ad alta pressione.

Un'organo di trasmissione (3) trasmette la rotazione alle aste durante la fase di perforazione e la successiva fase di estrazione.

Per eseguire l'iniezione, all'inizio della fase di estrazione viene azionata la pompa e la miscela viene spinta ad altissima pressione (45 ÷ 60 MPa), tramite il tubo flessibile (2), nelle aste (1) e quindi eiettata radialmente nel terreno, attraverso gli ugelli.

Mentre la batteria di aste viene gradualmente estratta, il fluido può essere proiettato nel terreno con altissima energia (esso infatti investe il terreno con un getto avente



velocità di oltre 800 Km/h).

Nel corso degli anni, le varie imprese specializzate hanno messo a punto numerose macchine perforatrici con caratteristiche di potenza, flessibilità ed affidabilità crescenti, con l'obiettivo di ottenere attrezzature più versatili, di minimizzare i tempi di esecuzione dei consolidamenti e di migliorare la geometria e le caratteristiche finali del terreno trattato.

In particolare sono state messe a punto sonde, a rotazione od a rotopercolazione, in grado di operare in spazi ristretti e di eseguire anche trattamenti con posizione sub-orizzontale delle aste, come richiesto in molti lavori di consolidamento, specie in sotterraneo.

La Figura 3 mostra lo schema della prima attrezzatura realizzata in Italia dalla Rodio Spa appositamente per perforazioni sub-orizzontali a rotopercolazione.

Un complesso di martinetti idraulici consente di ruotare il mast di 180 gradi con inclinazioni regolabili fino a 14 gradi (25%) rispetto all'orizzontale.

Con una macchina di questo tipo fu realizzato il primo trattamento jet-grouting in orizzontale, progettato dalla Rocksoil Spa di Milano, nella galleria «Campiolo» sulla linea ferroviaria Udine-Tarvisio delle Ferrovie dello Stato Italiano.

Principi di funzionamento

Le operazioni necessarie per l'esecuzione del jet-grouting monofluido e bifluido, che sono i sistemi più largamente usati, si articolano principalmente in due fasi (Figura 4).

Prima fase: fase di andata o perforazione, in cui si inserisce nel terreno la batteria d'aste, munita della valvola porta ugelli, fino alla profondità di trattamento richiesta dal progetto.

E' una fase delicata per la buona riuscita del trattamento che potrebbe essere pregiudicato da deviazioni indesiderate delle aste.

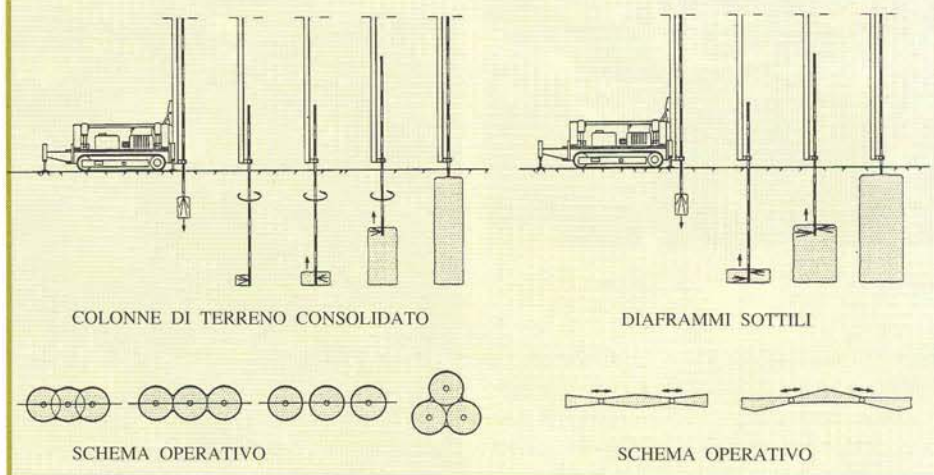
Seconda fase: fase di ritorno o di estrazione. La batteria d'aste viene estratta a velocità di risalita ed angolare programmate mentre si effettua l'iniezione della miscela attraverso gli ugelli.

Operando sui parametri pressione, velocità di risalita e di rotazione della batteria di aste, nonché numero e sezione degli ugelli, è possibile ottenere volumi di terreno consolidato della forma e delle dimensioni volute.

A seguito del trattamento, le caratteristiche meccaniche del terreno interessato risultano incrementate fino a raggiungere valori di permeabilità e resistenza confrontabili con quelli di un calcestruzzo.

FIGURA 4

SCHEMI OPERATIVI



Parametri operativi

I principali parametri operativi sono:

- pressione d'iniezione;
- numero e diametro degli ugelli;
- rapporto acqua/cemento della boiaccia d'iniezione;
- tempo d'insistenza del getto.

La pressione d'iniezione viene controllata con manometri.

Da essa dipende l'energia del getto e quindi il suo raggio d'azione.

Il limite di pressione raggiungibile è essenzialmente legato alle possibilità delle pompe impiegate ed alla tenuta della linea.

Generalmente vengono utilizzate pressioni d'esercizio pari a 40 - 60 Mpa.

Il numero ed il diametro degli ugelli determinano, con la pressione, la portata d'iniezione, cioè il volume di miscela immessa nel terreno nell'unità di tempo e, di conseguenza, la velocità di trattamento.

Naturalmente portate elevate esigono anche pompe di grande potenza per ottenere le pressioni richieste.

L'incremento della sezione degli ugelli favorisce lo sfruttamento delle potenze im-

piegate, mentre l'utilizzo di un maggior numero di ugelli, a parità di portata totale, diminuisce il rendimento, in quanto comporta maggiori perdite concentrate di carico.

Ne consegue che, non disponendo di macchine d'iniezione di elevata potenza, conviene limitare il numero degli ugelli.

Il rapporto acqua/cemento della boiaccia d'iniezione è il parametro che principalmente influenza le proprietà meccaniche della colonna e le caratteristiche iniziali della massa terreno-boiaccia.

Un basso rapporto acqua/cemento e quindi un elevato peso specifico della miscela assume estrema importanza in presenza di moti di filtrazione, che potrebbero dilavare il trattamento appena eseguito.

Prove in laboratorio ed in situ mostrano che il valore della resistenza alla compressione semplice è in stretta relazione con il rapporto acqua/cemento.

Il tempo d'insistenza del getto dipende dalla velocità di estrazione della batteria d'aste e dalla velocità di rotazione della stessa.

La velocità d'estrazione, con passo soli-

TABELLA 1 • PARAMETRI OPERATIVI - Valori tipici

SISTEMA	FLUIDO	PRESSIONE (bar)	UGELLI Nr. e Diametro	VEL. D'ESTRAZ. Ve (cm/min.)	VEL. DI ROTAZ.	RAPPORTO C/A	PORTATA (l/min)
Monofluido	Boiaccia	400-550	1-2 x 2-5	15-100	5-15	1.0-1.5	70-600
Bifluido	Boiaccia	400-550	1-2 x 2-5	10-30	4-8	1.0-1.5	70-600
	Aria	10-12	=	10-30	=	=	4000-10.000
Trifluido	Boiaccia	50-100	1-2 x 4-5	6-15	4-8	1.2-1.5	80-200
	Aria	10-12	=	6-15	=	=	4000-10.000
	Acqua	400-500	1-2 x 2-3	6-15	=	=	40-100



(sopra) FOTO 1

(a lato) FOTO 2

tamente pari a 4 cm, è regolata da un temporizzatore, posto sulla sonda, che fissa il tempo di sosta degli ugelli ad una determinata profondità, quindi il tempo di insistenza del getto ad un determinato livello.

Essa incide sul diametro del trattamento e sulle sue caratteristiche meccaniche, oltretutto, naturalmente, sul tempo d'esecuzione. Esiste un valore limite al di sotto del quale, in relazione al tipo di terreno da trattare ed ai valori di portata e pressione utilizzati, non conviene operare.

Si verifica infatti che, se la velocità d'estrazione è eccessivamente ridotta, il getto, non avendo energia sufficiente per creare ulteriore diametro, fuoriesce attraverso l'intercapedine aste-foro.

La velocità di rotazione delle aste deve essere regolata in funzione della velocità di estrazione in modo da ottimizzare la capacità perforante del getto.

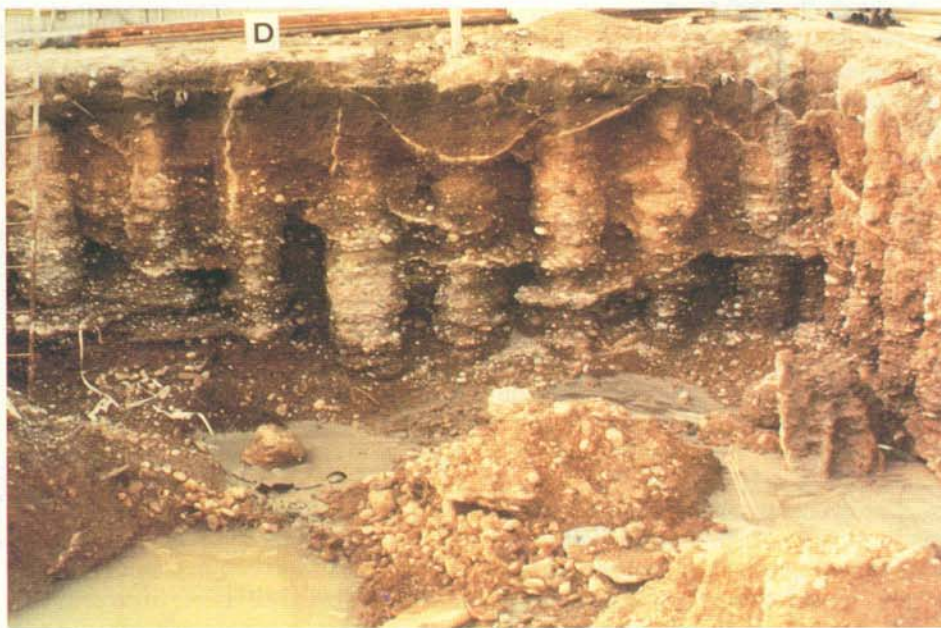
Esiste un limite inferiore per la velocità di rotazione, al di sotto del quale si hanno effetti di riflessione del getto che ne diminuiscono l'efficienza, a meno che non vengano adottati particolari accorgimenti che sono oggetto di recenti ricerche (vedi paragrafo «Innovazioni»).

In *Tabella 1* sono riportati i campi di variabilità dei principali parametri operativi generalmente adottati in funzione del sistema di trattamento impiegato.

Prodotto del consolidamento

Attualmente, utilizzando il sistema monofluido, si realizzano colonne con diametro variabile da 0,40 a 1,40 m, a seconda delle caratteristiche del terreno ed in relazione ai parametri operativi impiegati (*Foto 1 e 2*).

Il sistema bifluido aumenta la potenza del getto e la sua capacità di penetrazione: l'incremento del diametro, rispetto al sistema monofluido, varia dal 30 al 70%, mentre sono penalizzate le resistenze meccaniche finali, per effetto dell'inglobamento d'aria all'interno del materiale trattato.



Con il sistema trifluido, che per motivi tecnici non può essere impiegato per trattamenti in suborizzontale, si possono realizzare colonne di diametro anche superiore ai 2 m; ma i maggiori costi, la minore flessibilità operativa e soprattutto il rischio di provocare allentamenti nel terreno durante la fase di rottura e scavamento dello stesso, ne hanno limitato l'impiego.

Per realizzare colonne di diametro notevole con il sistema monofluido si può utilizzare il sistema della «doppia passata».

Alla fase di iniezione con sospensione stabilizzante si fa precedere un'iniezione d'acqua ad altissima pressione (prima passata), allo scopo di produrre una disgregazione preliminare del terreno.

L'iniezione successiva di boiaccia (seconda passata) spiazzava l'acqua con il materiale più fine e, trovando minore resistenza da parte del terreno già disgregato, penetra più in profondità.

Per di più l'effetto dell'asportazione della parte più fine del terreno in posto si traduce in migliori caratteristiche meccaniche del consolidamento.

APPLICABILITÀ DEL SISTEMA IN DIVERSI TIPI DI TERRENO

Le esperienze fino ad oggi acquisite ci permettono di parlare di possibilità d'impiego della tecnologia in tutti i terreni granulari ed in quei terreni coesivi che presentano resistenza al taglio tale da renderli attaccabili dal getto.

Questo offre il notevole vantaggio di poter trattare terreni eterogenei (alternanze di sabbie, limi, argille, ecc.) garantendo

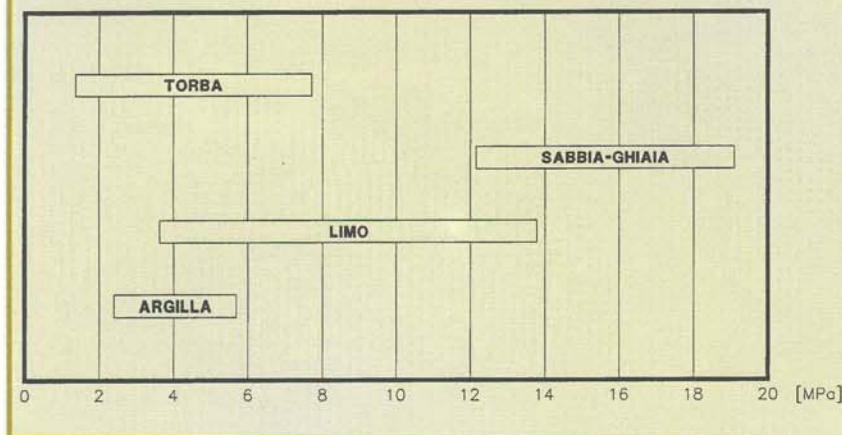
consolidamento ed impermeabilità uniformi indipendentemente dalla natura dei terreni incontrati (*Foto 3*).

Nei terreni a grana fine, la superficie di contatto al limite del raggio d'azione è normalmente ben definita ed abbastanza regolare; nei terreni a grana grossa ed a granulometria eterogenea, la stessa superficie è irregolare e si ha la comparsa sistematica dell'«effetto radice», un consolidamento per «claquage» del terreno all'esterno del raggio d'azione del getto che avviene in seguito a limitate fughe di miscela lungo vie preferenziali incontrate nel terreno naturale (*Foto 2*).

FOTO 3



FIGURA 5 RESISTENZA A COMPRESSIONE MONOASSIALE DI TERRENI CONSOLIDATI MEDIANTE JET-GROUTING



La presenza di falda in regime idrostatico non compromette in nessun modo i risultati del trattamento; in presenza di regime idrodinamico (moti filtranti) l'impiego di particolari accorgimenti come l'uso di acceleranti, ha permesso di ottenere buoni risultati anche a fronte di velocità di 0,1 cm/sec.

La resistenza meccanica a compressione delle colonne è, normalmente, funzione del rapporto acqua-cemento della boiaccia eiettata e della curva granulometrica del terreno naturale.

Cresce in genere andando dalle argille alle ghiaie (Figura 5).

Si sono raggiunti valori di 50 Mpa ed oltre in sabbie e ghiaie, mentre in terreni fini con presenza di sostanze organiche è già difficile raggiungere valori 10 volte inferiori.

In generale, con il sistema monofluido e boiacche a base di solo cemento e acqua, in ghiaie e sabbie i valori di resistenza a lungo termine variano da 12 a 19 Mpa.

In terreni fini, si ottengono valori di resistenza soddisfacenti solamente ricorrendo a dosaggi cemento/acqua elevati (almeno 1,2 - 1,3); in questo caso i valori vanno da 2 a 14 Mpa.

Con il sistema trifluido è possibile raggiungere resistenze anche superiori, grazie alla maggior purezza della colonna ottenibile, mentre il sistema bifluido è leggermente penalizzato, a questo riguardo, dalla possibile presenza di bolle d'aria imprigionate nel getto.

Le caratteristiche di deformabilità dei terreni trattati con le diverse tecniche jet-grouting presentano una dispersione di valori ancora superiori rispetto a quelli di resistenza.

In generale il rapporto E/R_f tra modulo di deformazione e resistenza alla compres-

sione tende ad aumentare con R_f : da minimi di 200 - 300 in terreni fini arriva a circa 1000 in ghiaie e sabbie (Figura 6).

Con il sistema bifluido i moduli sono inferiori rispetto al monofluido, per effetto dell'inglobamento d'aria all'interno del materiale trattato.

A ciò si aggiunge, nei terreni coesivi, una percentuale superiore di terreno in posto inglobato a parità di energia specifica utilizzata, a causa della maggior capacità perforante del getto di boiaccia.

Con il sistema trifluido il campo di variabilità dei risultati si amplia: in caso di esecuzione in terreni che non favoriscono la presa del cls l'esito qualitativo meccanico della colonna e quindi il modulo di deformazione risultano molto elevati solo se l'operazione di taglio e asporto del terreno naturale è eseguita in modo completo e si riesce a mantenere separati i due effetti principali del sistema: taglio con aria e acqua e spazzamento con boiaccia.

Per favorire lo spazzamento del materiale disgregato e dilavato è sempre fondamentale che la boiaccia abbia un elevato rapporto cemento/acqua.

CRITERI DI PROGETTO E DI DIMENSIONAMENTO

La progettazione di un trattamento di consolidamento del terreno mediante jet-grouting deve svilupparsi attraverso le seguenti fasi:

- esecuzione di indagini preliminari sul terreno e campi prova;
- scelta del tipo di miscela e dei parametri operativi;
- scelta della geometria e dimensionamento dei trattamenti;

RESISTENZA A COMPRESSIONE MONOASSIALE R_f

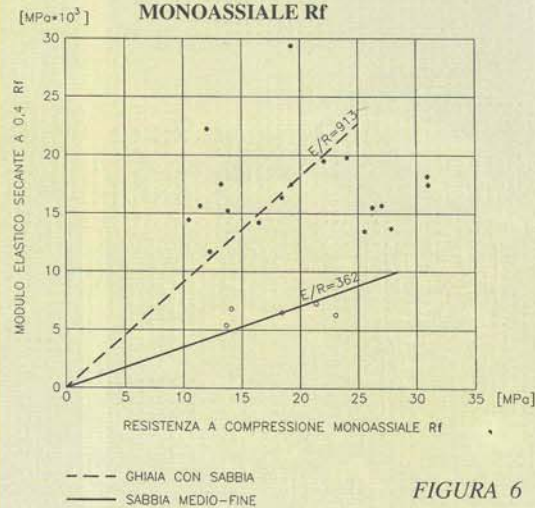


FIGURA 6

- individuazione del modello matematico più rispondente per lo studio dell'evoluzione tensionale e deformativa;
- scelta dei sistemi di controllo.

Indagini e campi di prova

Le indagini preliminari rivestono un ruolo fondamentale in quanto consentono di valutare la fattibilità del jet-grouting e di determinare i principali parametri caratteristici di esecuzione.

Le più importanti sono:

- sondaggi geognostici per la conoscenza generale dei tipi di terreno da trattare;
- prove penetrometriche statiche o dinamiche per la determinazione della consistenza relativa del terreno;
- prove di permeabilità in sito e/o in laboratorio;
- prove d'iniezione in un campo-prova rappresentativo delle reali condizioni operative.

Il campo prova costituisce sicuramente il principale strumento conoscitivo per la scelta della miscela e dei parametri operativi, anche perchè la teoria, a tutt'oggi, non fornisce un valido supporto in questa direzione.

A tale scopo, in un sito adatto, generalmente adiacente a quello dell'intervento reale, si esegue un certo numero di colonne di prova, disposte secondo geometrie scelte in funzione di quelle previste dal progetto di consolidamento da realizzare.

Per ogni colonna o gruppo di colonne si variano i parametri operativi in modo da poter scegliere in seguito le combinazioni più appropriate in funzione dei risultati ottenuti.

A prove ultimate sulle colonne si pos-



FOTO 4



FOTO 5

sono eseguire:

- prove di controllo mediante carotaggio sonico (downhole e crosshole), la cui messa a punto tornerà utile successivamente, quando si tratterà di verificare con prove non distruttive la continuità del trattamento reale e le resistenze ottenute.

In pratica si predispongono a distanze prefissate dei tubi verticali nel terreno e/o nei volumi trattati.

Nelle prove downhole, una sonda emittente ed una ricevente, convenientemente spaziate in senso verticale, sono fatte scorrere entro i tubi.

Le onde emesse dal trasmettitore raggiungono il ricevitore attraverso il materiale circostante, le cui caratteristiche influenzano profondamente ampiezza, frequenza e

forma del segnale, oltre che la velocità di propagazione delle onde stesse.

La registrazione continua della velocità di propagazione delle onde, eseguita traslando lentamente le sonde, permette di ottenere diagrammi come quello in *Figura 7*, in base ai quali si può stimare, livello per livello, la qualità meccanica del terreno consolidato.

La prova crosshole misura, invece, la velocità di propagazione di onde soniche in senso orizzontale, tra due punti del terreno nei quali sono state posizionate le sonde trasmittente e ricevente;

- esame diretto delle colonne, previa scoperta delle stesse, per verificarne visivamente il diametro, la continuità strutturale, l'eventuale compenetrazione (*Foto 4*);
- prove distruttive su carote di terreno conso-

lidato, prelevate sia verticalmente che trasversalmente, onde valutare, con prove in laboratorio, le resistenze meccaniche ottenute (*Foto 6*).

Geometria e dimensionamento dei trattamenti

Per quanto riguarda le scelte progettuali inerenti la geometria ed il dimensionamento del trattamento è necessario che il responsabile della progettazione abbia ben chiare alcune questioni fondamentali:

1) un certo volume di terreno consolidato mediante jet-grouting è terreno consolidato e non una struttura anche se questo volume possiede una geometria che può ricordare

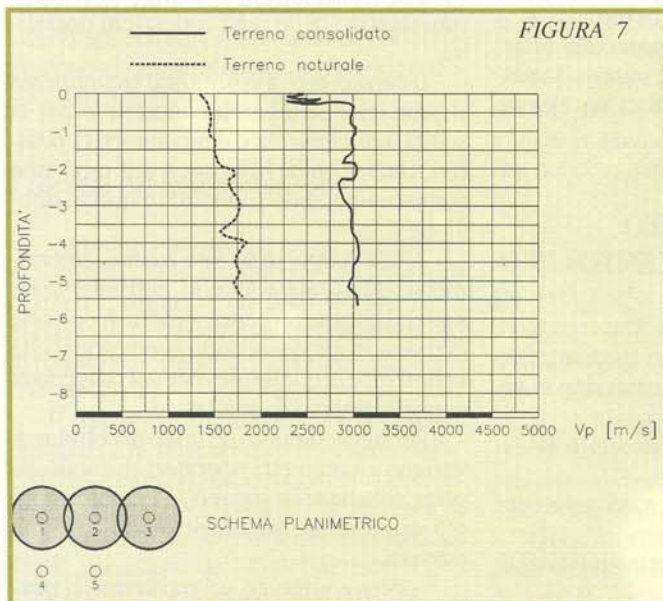


FOTO 6



quella dei pali;

2) attribuendo al terreno consolidato una funzione statica si deve tener conto che la creazione nel sottosuolo di volumi più rigidi, rispetto al terreno naturale, offre un sistema per canalizzare le tensioni nel modo e nelle direzioni desiderate;

3) il terreno trattato lavora molto bene a compressione ed a taglio e, di conseguenza, occorre evitare che vi si instaurino altri tipi di sollecitazione.

A questo proposito, qualora si rendesse necessario, è possibile armare il jet-grouting, ma è bene tener sempre presente che non si otterrà mai una struttura vera e propria come il calcestruzzo armato.

L'infissione di barre o profilati metallici all'interno delle colonne può avvenire spesso per gravità o mediante vibratori ad alta frequenza.

Modelli di calcolo

La natura dei problemi connessi con il consolidamento jet-grouting ad altissima pressione è chiaramente non lineare, dal momento che l'obiettivo è studiare l'evoluzione dell'assetto tenso-deformativo di materiali spiccatamente non lineari come i terreni.

Se a questo si aggiunge il fatto che spesso si ha a che fare con geometrie variabili nel tempo in conseguenza di operazioni di scavo o di realizzazione di manufatti, si comprende facilmente come lo studio di questo tipo di problemi implichi, ad esclusione dei casi più semplici, l'uso di calcoli agli elementi finiti tramite elaboratore, che partendo dall'analisi degli equilibri naturali preesistenti, si sviluppino attraverso una

sequenza di fasi tale da approssimare, nel miglior modo possibile, il reale sviluppo dei lavori.

Controlli

E' importante disporre di un efficace sistema di controllo sugli interventi di consolidamento.

Si distinguono controlli durante il trattamento e controlli dopo il trattamento.

Durante il trattamento, particolare cura va posta nell'assicurare l'affidabilità e l'inalterabilità delle principali componenti meccaniche ed elettriche che presiedono al controllo ed alla registrazione continua dei parametri operativi: rapporto acqua/cemento della boiaccia d'iniezione, pressione e portata d'iniezione, velocità di estrazione e di rotazione delle aste. Altri controlli in corso d'opera sono necessari al fine di:

- verificare la corretta direzione delle perforazioni;
- controllare gli eventuali movimenti in superficie del terreno circostante (nel caso in cui i lavori avvengano in presenza di edifici od opere preesistenti);
- indagare sul materiale rifluito durante l'iniezione.

Attraverso valutazioni qualitative e quantitative sul materiale di rifluimento è infatti possibile stimare fin dalla fase esecutiva le caratteristiche finali del trattamento. Dopo il trattamento i controlli più specifici sono:

- prove di carico (nel caso di colonne di fondazione);
- prove di carotaggio sonico per verificare il miglioramento delle caratteristiche meccaniche, la continuità e l'eventuale compenetrazione di colonne contigue.

INNOVAZIONI

Nel corso degli anni sono stati compiuti notevoli progressi nell'uso della tecnologia jet-grouting.

Questi progressi si sono avuti sia in fatto di attrezzature, di tecnica esecutiva e di studi sulle miscele, sia nella messa a punto di schemi progettuali originali, concepiti per trarre i massimi vantaggi dalle caratteristiche peculiari del sistema.

Progressi tecnologici

La ricerca è rivolta principalmente alla meccanica pompante ed alla sperimentazione di circuiti ad alta pressione e di geometrie di ugelli idonee per:

- aumentare il potere dirompente del getto al fine di ottenere raggi d'azione più elevati;
- aggiunta di inerte sabbioso nella miscela consolidante, al fine di ottenere strutture consolidate più resistenti.

Nel corso di campi prova sperimentali eseguiti da Fondazioni Speciali Srl di Parma a collaudo di alcuni propri brevetti, sono state eseguite prove di raffronto sia su terreni argillo-limosi decompressi, sia in terreni ghiaiosi, utilizzando miscele additivate con sabbie calcaree e silicee caratterizzate da curve granulometriche distese e pezzature massime anche superiori al millimetro, in quantità fino al 100% del peso del cemento.

Impiegando simultaneamente 2700 CV pompanti, per portate di 1500 litri/min a 500 bar di pressione, si sono ottenute, con jet monofluido, colonne di diametro superiore ai 2 m, costituite da malta omogenea e compatta, anche negli attraversamenti

FOTO 7

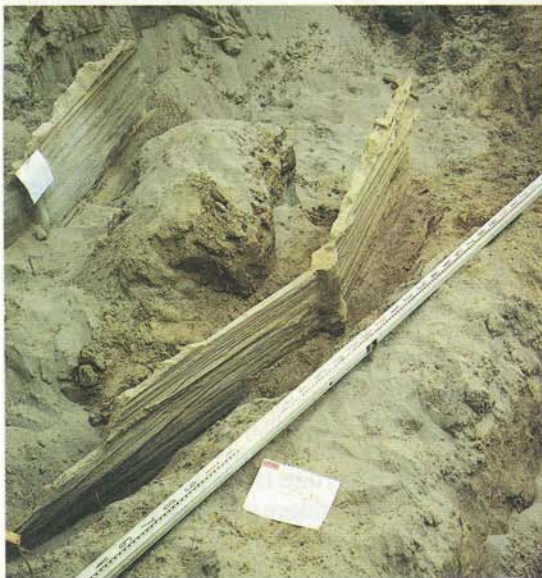


FOTO 8



argillosi, in tempi operativi molto contenuti e con forte riduzione dei refluenti;

- eseguire l'iniezione contemporaneamente alla fase di perforazione.

Le prime esperienze compiute da Fondazioni Speciali Srl, utilizzando monitor con uno e fino a cinque ugelli, orientati opportunamente per dirigere il getto con angolatura tale da facilitare la penetrazione della sonda, hanno portato a tempi di realizzazione dimezzati, rispetto a quelli forniti dalle tecniche tradizionali;

- ridurre o eliminare gli effetti di riflessione che normalmente si verificano per ridotte velocità di estrazione e rotazione delle aste.

Anche qui si sono ottenuti risultati interessantissimi, che hanno permesso di ottenere veri e propri diaframmi di terreno consolidato in posto, con un'unica perforazione (Foto 7 e 8).

Uno dei risultati più eclatanti è stato quello di ottenere elevati raggi d'azione, pari a 3 - 4 ml: con ridotte velocità di rotazione si sono ottenute colonne di circa 8 m di diametro.

Recentemente la tecnologia jet-grouting è stata sperimentata con successo anche in lavori di impermeabilizzazione in roccia, dove le iniezioni tradizionali a bassa pressione risultano scarsamente efficaci per la tendenza della miscela iniettata a sfuggire attraverso le discontinuità, senza però riempirle sufficientemente.

Vedremo in seguito un'interessante applicazione di questa tecnologia nei lavori di costruzione della diga di Brombach (Germania).

FOTO 9



APPLICAZIONE DEL JET-GROUTING NELLE OPERE DI INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE.

SCHEMI PROGETTUALI

La tecnica di consolidamento jet-grouting ha trovato largo impiego in diversi campi dell'ingegneria civile, grazie allo studio ed alla messa a punto di schemi progettuali specifici, che ben si adattano alle più svariate condizioni operative.

Le prime applicazioni si riferiscono all'esecuzione di opere di contenimento e di fondazione, forse a causa della forma colonnare del trattamento, che richiama quella del palo.

Ad esse seguirono rapidamente impieghi sempre più sofisticati e geniali per la stabilizzazione di versanti, lo scavo di gallerie in terreni sciolti, la realizzazione di opere idrauliche.

Commentare qualche esempio di applicazioni realizzate renderà più facile seguire l'evoluzione degli schemi progettuali.

Opere di sostegno

In tema di contenimento di scavi a cielo aperto e trincee artificiali si è verificata una notevole evoluzione di schemi progettuali (Figura 8).

Le prime geometrie realizzate consistevano in una fila di colonne di terreno consolidato più o meno accostate, eseguite lungo il contorno del futuro scavo.

Uno schema simile, ad esempio, fu uti-

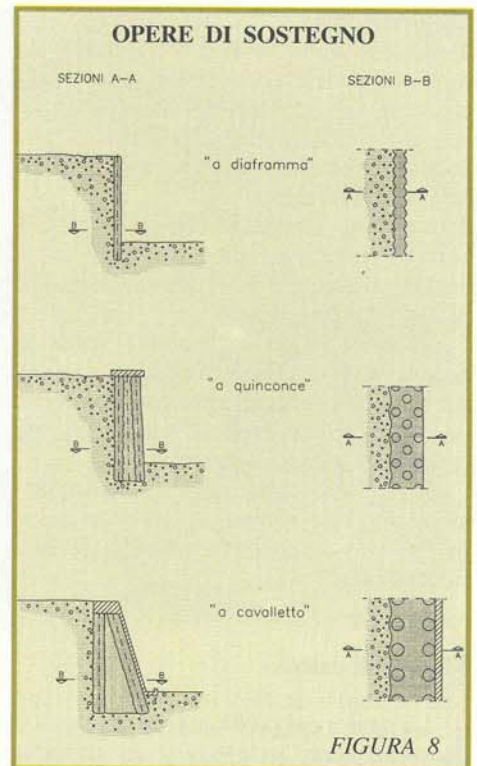


FIGURA 8

lizzato per la costruzione del pozzo di Sesto S. Giovanni della metropolitana (Foto 2, Rocksoil Spa 1980, prima applicazione assoluta in Italia) ed a Lione, per la protezione degli scavi a cielo aperto della stazione «Sans Souci» della linea D della metropolitana.

In questo caso, la natura più coesiva del terreno permise di ridurre il consolidamento ad una colonna jet-grouting ϕ 700 mm ogni due metri circa (Foto 9).

Geometrie di questo tipo, pur efficaci per il contenimento provvisorio di scavi in terreni alluvionali o coesivi, di discrete caratteristiche geomeccaniche, non erano però sufficientemente affidabili per protezioni definitive.

A questo scopo si è quindi passati a schemi più complessi, che prevedevano più ordini di colonne jet-grouting disposte a quinconce.

Questa soluzione, grazie agli eccellenti risultati forniti ed alla facilità e rapidità realizzativa, si è imposta rapidamente soppiantando spesso le tecnologie più tradizionali.

Basti ricordare il successo che ha avuto, in accoppiamento con la tecnologia del jet-grouting in orizzontale, nella realizzazione di imbocchi di gallerie in terreni incoerenti o semicoerenti, (Figura 9) dove, grazie alle ridotte coperture richieste per attaccare la galleria naturale, è possibile minimizzare i volumi scavo riducendo il rischio d'instabilizzare il versante ed ottenendo

notevoli vantaggi dal punto di vista paesaggistico-ambientale (cfr. Foto 10 e 12).

La Figura 8 mostra infine lo schema «a cavalletto» adottato a Napoli lungo la scarpata ferroviaria di Sarno (Foto 11) (Rocksoil Spa 1986).

Esso ha il pregio di far collaborare alla stabilità del sistema anche il terreno imprigionato tra i due ordini di colonne jet-grouting, che, oltre ad essere consolidato per claquage, si trova sempre in condizioni di sollecitazione triassiali.

Stabilizzazione di versanti

La Figura 10 riassume alcune tipologie caratteristiche. Si va da quella «a ventaglio», al contenimento «a speroni» di jet-grouting disposti planimetricamente in senso radiale, su un arco di circonferenza, per finire con la tipologia «a pozzo», sempre molto efficace.

La prima fu applicata dalla Rocksoil Spa inizialmente (1982) a Gela, in combinazione con dreni sub-orizzontali.

La frana, infatti, era innescata dall'erosione prodotta al piede della scarpata naturale dall'acqua di percolazione al contatto con il substrato impermeabile.

Mentre con il drenaggio fu eliminata la causa del problema, il consolidamento del terreno mediante jet-grouting permise di assicurare un adeguato coefficiente di sicurezza alla stabilità della scarpata, sulla cui sommità erano fondati alcuni edifici.

La tipologia «a speroni» (Figura 10) fu adottata dalla Rocksoil Spa nel 1984 in Val Topina per contenere la frana di una coltre detritica limosa, verificatasi durante i lavori di costruzione di una piazzola di sosta lungo la S.S. n. 3 «Flaminia».

L'adozione del sistema jet-grouting permise di:

- evitare l'asporto di materiali e quindi provocare ulteriori decompressioni del pendio;
- evitare qualsiasi vibrazione che avrebbe potuto innescare nuove frane;
- non sovraccaricare il pendio con attrezzature pesanti;
- realizzare un completo claquage del terreno in posto.

La tipologia «a pozzo» (Figura 10) è stata adottata anche recentemente per la stabilizzazione del piazzale d'imbocco del traforo autostradale del Monte Bianco.

Fondazioni e sottomurazioni

Il jet-grouting ha trovato numerose

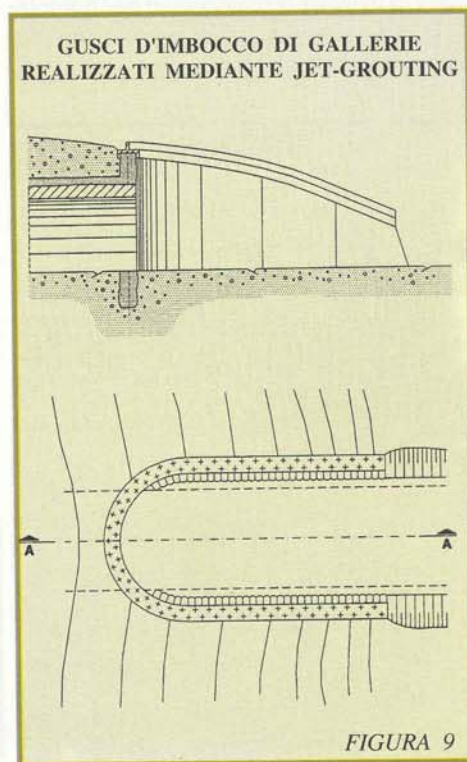
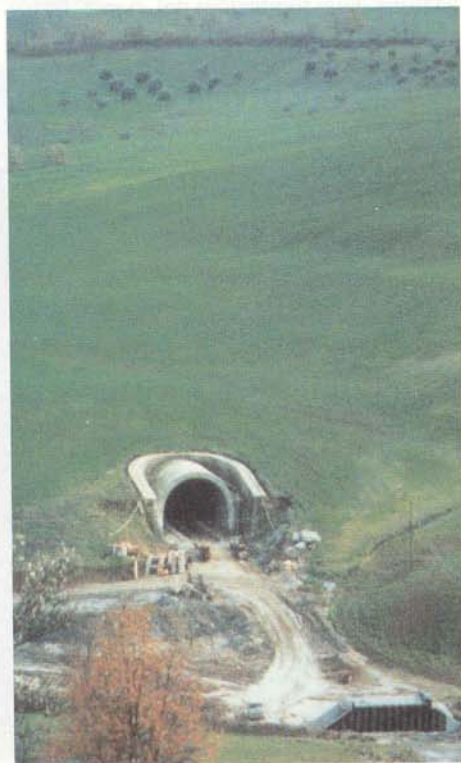


(sopra)
FOTO 10



(a lato)
FOTO 11

(sotto)
FOTO 12



applicazioni in lavori di fondazione o sottomurazione.

Per quanto riguarda le fondazioni, si sono utilizzate soprattutto due tipologie (Figura 11):

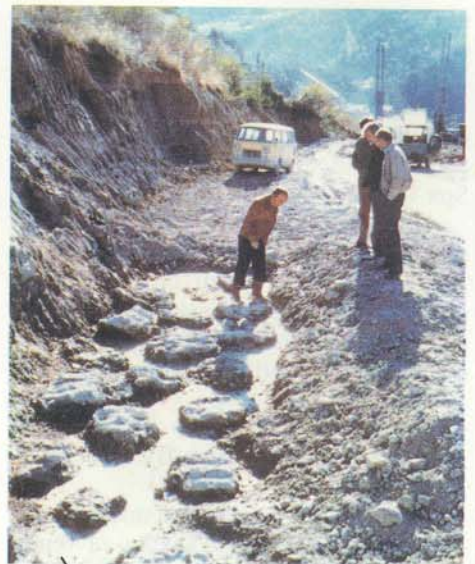
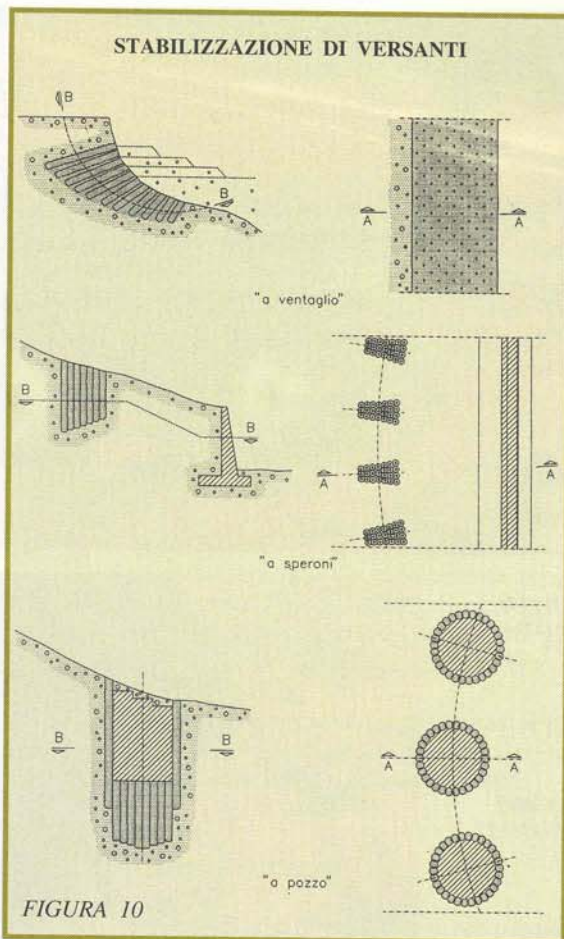
- «dirette consolidate», che, realizzando un graduale passaggio di rigidzze crescenti, risultano particolarmente idonee in zone soggette a sismi.

Fondazioni di questo tipo sono state adottate per numerosi viadotti: della Superstrada del Frejus presso Bardonecchia (Foto 13), della SS1 in Val Topina, dell'Autostrada dei Trafori, delle Ferrovie dello Stato sul Fiume Adda, per citarne solo alcuni.

- «a pozzo», largamente impiegate per costruzioni da realizzare su versanti o in alvei fluviali.

La realizzazione di pozzi con il sistema jet-grouting è un'operazione molto rapida ed economica, veramente insostituibile operando sotto falda.

Eseguendo una coronella continua sul perimetro del futuro pozzo, ed un tappo sul fondo, costituiti da colonne di terreno consolidato, si può scavare il pozzo lavorando all'asciutto, all'interno della coronella, fino a raggiungere la sommità del tappo di fondo e, susseguentemente, effettuare all'asciutto i getti di calcestruzzo necessari per riempire il volume scavato fino al piano d'imposta del plinto di fondazione.

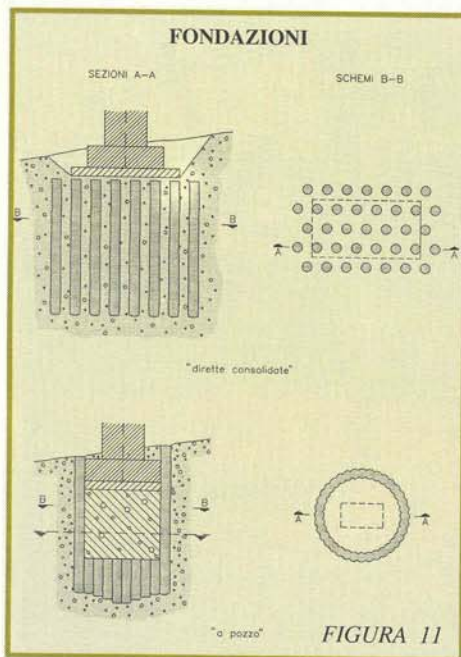


(sopra) FOTO 13



La prima realizzazione di un pozzo sotto falda con questo sistema avvenne in Carnia (Rocksoil Spa 1983) per la realizzazione delle fondazioni del ponte ferroviario entro l'alveo alluvionale del fiume Fella (linea FF.SS. Udine -Tarvisio, Foto

(sotto) FOTO 14 (a lato) FOTO 15



14 e 15).

In tema di sottomurazioni, la casistica del jet-grouting è ricca di casi interessanti.

La Figura 12 e la Foto 16 mostrano gli schemi adottati per la Banca del Monte a Parma (Rocksoil Spa 1982).

In situazioni come queste, in cui si è costretti ad operare a ridosso di antichi edifici in muratura, è facile, con le iniezioni tradizionali, provocare pericolosi sollevamenti delle fondazioni.

Il jet-grouting, permettendo di controllare il raggio d'azione del getto attraverso i parametri operativi, nonostante le elevate pressioni in gioco, consente di iniettare senza inconvenienti anche a breve distanza dalle fondazioni.

Sempre in tema di fondazioni, la Figura 13 riporta una particolare applicazione che ha trovato nel jet-grouting un potente mezzo realizzativo.

Ci riferiamo al ripristino di fondazioni in alveo.

A questo proposito fu rilevante, per tempi e modi con cui fu condotta, l'operazione di ripristino delle fondazioni del ponte ferroviario sul fiume Taro, danneggiate dalla piena eccezionale che nel novembre 1982 provocò il parziale crollo del ponte (Foto 17)

L'intervento di consolidamento progettato dalla Rocksoil Spa fu duplice e consistette (Figura 13):

1) nell'esecuzione di una cintura protettiva continua di colonne jet-grouting, al contorno delle fondazioni di ogni pila, di spessore e di profondità sufficienti a garantire la sua

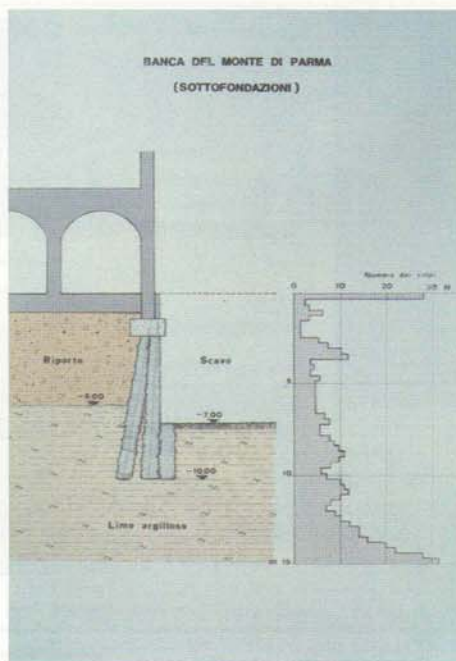


FIGURA 12

funzione primaria di contrasto all'azione di scalzamento delle acque correnti in alveo e subalveo, e di contenimento dei fenomeni di decompressione laterale del terreno di fondazione, tale da favorire la conservazione della capacità portante;

2) nell'esecuzione di un trattamento del terreno, mediante iniezioni tradizionali, all'interno della cintura protettiva, onde ridurre la permeabilità ed aumentarne la portanza.



FOTO 16

GALLERIE

In tema di gallerie, il jet-grouting, nei progressi compiuti negli ultimi dieci anni, ha avuto un ruolo fondamentale.

In particolare la sua applicazione in suborizzontale ha permesso di superare in un sol colpo tutte le difficoltà connesse con

FIGURA 13

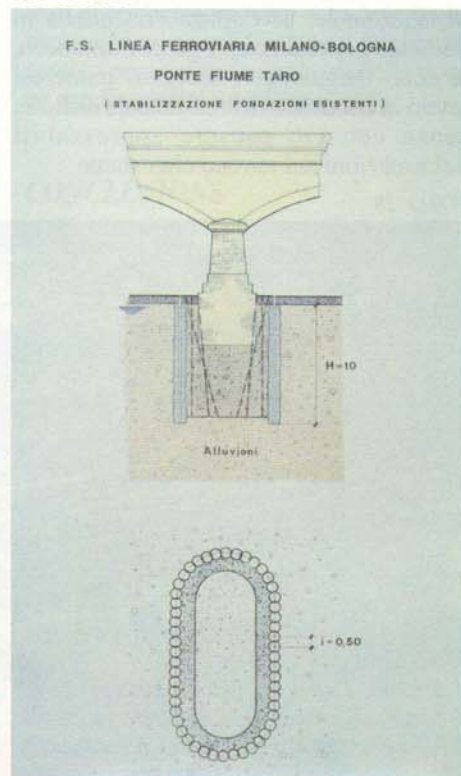


FOTO 17



l'avanzamento di un cavo in terreni privi di coesione. Anche in questo caso è stata fondamentale l'ideazione di uno schema statico adatto alle caratteristiche del terreno trattato, uno schema statico, cioè, che facesse lavorare il materiale consolidato prevalentemente a compressione e taglio.

Si tratta del famoso trattamento «ad ombrello» lanciato in avanzamento, con cui si innesca nel terreno un «effetto arco» in anticipo sullo scavo.

La prima applicazione assoluta di questo schema fu durante i lavori di costruzione della galleria ferroviaria «Campiolo».

La Figura 14 mostra lo schema dei trattamenti progettati dalla Rocksoil Spa di Milano.

Importante è la continuità della fascia di terreno consolidato al contorno del cavo.

A tale scopo, se lo scavo avviene in due fasi, è fondamentale, prima di eseguire l'abbassamento alla piena sezione, realizzare una serie di colonne subverticali per trasmettere in profondità le tensioni canalizzate dall'arco di terreno consolidato. L'esperienza ha messo in evidenza che garantire in ogni fase una buona trasmissione di sollecitazioni dall'arco di terreno consolidato al terreno naturale ha notevoli effetti sul contenimento delle convergenze.

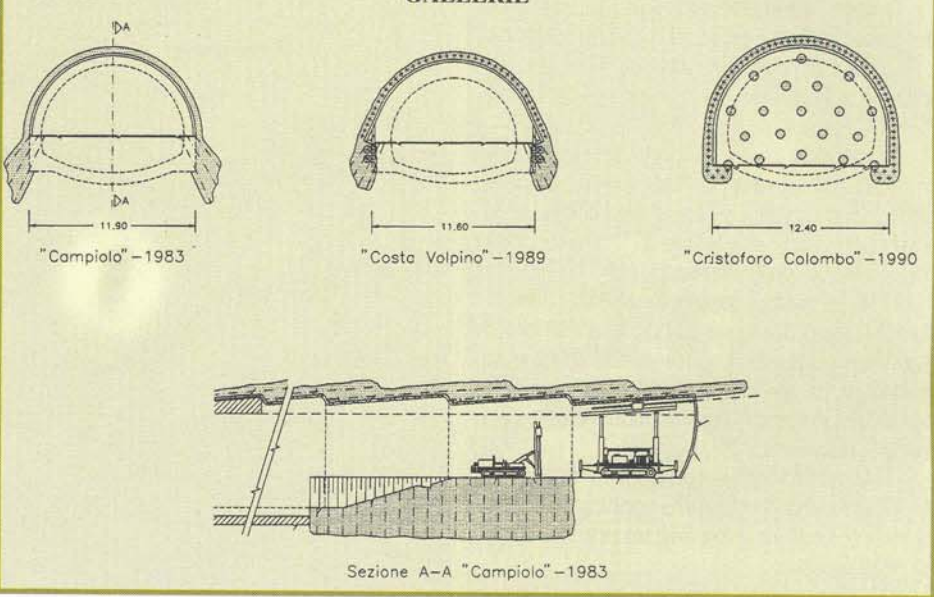
In questa ottica lo schema adottato per la galleria «Campiolo» è stato successivamente modificato per intensificare il consolidamento della mezza sezione fin sotto le centine (Figura 14).

Utilizzando la tecnologia jet-grouting in orizzontale, accoppiata con quella in verticale per realizzare i gusci d'imbocco, si sono eseguiti con successo numerosi lavori in condizioni estremamente difficili, senza con ciò causare apprezzabili deformazioni nel terreno circostante.

FOTO 18



FIGURA 14



La Foto 18 mostra, ad esempio, il sottopasso costruito a Campinas (Brasile) senza interrompere il traffico ferroviario nonostante i soli 2 metri di copertura in calotta. La Foto 19 mostra, per ultima, un'applicazione della tecnica jet-grouting fatta a Roma, durante la costruzione di un sottopasso autostradale, per stabilizzare, con un intervento in orizzontale eseguito in avanzamento sul nucleo, il fronte di scavo.

OPERE IDRAULICHE

In tema di opere idrauliche il jet-grouting ha trovato applica-

FIGURA 15

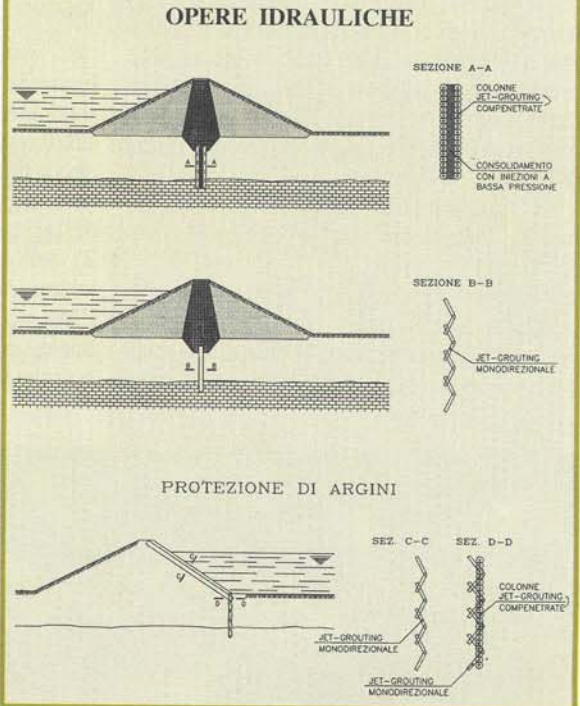
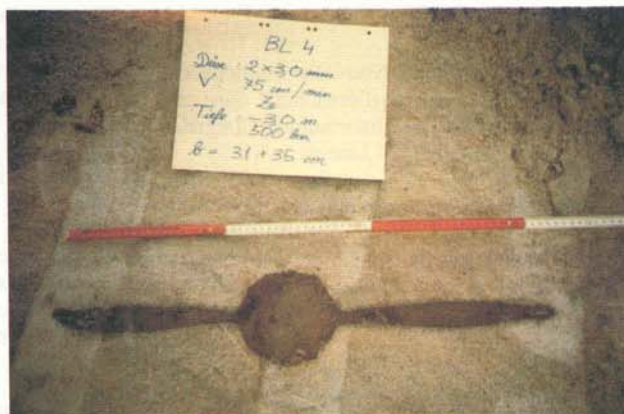
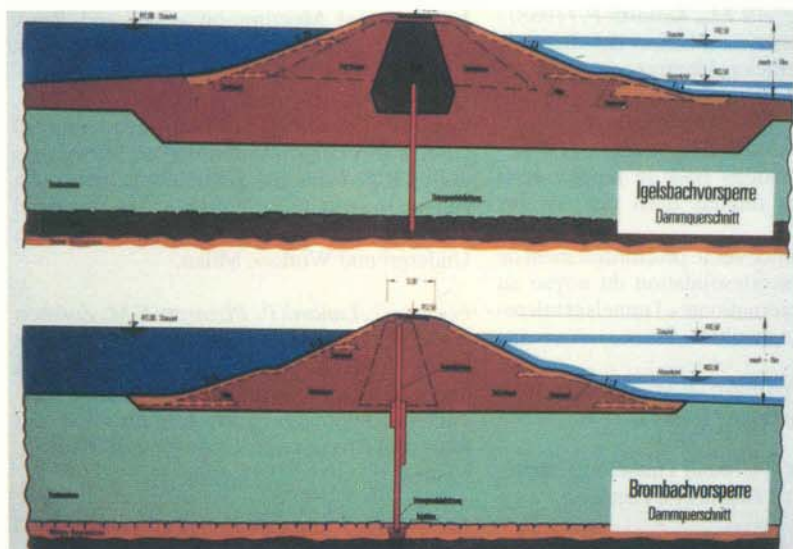


FOTO 19





(a lato)
FOTO 20
(sopra)
FOTO 21

zione soprattutto in lavori d'impermeabilizzazione di dighe e di protezione di argini (Figura 15).

A Ravedis, per esempio, l'impermeabilizzazione della coltre alluvionale, in corrispondenza dell'avandiga, è stata realizzata mediante un diaframma costituito da due strisce di colonne jet-grouting accostate e spinte fino al substrato impermeabile.

Il terreno all'interno delle due strisce di colonne è stato quindi trattato ed impermeabilizzato con iniezioni tradizionali.

Un altro lavoro interessante d'impermeabilizzazione dell'imposta di una diga mediante jet-grouting è stato realizzato a Brombach, in Germania.

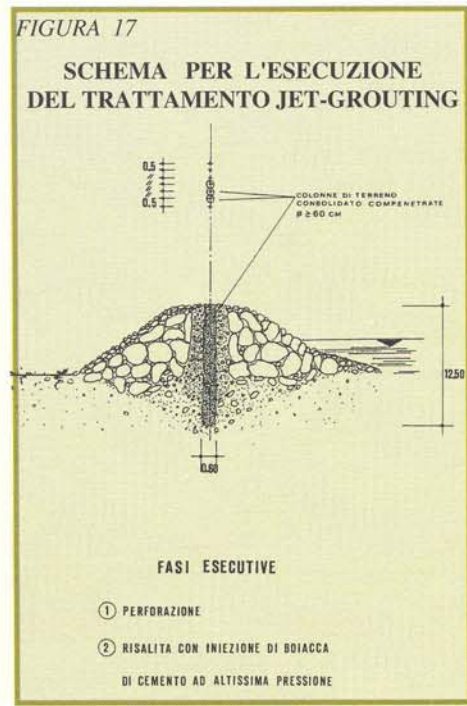
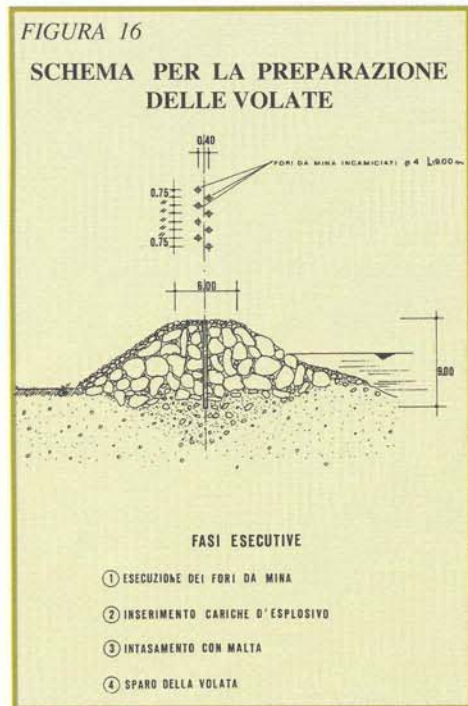
L'interesse sta nel fatto che per la prima volta si è operato in roccia, e precisamente

in arenaria.

L'impiego del jet-grouting bifluido ha permesso di creare nella roccia una serie di tagli intersecantisi, di oltre un metro di lunghezza, riempiti di miscela cementizia additivata per ridurre la permeabilità (Foto 20 e 21).

In tema di argini, crediamo che sia di interesse una particolare lavorazione eseguita nel 1987 per il ripristino di un argine del fiume Adda e Talamona, rotto da una piena, per circa 300 m di lunghezza.

Ricostruito, in situazione di emergenza, con grossi blocchi lapidei che non potevano però assicurare una sufficiente impermeabilità, questa fu ottenuta celermente ricorrendo ad un'originale lavorazione (Figura 16 e 17):



- in una prima fase si ridusse la dimensione dei vuoti sbriciolando i blocchi lapidei ubicati all'interno del corpo arginale mediante il brillantamento di cariche esplosive opportunamente dosate e posizionate;
- in una seconda fase, nella fascia disagregata, fu realizzato un diaframma continuo di jet-grouting, che rese l'arginatura impermeabile.

CONCLUSIONI

Abbiamo visto in cosa consiste la tecnologia jet-grouting e come essa possa trovare applicazione nella risoluzione di numerosi problemi di costruzioni civili.

Certamente si tratta di una tecnologia ancora relativamente giovane e perciò ancora non del tutto esplorata.

I risultati ottenuti in questi primi dieci anni di applicazioni sono stati però molto incoraggianti e costituiscono il miglior incentivo per continuare sulla via della ricerca e della sperimentazione.

CONCLUSIONS

After describing the jet-grouting technology, we have seen, with some typical examples, how it can find applications in the resolution of numerous civil engineering problems. It, certainly, is a still relatively young technology and, consequently, not yet fully explored.

Results obtained in this first decade of application have, however, been very encouraging and constitute the best incentive for continuing on the path of research and experimentation.

Ringraziamenti

L'Autore ringrazia le imprese **Fondazioni Speciali S.r.l.** di Parma, **Rodio S.p.A.** e **Presspali S.p.A.** di Milano, per la cooperazione prestata.