

Achille Balossi Restelli

INIEZIONI NEI TERRENI SCIOLTI

X° Ciclo di Conferenze dedicate ai problemi di **MECCANICA DEI TERRENI** e **INGEGNERIA DELLE FONDAZIONI «METODI DI MIGLIORAMENTO DEI TERRENI»** - Politecnico di Torino, Novembre 1981

Società
degli Ingegneri
e Architetti
in Torino

Politecnico di Torino
Facoltà di Ingegneria
Istituto di
Scienza delle Costruzioni

X Ciclo di Conferenze

dedicate ai problemi di

MECCANICA DEI TERRENI e INGEGNERIA DELLE FONDAZIONI

METODI DI MIGLIORAMENTO DEI TERRENI

17 - 18 - 19 Novembre 1981
Salone dei Congressi dell'Istituto
Bancario San Paolo - Torino

POLITECNICO DI TORINO
INGEGNERIA
ISTITUTO DI SCIENZA DELLE COSTRUZIONI

10° CICLO ANNUALE DI CONFERENZE DEDICATE AI PROBLEMI
DI INGEGNERIA DELLE FONDAZIONI

Achille Balossi Restelli (*)

INIEZIONI NEI TERRENI SCIOLTI

(*) Ingegnere libero professionista - Milano

I N D I C E

=====

	pag.	
1. INTRODUZIONE	5	
2. I PRINCIPALI CAMPI D'APPLICAZIONE DELLE INIEZIONI NEI TERRENI SCIOLTI	5	"
3. IL PROGETTO DI UN TRATTAMENTO D'INIEZIONI	8	"
3.1. IL PROGETTO - CONCLUSIONI	13	"
4. TECNOLOGIA E MODALITA' ESECUTIVE DELLE INIEZIONI NEI TERRENI SCIOLTI	14	"
4.1. LA CENTRALE D'INIEZIONE	14	"
4.2. I TUBI A VALVOLE (TUBE A MANCHETTES)	15	"
4.3. LA CONDUZIONE DELL'INIEZIONE	19	"
4.3.1. PORTATE E PRESSIONI AMMISSIBILI D'INIE- ZIONE	21	"
4.3.2. QUANTITATIVI (VOLUMI) E PRESSIONI AMMISSIBILI D'INIEZIONE	23	"
4.3.3. CONCLUSIONI	25	"
4.3.4. CONDIZIONI PARTICOLARI - GEOMETRIA DEL TRATTAMENTO - FORI DIVERGENTI - PRESENZA DI STRUTTURE IN PROSSIMITA' DEL MASSO DA INIETTARE	25	"
4.4. CONTROLLO DEI MOVIMENTI	28	"
5. ESEMPI D'INTERVENTI D'INIEZIONE NEI TERRENI SCIOLTI	29	"
5.1. SBARRAMENTI IDRAULICI	29	"
5.2. SCAVI A CIELO APERTO	39	"
5.3. LE GALLERIE	45	"
5.4. CONSOLIDAMENTO DI EDIFICI E SOTTOFONDAZIONI	53	"
6. TRATTAMENTI MISTI D'INIEZIONE E DI DRENAGGIO	55	"
7. CONCLUSIONI	56	"
BIBLIOGRAFIA	58	"

1. INTRODUZIONE

Il problema del miglioramento delle caratteristiche dei terreni sciolti si è affacciato al campo dell'ingegneria alcuni decenni fa in concomitanza con la realizzazione di grandi opere di tipo idraulico; lo sfruttamento a scopo idroelettrico di grandi bacini ha dato l'avvio ad una tecnica nuova, quella delle iniezioni, che si è poi evoluta nel tempo estendendosi ai più svariati campi d'applicazione, spesso rendendo fattibili opere che all'inizio del secolo sarebbero state ritenute impossibili, comunque facilitandone la realizzazione e riducendone i costi.

Cercherò in questa mia relazione di esaminare i vari campi d'applicazione delle iniezioni nei terreni sciolti, illustrando con esempi concreti le tecnologie adottate ed i risultati ottenuti. La vastità del tema probabilmente non consentirà un'esposizione completa: farò in modo tuttavia di toccare i punti più salienti dello stato attuale dell'arte nei limiti delle esperienze da me personalmente vissute e delle nozioni tratte dai numerosissimi interventi di questo tipo eseguiti nel corso degli ultimi anni.

2. I PRINCIPALI CAMPI D'APPLICAZIONE DELLE INIEZIONI NEI TERRENI SCIOLTI

Le miscele d'iniezione introdotte nel terreno mediante appropriate tecnologie, di cui tratteremo più avanti, vanno ad occupare gli interspazi naturalmente esistenti fra le particelle solide costituenti il terreno; nel caso di terreno immerso sostituiscono parzialmente l'acqua d'imbibizione.

Risulta chiaro come, una volta intervenuta la presa o la polimerizzazione (nel caso delle resine), l'ammasso di tipo granulare venga ad assumere caratteristiche meccaniche assai differenti dal suo stato naturale: materiali totalmente incoerenti divengono coesivi, materiali con poca coesione incrementano questa particolare funzione.

Si ottengono dunque, a seconda delle modalità esecutive e degli scopi che vogliono raggiungere:

- un effetto di raddensamento: questo in qualsiasi condizione vengano condotte le iniezioni
- un vero e proprio consolidamento: nel caso in cui vengano utilizzate miscele appropriate ed idonee tecnologie
- un'impermeabilizzazione: più o meno spinta a seconda dei tipi di miscele impiegate in funzione della composizione granulometrica del terreno.

Da notare che un buon consolidamento origina sempre una certa riduzione di permeabilità; per contro non sempre con l'impermeabilizzazione si fornisce un sensibile incremento delle caratteristiche meccaniche del suolo.

In base a quanto detto con l'aiuto, spesso determinante, delle iniezioni hanno potuto essere risolti problemi assai impegnativi e la gamma di interventi differenti si è sempre più allargata nel corso degli ultimi decenni.

Limitando l'elencazione al solo caso dei terreni sciolti, riferisco qui di seguito, per ora schematicamente, i principali campi d'applicazione delle iniezioni precisandone gli scopi

- schermi di tenuta: l'effetto d'impermeabilizzazione ottenuto con le iniezioni viene utilizzato per dighe o traverse impostate su terreno incoerente (sbarramenti di valli colme di depositi alluvionali o glaciali), per la creazione di fondazioni profonde in falda quali ad esempio: pozzi per pile di ponti, scavi profondi per centrali idroelettriche, termoelettriche, nucleari in prossimità di fiumi, grossi vani da ricavarsi nel sottosuolo delle città ecc.
- protezioni di gallerie: in questi casi prevale generalmente lo effetto consolidante delle iniezioni. Gli interventi possono essere preventivi quando si voglia creare un arco di terreno consolidato oltre l'estradosso di scavo che consenta l'esecuzione della galleria in sicurezza e se necessario senza cedimenti delle opere sovrastanti: tipico esempio quello delle metropolitane o grosse fognature cittadine. Sovente gli interventi vengono eseguiti invece per porre rimedio a rilasci avvenuti nel corso delle operazioni di scavo:

questo avviene più frequentemente in gallerie lontane dagli abitati dove eccessive precauzioni non sempre sarebbero giustificabili.

Sono state anche eseguite applicazioni per consentire il riassetto di vecchie gallerie disastrose

- consolidamento di fondazioni: questi interventi sono volti al miglioramento della portanza del terreno e si attuano per fondazioni dirette dove non è possibile o conveniente eseguire palificazioni
- costituzione di muri a gravità: nel caso non si possano eseguire paratie si consolida una porzione di terreno lateralmente allo scavo da eseguire, in modo che il terreno stesso sia in grado di resistere alle spinte orizzontali e reggersi verticalmente o secondo angoli più accentuati di quello di naturale declivio
- movimenti franosi: si tratta di applicazioni per migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno, in questi casi tuttavia sempre in concomitanza con altre operazioni specialistiche, quali opere di drenaggio e tirantature
- antiscazzamento: iniezioni a protezione di opere di fondazione immerse e sollecitate da correnti subalvee, oppure stabilizzazione di argini fluviali
- antivibrazione: utilizzando miscele elasto-plastiche (tipo resine acriliche) è possibile creare schermi capaci di smorzare effetti vibranti anche di grande intensità: l'energia cinetica si trasforma in lavoro di deformazione nell'ambito della porzione di terreno trattata con dette resine
- realizzazione di bulbi d'ancoraggio: questo vale sia per la parte terminale dei tiranti e quindi per quella porzione di terreno che si oppone agli sforzi di trazione, sia per i micro-pali iniettati in pressione attraverso apposite valvole e quindi per quella porzione di terreno che deve assorbire gli sforzi di compressione trasmessi dagli elementi metallici

- applicazioni particolari: quali iniezioni preventive nel caso del congelamento quando vi siano acque fluenti o terreno poco raddensato, trattamenti tipo Prepakt, "claquages" controllati, ricomprensioni al contatto dei manufatti esistenti.

3. IL PROGETTO DI UN TRATTAMENTO D' INIEZIONI

A seconda delle proprietà meccaniche o di impermeabilizzazione che si vogliono fornire al terreno ed agli scopi che si devono conseguire, si stabilisce innanzitutto la forma geometrica del masso da iniettare.

Così, ad esempio, attorno ad una galleria da proteggere durante lo scavo si traccia l'arco dello spessore necessario per assorbire i carichi ed assicurare la stabilità del tratto scavato anche prima della posa di centine e spritz-beton (fig. 1)

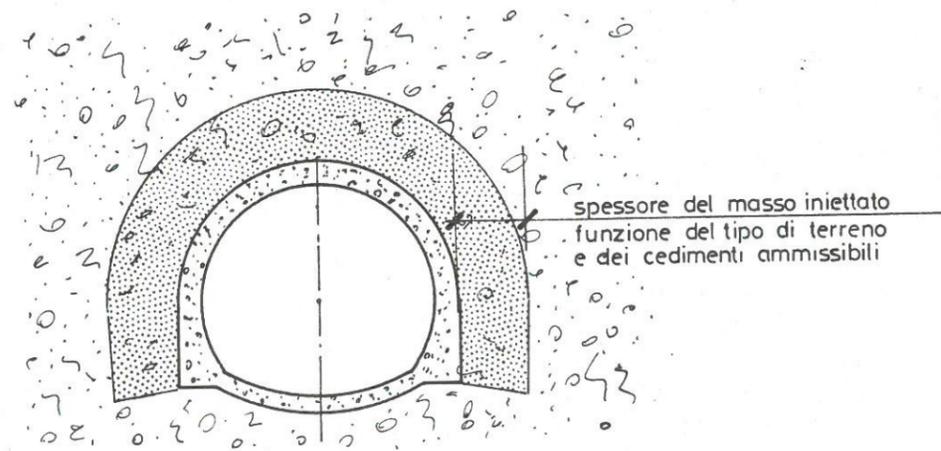


Fig. 1 - Arco di scarico tradizionale e protezione di una galleria da scavare.

Se la galleria è in falda il trattamento deve essere esteso anche sotto l'arco rovescio per consentire la stabilità dello scavo ed aggotamenti di lieve entità (fig. 2).

E' necessario successivamente esaminare le varie possibilità relative all'esecuzione delle perforazioni e posa in opera dei tubi a valvola per potere stabilire la geometria del trattamento.

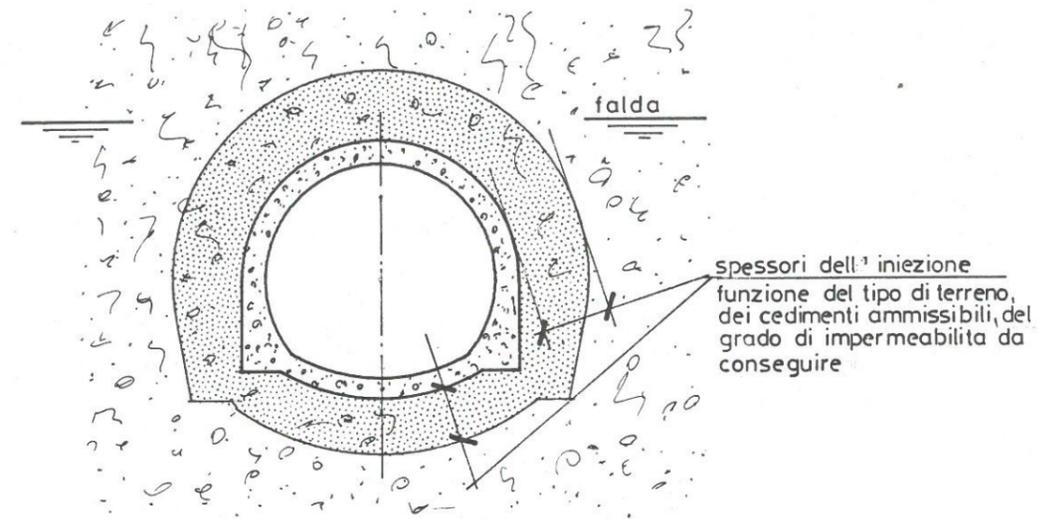


Fig. 2 - Arco di scarico ed impermeabilizzazione di una galleria da scavare in falda.

Così, ad esempio, per il caso esposto in fig. 1, bisogna scegliere la soluzione più conveniente e praticamente eseguibile fra quelle esposte qui di seguito.

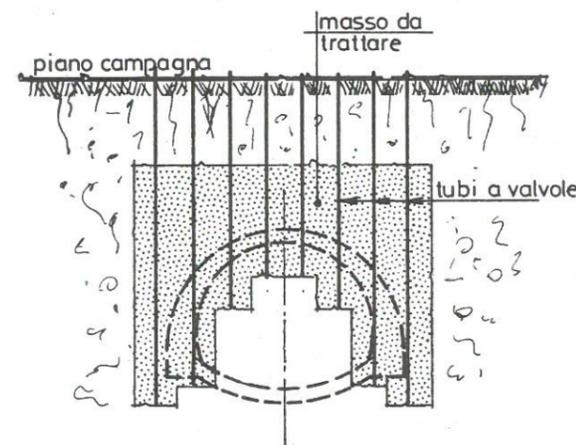
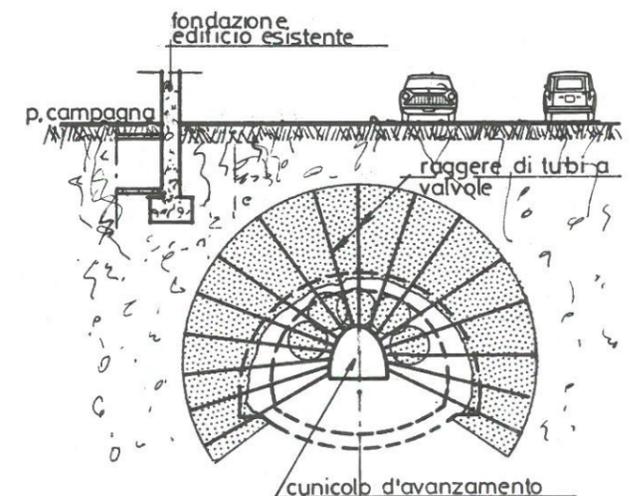


Fig. 3 - Trattamento dalla superficie: possibile se non vi sono ingombri e per limitate profondità.

Fig. 4 - Trattamento a foro cieco, in avanzamento da cunicolo: conveniente quando il trattamento deve essere molto preciso e non sono ammessi cedimenti.



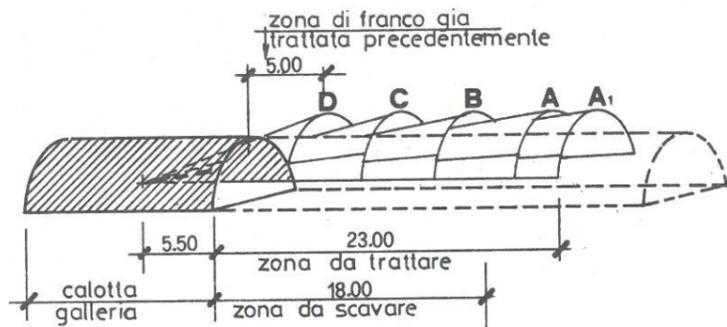
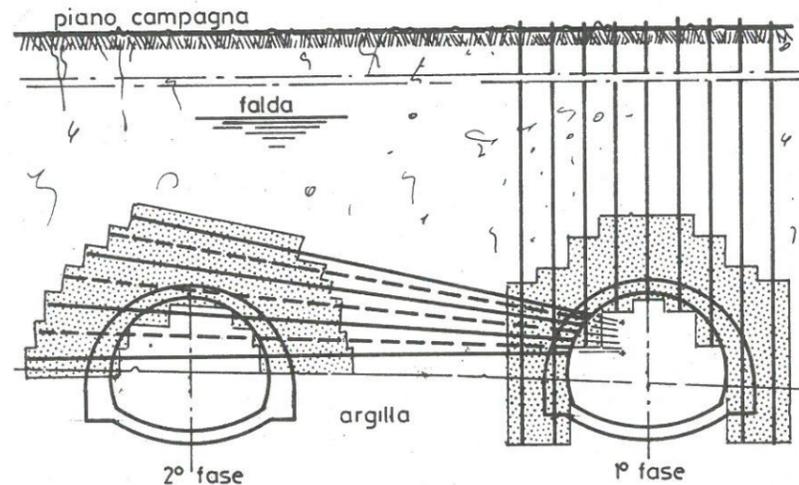


Fig. 5 - Trattamento conico suborizzontale in avanzamento: è il metodo classico per le grandi gallerie in terreni difficili

Fig. 6 - Altre possibilità offerte da casi particolari: ad esempio è qui esposto un trattamento combinato dalla superficie in prima fase, dalla galleria laterale in seconda fase.



Per un pozzo di fondazione in falda la geometria potrebbe essere la seguente

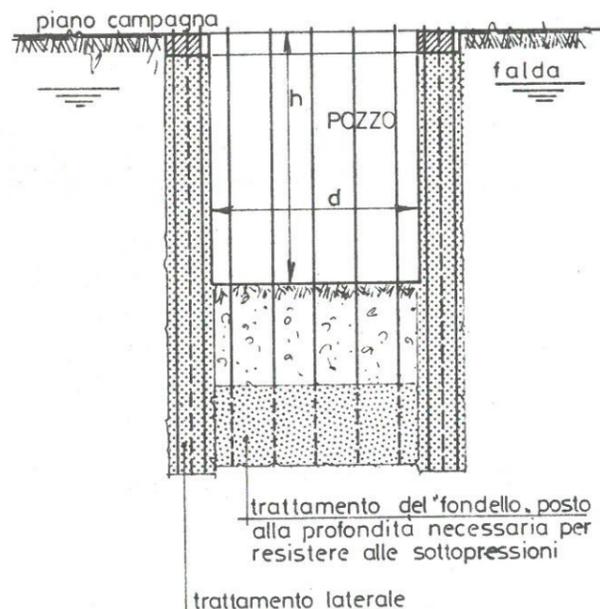


Fig. 7 - Trattamento tipico per consentire lo scavo all'asciutto di un pozzo in falda.

A questo punto, per definire in modo completo lo schema d'intervento, è necessario fissare l'interasse delle perforazioni. Tale parametro dipende dai seguenti fattori (a loro volta concatenati fra loro):

- grado di intensità del trattamento, sia esso di consolidamento o di impermeabilizzazione. A seconda del risultato da ottenere l'impregnazione dei vuoti del terreno può essere più o meno spinta
- tipi di miscele da impiegarsi per raggiungere l'obiettivo prefissato. Com'è noto, attraverso una determinata valvola d'iniezione, possono essere iniettate in successione varie miscele con caratteristiche differenti; dalle sospensioni a base di cemento, alle emulsioni, infine alle vere soluzioni aventi caratteristiche di bassissima viscosità
- composizione granulometrica e porosità del terreno al suo stato naturale.

Per quanto concerne i tipi di miscele ed il loro impiego in funzione delle caratteristiche del terreno espresse da

- curva granulometrica
- diametro efficace (d_{10})
- grado di disuniformità ($\frac{d_{60}}{d_{10}}$)
- superficie specifica dei grani

rimando interamente alla trattazione tenuta in questa sede dall'ing. Tornaghi.

L'interasse delle perforazioni (i) è pari a due volte il raggio d'azione (r) della miscela dedotto il "franco" (f) derivante dalla più o meno ampia sovrapposizione dei cerchi di diffusione dell'iniezione.

Supposto dunque che la miscela venga iniettata in un mezzo con caratteristiche omogenee

$$i = 2r - f$$

Generalmente il valore di f viene fissato tra 0,1 m e 0,25 m a seconda dell'importanza del trattamento.

Per raggio d'azione di un certo tipo di miscela si intende il percorso massimo che la miscela stessa è in grado di compiere attraverso i pori del terreno a partire dal punto d'iniezione (ad esempio da una valvola) senza che intervengano sensibili mutamenti nei confronti della disposizione reciproca fra i grani del terreno al suo stato naturale.

Il concetto di raggio d'azione dunque è strettamente legato ad un effetto d'impregnazione omogenea e regolare dei vuoti del terreno da parte della miscela, senza turbative dell'assetto granulometrico naturale e soprattutto senza sprechi dei fluidi d'iniezione. Per quanto concerne le sospensioni (miscele a base di cemento, oppure caricate con inerti) il raggio d'azione è inoltre legato alla capacità della miscela di non separare acqua (pressofiltrazione); in altre parole il raggio d'azione è pari al cammino percorribile dai granuli di cemento o carica inerte prima del loro arresto per "effetto arco"; l'utilizzo di un certo quantitativo di bentonite o fluidificante spesso favorisce la penetrazione dei granuli e di conseguenza aumenta il raggio d'azione.

Al di là del raggio d'azione, avendo a disposizione pompe di notevole potenza, è sempre possibile "forzare" la miscela, ma subentrano mutamenti sempre più sensibili nell'assetto degli elementi del terreno naturale, finché si vengono a creare delle vere e proprie rotture del suolo (fenomeno detto "claquage").

Le miscele, oltre il raggio d'azione loro proprio, corrono allora lungo le fessure suborizzontali di rottura e si disperdono in zone lontane non interessanti il masso oggetto del trattamento.

Ad eccezione di casi particolari in cui il "claquage" è voluto, è di capitale importanza condurre le iniezioni in modo che il raggio d'azione non venga mai superato e quindi non si rompa il terreno con conseguente perdita di miscela.

Di questo particolare problema si tratterà più oltre, nel paragrafo dedicato alle modalità esecutive delle iniezioni.

Per fissare il valore del raggio d'azione ed essere quindi in grado di definire in modo preciso l'interasse dei fori (geometria dell'intervento) è necessario conoscere

- la composizione del terreno, la sua permeabilità
- le miscele che si devono utilizzare per raggiungere lo scopo prefissato.

Attraverso accurati sondaggi e prove di permeabilità (generalmente di tipo Lefranc) è possibile risalire al valore ricercato, collegando fra loro i vari parametri desumibili da esami di laboratorio ed in situ; certamente in questa fase particolare l'esperienza acquisita in casi similari può assumere un peso non trascurabile ed indirizzare il progettista in modo più sicuro verso il valore di maggiore convenienza.

Nel caso di interventi di grande portata (ad esempio schermi d'impermeabilizzazione di dighe) si eseguono d'abitudine prove d'iniezione in situ.

3.1. IL PROGETTO - CONCLUSIONI

In definitiva una volta determinati i seguenti elementi

- forma del masso da trattare
- grado di consolidamento o di impermeabilizzazione da conferire al terreno
- tipi di miscele da impiegare
- raggio d'azione medio delle miscele stesse

è possibile la stesura del progetto dell'intervento, corredato da precise specifiche tecniche.

La previsione dei quantitativi, soprattutto per quanto riguarda gli assorbimenti, non è sempre facile: risulta tanto più aderente alle reali necessità quanto più precise sono le nozioni relative alle caratteristiche del terreno in questione.

In qualche caso la certezza della progettazione è tale da consentire che il lavoro venga offerto in termini forfettari, con garanzie di buona riuscita molto restrittive: ad esempio nelle alluvioni di Milano si è arrivati a "vendere" il trattamento di consolidamento ad una cifra prefissata per ogni metro cubo di masso consolidato, garantendo un grado di coesione superiore ai 20 Kg/cm^2 (rottura di campioni a compressione a libera espansione).

4. TECNOLOGIA E MODALITA' ESECUTIVE DELLE INIEZIONI NEI TERRENI

SCIOLTI

L'iniezione di un terreno non è generalmente operazione facile se la si vuole condurre in modo corretto e con quantitativi limitati di miscela.

Le difficoltà aumentano quando la porzione di elementi fini è preponderante (terreno "chiuso") ed in tutti i casi in cui nell'intorno vi siano opere da salvaguardare.

E' impossibile, a mio avviso, stabilire una regolamentazione precisa perchè ogni intervento presenta differenti caratteristiche ed implicazioni economiche, per cui il progettista elabora le specifiche che meglio si adattano ad ogni caso specifico.

Ad esempio qualche volta conviene di più insistere con quantitativi di miscela "povera", a base di cemento caricata con inerte, rischiando anche di provocare "claquage", a tutto vantaggio di minori quantitativi di miscela chimica; altre volte, in identico terreno, soprattutto quando si debba intervenire "garbatamente" per non rischiare di compromettere un'opera preesistente, è determinante riempire i vuoti più grandi con lo stretto indispensabile quantitativo di miscela "povera" e completare invece l'impregnazione con una miscela poco viscosa, ovviamente più costosa. Senza pretesa dunque di stabilire regolamentazioni precise o specifiche tecniche determinanti, prendo in esame qui di seguito gli elementi più importanti connessi con l'iniezione dei terreni sciolti nei casi più delicati, dove occorre operare con cautela per non provocare danni ad opere preesistenti.

4.1. LA CENTRALE D'INIEZIONE

Deve essere in grado di

- miscelare in modo idoneo i diversi componenti delle miscele previste
- registrare i quantitativi inviati da ciascun iniettore
- pompare ai vari fori secondo le pressioni e portate necessarie.

La complessità o meno di una centrale dipende soprattutto dai

tipi di miscele da iniettare.

La tendenza è oggi quella di automatizzare il più possibile le operazioni di preparazione e pompaggio, così da ridurre al minimo indispensabile l'intervento degli operatori.

Ho visto funzionare recentemente una centrale dotata di 10 iniettori con la presenza di due soli operai specializzati.

L'apparecchiatura che maggiormente ha contribuito al raggiungimento di questo obiettivo è il miscelatore-dosatore automatico di più componenti: così si può arrivare a regolare secondo dosi variabili e predeterminate l'afflusso in un unico miscelatore di fluidi diversi e costituire in modo preciso miscele fino a 4 componenti.

Lo schema in fig. 8 dà un'idea di centrale moderna capace di produrre contemporaneamente miscele cementizie e miscele chimiche.

In Italia ed in Europa in genere si utilizzano pompe a doppio pistone, i cosiddetti iniettori, caratterizzati da portate piuttosto limitate ($2 \div 3 \text{ m}^3/\text{ora}$ a pieno ritmo) e da alte prevalenze (alcuni arrivano a 120 atmosfere).

Negli Stati Uniti si usano anche pompe centrifughe aventi caratteristiche opposte: queste ultime comportano l'installazione di un circuito di riciclaggio della miscela e vengono impiegate solamente per sospensioni cementizie di bassa densità ($c/a = \frac{1}{4} \div \frac{1}{7}$).

4.2. I TUBI A VALVOLA (TUBE A MANCHETTES)

Rappresentano il sistema più moderno ed ormai universalmente adottato (ad eccezione dello "stage method") per iniettare un terreno sciolto.

Al termine della perforazione si pone in opera un tubo metallico o di plastica di diametro generalmente compreso tra $1" \frac{1}{8}$ e $1" \frac{1}{2}$, dotato di valvole di gomma "di non ritorno" poste ad intervalli di 33 o 50 cm (3 o 2 per metro).

La cavità anulare tra tubo valvolato e parete del foro viene riempita con una apposita sospensione di cemento e bentonite

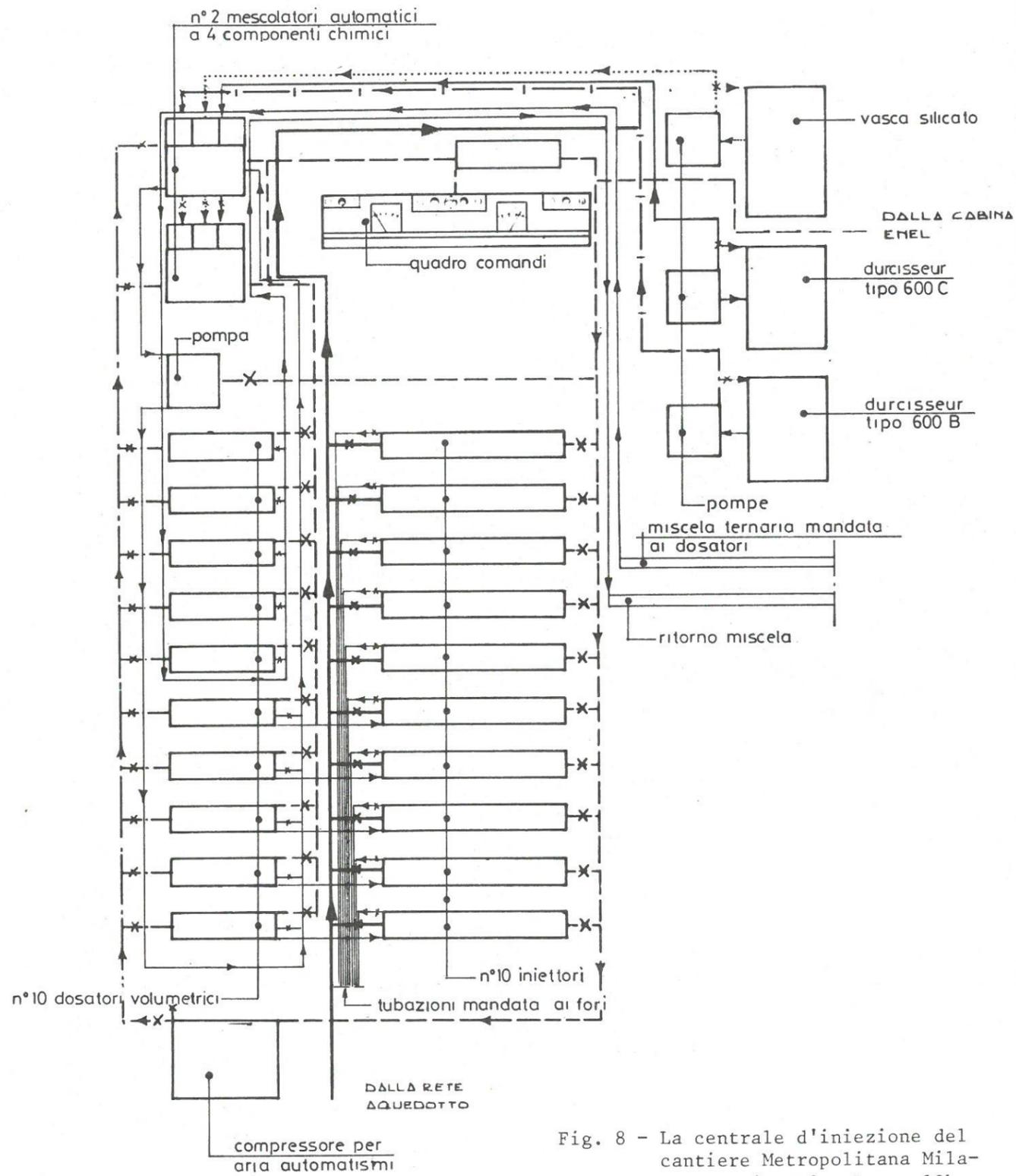


Fig. 8 - La centrale d'iniezione del cantiere Metropolitana Milanese - Linea 2 - Lotto 10b (Via Carducci).
Zona di miscelazione gel di silice e pompaggio di tutte le miscele.

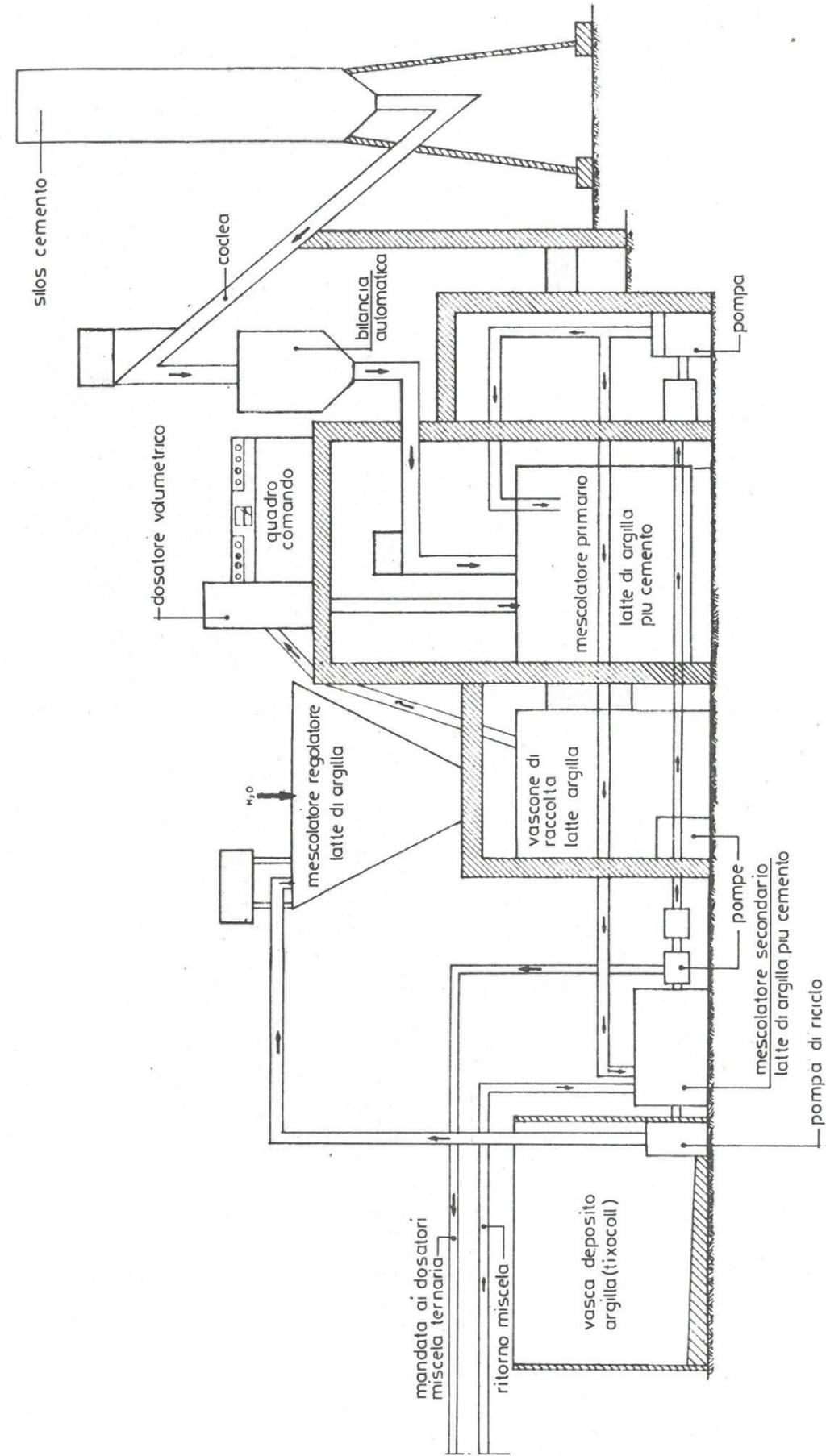


Fig. 8 - La centrale d'iniezione del cantiere Metropolitana Milanese - Linea 2 - Lotto 10b (Via Carducci).
Zona di preparazione miscela ternaria (cemento ed argilla).

detta "guaina", fatta risalire attraverso la valvola più profonda.

Nel caso di terreni molto aperti la guaina non raggiunge la parte più alta del foro perchè tende a disperdersi attraverso gli strati più permeabili: occorre quindi riprendere in più fasi la esecuzione della guaina stessa, facendo risalire mano mano il doppio otturatore finchè non si abbia la certezza che tutto il vano sia bene riempito.

La corretta esecuzione della guaina è basilare agli effetti della riuscita dell'iniezione: la guaina infatti ha come scopo prioritario quello di impedire la risalita della miscela lungo la tubazione, obbligandola invece ad interessare di volta in volta l'immediato intorno delle singole sezioni definite dalla posizione delle valvole.

Ne deriva un trattamento omogeneo di tutto il terreno interessato anche se esso è costituito da una sequela di strati di differente permeabilità.

La resistenza della guaina, dopo un certo tempo di maturazione, deve essere tale da impedire che la miscela iniettata in pressione la sospinga lungo il tubo, d'altra parte non può essere troppo alta perchè deve sempre consentire anche a distanza di tempo la rottura radiale entro un ragionevole limite di pressione applicato all'interno del tubo.

In generale si adotta un rapporto cemento/acqua attorno a 0,5 ed una dose di bentonite adeguata per rendere stabile la sospensione (decantazione trascurabile) e conferirle la necessaria fluidità.

Come risulta dalla fig. 9 i piccoli fori praticati nel tubo in corrispondenza di ogni sezione sono ricoperti da un manicotto di gomma (manchette) avente certe caratteristiche di resistenza che dilatandosi sotto pressione permette l'uscita della miscela ed in seguito ne impedisce il rientro.

L'iniezione viene eseguita isolando all'interno le singole sezioni con un doppio otturatore a calottine di cuoio o ad espansione.

Esistono oggi degli otturatori ad espansione oleodinamica che consentono operazioni di grande rapidità.

E' facilmente intuibile come l'avvento dei tubi a valvole abbia segnato una svolta decisiva per quanto riguarda il trattamento dei terreni sciolti: i vantaggi tecnici ed economici apportati

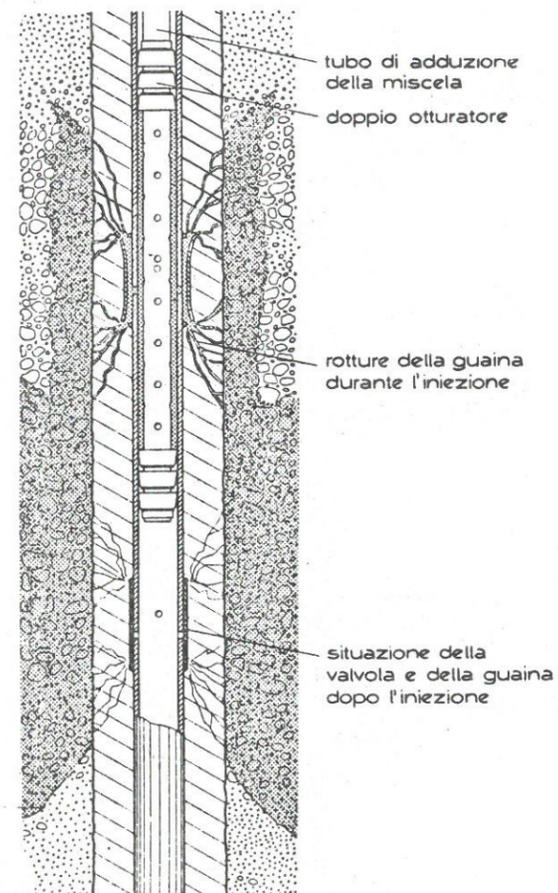


Fig. 9 - Schema di un tubo a valvole in fase d'iniezione

da questo sistema sono subito apparsi notevoli e si riassumono nella fattibilità di iniezioni a "volume controllato" (come si dirà più oltre) con qualsiasi sequenza di miscele differenti nei voluti intervalli di tempo. Questi dispositivi, se messi in opera accuratamente, rimangono funzionanti a lungo termine e rendono possibili con minima spesa interventi addizionali in caso di sottodimensionamento del trat-

tamento in fase progettuale.

4.3. LA CONDUZIONE DELL'INIEZIONE

In questo paragrafo cerco di riferire sulle modalità d'intervento e sulle specifiche che dovrebbero essere conferite al cantiere per la corretta introduzione delle miscele nel terreno. Si tratta della parte più importante dell'insieme di operazioni relative al trattamento di un terreno in quanto a nulla servirebbe avere a disposizione miscele ottimali, magari complesse e di alto pregio, se queste non venissero pompate nel suolo nel modo più idoneo, secondo sequenze precise, quantitativi, portate e pressioni stabilite in funzione della composizione granulometrica e della situazione specifica di ciascun caso (ad esempio presenza di opere preesistenti da salvaguardare nell'ambito del trattamento).

Senza l'attuazione di queste specifiche, qualche volta le iniezioni potrebbero essere fonte di "guai", qualche volta semplicemente di spesa eccessiva, per cui la loro azione benefica po-

tali da coprire grosso modo tutta la gamma di situazioni tipiche prevedibili: in questi fori "campione" il decorso dell'iniezione viene seguito con grande attenzione allo scopo di ricavare i dati voluti.

Il valore della pressione deve essere registrato con grande accuratezza, con manometri posti in prossimità della bocca-foro, eventualmente con manometri registratori.

Non è facile stabilire la reale pressione a causa del tipo di pompa che induce una variabilità nel flusso: è importante stabilire una metodologia d'interpretazione delle letture che sia identica per tutti i fori provati e prescindere dai colpi di pressione dovuti ai pistoni ed alle perdite di carico nelle tubazioni.

Si può arrivare così a stabilire in modo statistico l'evolversi della pressione in funzione della portata d'iniezione (velocità dell'iniettore).

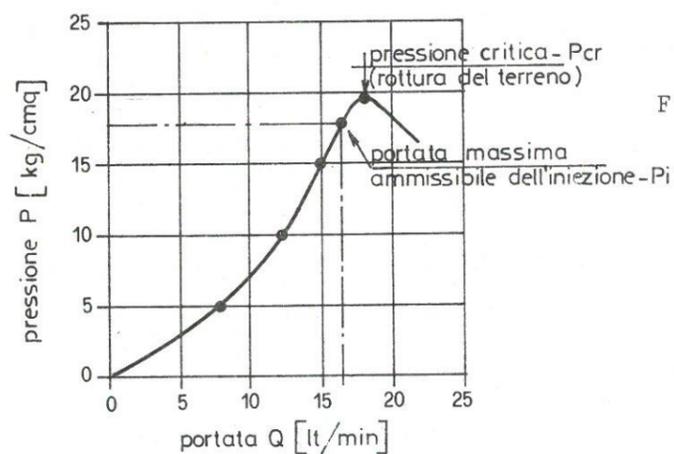


Fig. 10 - Decorso dell'iniezione in fori "campione" per stabilire la portata massima da imporre, in modo da non superare la pressione critica.

Il diagramma di fig. 10 è riportato a solo titolo esemplificativo: non vale dunque in termini quantitativi, ma esprime l'andamento tipico delle due funzioni in esame nel caso dei terreni sciolti.

E' ovvio che la rottura del terreno si verifica tanto più rapidamente quanto è maggiore la portata della miscela iniettata.

Per ottenere la massima penetrabilità di impregnazione sarebbe dunque necessario pompare a velocità molto basse, soprattutto nel caso di terreni a bassa permeabilità e di miscele di una certa viscosità.

La portata d'altra parte non può essere ridotta oltre un certo limite determinato da fattori d'ordine economico: si tende sempre a fissare valori che si situano attorno alla pressione critica di rifiuto.

A titolo esemplificativo riporto i valori delle portate di iniezione utilizzati in trattamenti abbastanza delicati eseguiti nelle alluvioni di Milano

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{per sospensioni cementizie } q = 450 \div 500 \text{ l/ora iniettore} \\ \text{per il gel di silice } q = 500 \div 600 \text{ l/ora iniettore} \end{array} \right.$$

Questo vale ovviamente per un terreno abbastanza "chiuso" dove la miscela a base di cemento ha difficoltà di penetrazione, ma deve essere comunque fatta penetrare per ridurre i costi.

4.3.2. QUANTITATIVI (VOLUMI) E PRESSIONI AMMISSIBILI D'INIEZIONE

Anche queste due funzioni sono interdipendenti.

In un terreno perfettamente omogeneo la miscela si diffonde in modo radiale attorno al punto d'iniezione ed il "cammino massimo" di impregnazione (raggio d'azione) dipende unicamente

- per le sospensioni: dalla capacità di penetrazione dei granuli di cemento o di altre sostanze, prima che si inneschi il fenomeno di "pressofiltrazione"
- per le emulsioni: dal più o meno veloce aumento della viscosità
- per le vere soluzioni: dal momento in cui interviene la polimerizzazione.

Dopodichè l'iniezione deve essere arrestata altrimenti l'assetto naturale del terreno verrebbe inutilmente sconvolto. Il quantitativo delle singole miscele sufficiente per stare al di sotto di questa soglia per i terreni omogenei può essere calcolato con buona approssimazione una volta note le caratteristiche granulometriche (ad esempio orizzonti sabbiosi

di notevole potenza).

Nel caso più frequente di terreni misti (alluvioni fluvio-glaciali) disposti secondo sottili strati eterogenei fra loro a differente permeabilità, è necessario ricorrere a sperimentazione in situ come descritto nel paragrafo precedente. Attraverso "fori campione" all'inizio delle operazioni d'iniezione si ricerca in modo statistico la pressione critica di "claquage" in funzione del quantitativo iniettato, in questo caso naturalmente mantenendo costante la portata del fluido in esame.

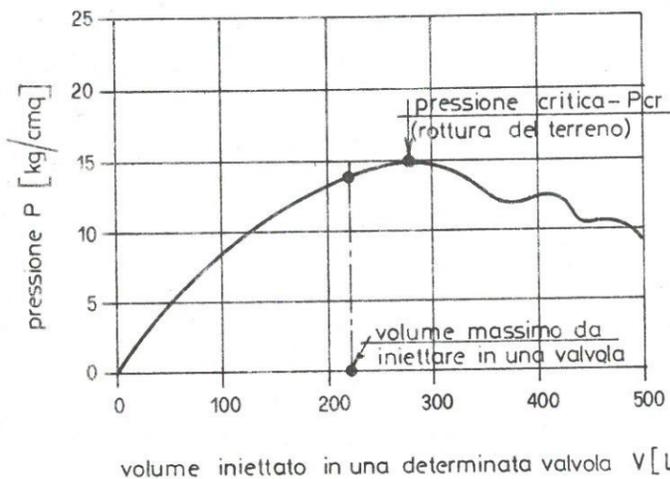


Fig. 11 - Decorso dell'iniezione in fori campione per stabilire il volume massimo per ogni valvola da imporre per non superare la pressione critica.

L'andamento tipico delle due funzioni è riportato in fig. 11. Dopo un certo quantitativo iniettato attraverso una determinata valvola il terreno si rompe, la miscela trova sfogo in uno strato a più alta permeabilità; a questo punto certamente il flusso non è più omogeneamente distribuito attorno al foro, ma si concentra nella zona della fessura che si è formata e tende a sfuggire.

Se l'iniezione viene proseguita le spinte agenti sulle pareti della fessura dove scorre la miscela diventano in breve spazio di tempo molto alte, insostenibili da parte del terreno circostante per cui subentra quasi subito un ulteriore "claquage" e così via.

E' ovvio che, eccettuati casi particolari, l'iniezione deve essere sospesa prima del raggiungimento della pressione critica.

4.3.3. CONCLUSIONI

Nei terreni eterogenei un trattamento di pura impregnazione è spesso difficile o comunque oneroso; si dovrà quindi ogni volta trovare un compromesso tra esigenze tecniche ed economiche.

Il fatto di avere stabilito un limite di pressione non comporta ovviamente la necessità di raggiungerlo sempre; sottolineo il fatto che nelle iniezioni dei mezzi porosi con sospensioni stabili o soluzioni chimiche, il primo e prioritario limite da definire è quello della quantità di miscela da iniettare in base al volume del terreno interessato dallo schema di trattamento.

4.3.4. CONDIZIONI PARTICOLARI SULLA CONDUZIONE DELLE INIEZIONI

La tecnologia d'intervento esposta in generale nei paragrafi precedenti deve essere adattata alle situazioni particolari. E' difficile che in questo genere di lavoro si presentino casi identici, tali da non dovere ricorrere a specifiche di dettaglio: le funzioni in gioco sono infatti numerose. Riporto qui di seguito un'elencazione di condizioni delle quali bisogna tenere conto nel corso delle iniezioni, senza pretesa di essere completo nella casistica.

- Geometria del trattamento: una volta stabilito e confinato il masso di terreno oggetto del trattamento, sarà determinata la geometria del trattamento in funzione del raggio d'azione delle miscele previste e delle posizioni dalle quali verranno eseguite le perforazioni.

Nel caso molto frequente di fori divergenti (non paralleli fra loro) come esemplificato nelle figure sottostanti nn.

12 - 13 - 14 sarà necessario differenziare il quantitativo

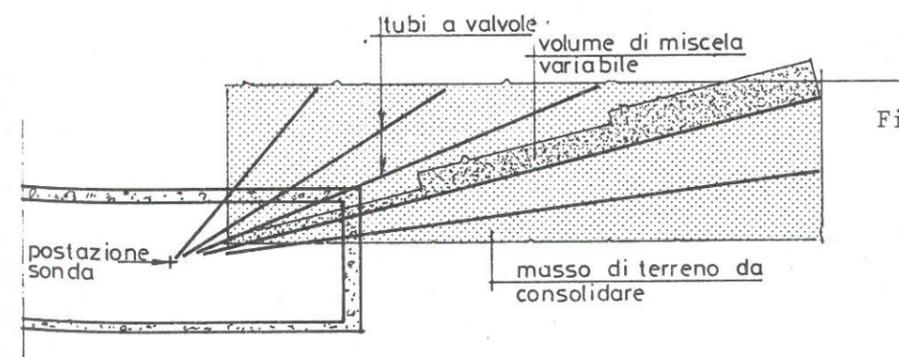


Fig. 12 - Consolidamento di galleria "ad avanzamento".

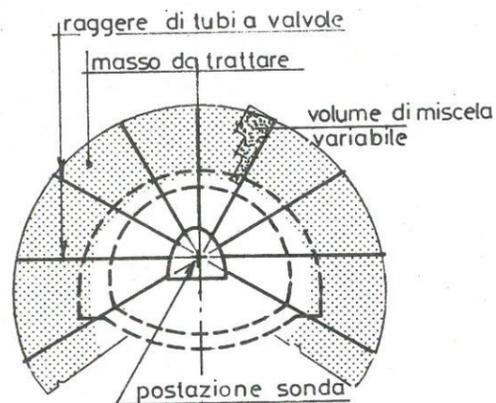


Fig. 13 - Consolidamento di galleria "radiale" mediante raggere da cunicolo

di miscela da iniettare attraverso le singole valvole per evitare inutili concentrazioni di miscela o, per contro, lacunosa impregnazione laddove i fori sono più lontani fra loro.

Tutto questo deve essere programmato in modo preciso e riportato dal capo cantiere sulla scheda relativa ad ogni singolo foro utilizzata dal responsabile della centrale di iniezione.

- Presenza di strutture in prossimità del masso da iniettare: si tratta di situazione sempre più frequente a causa delle molteplici applicazioni di iniezioni per opere sotterranee in zone fortemente urbanizzate.

I trattamenti comportano rischi di vario genere

- cedimento di strutture per decompressione del terreno causato ad esempio da operazioni di perforazione condotte male

- sollevamenti di strutture per sottospinte originate da iniezioni eseguite in modo non idoneo (eccessivi quantitativi, pressioni troppo alte)

- vere e proprie rotture di opere preesistenti per ragioni simili a quanto sopra riferito.

E' indispensabile in questi casi adottare tutte le cautele

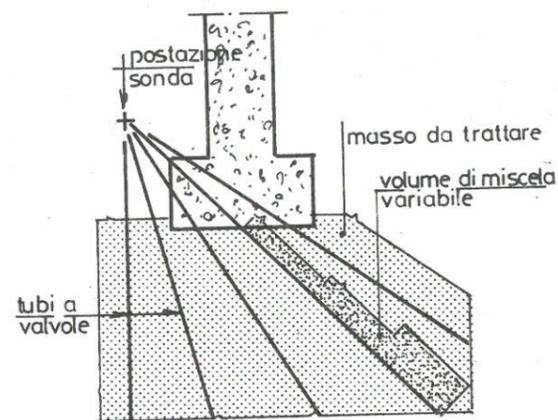


Fig. 14 - Consolidamento terreno di sottofondazione di un edificio

per evitare i possibili danni: indico qualche accorgimento raccomandabile e già sperimentato con successo.

a) Per quanto concerne le perforazioni bisogna procedere con i tubi di rivestimento ed eseguire la "guaina" immediatamente, in fase di ritiro dei tubi stessi di rivestimento, ovviamente dopo avere messo in opera il tubo a valvole; oppure, se i fori sono abbastanza corti, risulta conveniente procedere con sistemi a distruzione di nucleo (tipo "down the hole") facendo circolare fanghi molto pesanti o la miscela stessa di guaina (sistema utilizzato alla Metropolitana di Milano in fori verticali, eseguiti dalla superficie).

b) Per quanto concerne le iniezioni devono essere accuratamente calcolati sia i quantitativi massimi di miscela da mettere in opera, sia le pressioni d'iniezione compatibili con la stabilità delle opere da salvaguardare. Presupposto indispensabile, come è ovvio, è la perfetta conoscenza del tipo di terreno ed anche delle condizioni in cui si trovano le strutture preesistenti. Il metodo d'intervento a "volume controllato" deve essere in questi casi applicato in modo rigoroso; inoltre, come precauzione addizionale, i quantitativi di miscela devono venire messi in opera secondo portate molto basse ed in fasi successive in modo da ridurre al minimo le spinte trasmesse alle strutture.

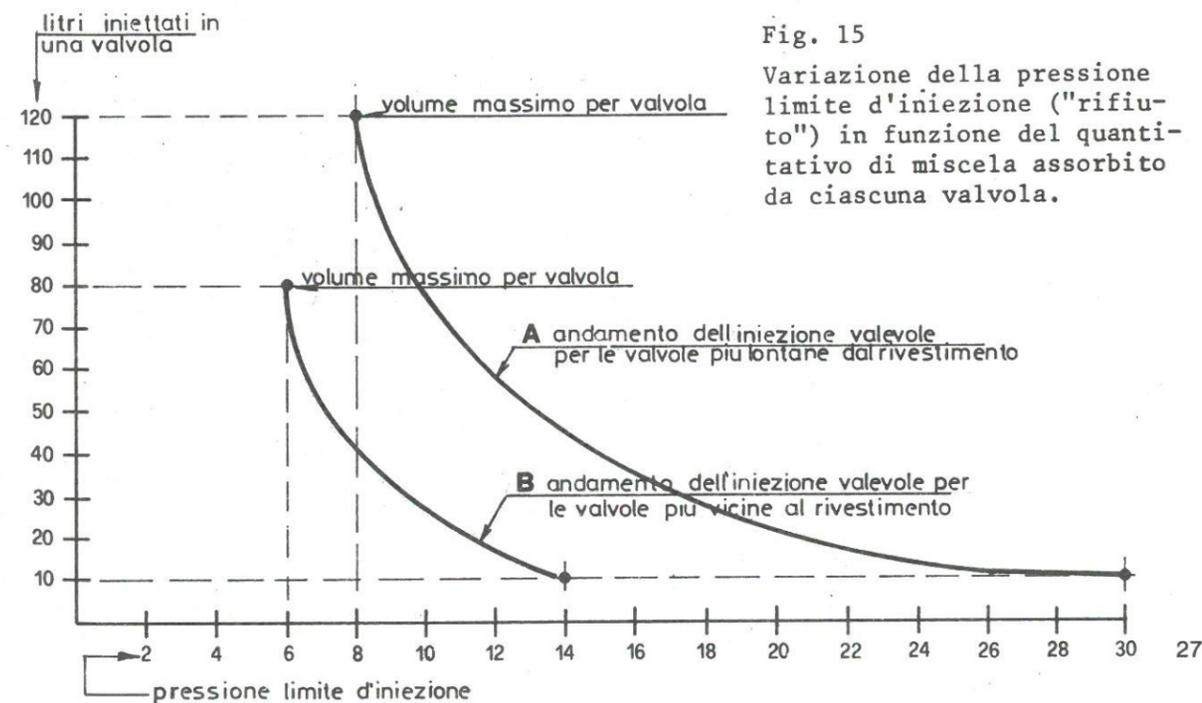


Fig. 15
Variazione della pressione limite d'iniezione ("rifiuto") in funzione del quantitativo di miscela assorbito da ciascuna valvola.

A titolo esemplificativo riporto i diagrammi di figura 15 che riassumono le prescrizioni imposte relativamente ad un intervento da eseguirsi attorno ad una galleria disastata da ripristinare.

Il trattamento è riportato in figura 16.

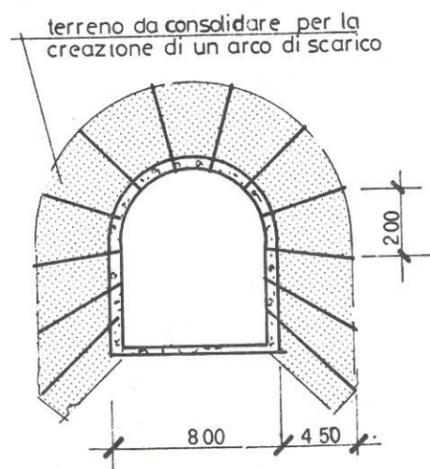


Fig. 16 - Schema del trattamento a raggere attorno al rivestimento disastato di una vecchia galleria. Il rivestimento è stato ricostruito ed in parte completamente rifatto.

Data la precaria stabilità del rivestimento della galleria si è dovuto

- 1) differenziare i volumi massimi da iniettare in ciascuna valvola in funzione della geometria
- 2) stabilire il decorso dell'iniezione in ciascuna valvola facendo diminuire la pressione massima ammessa con l'aumentare del volume introdotto nella valvola stessa (curva A)
- 3) introdurre una speciale regolamentazione con pressioni ridotte per le valvole più prossime al rivestimento disastato (curva B)

Solamente in questo modo è stato possibile creare l'arco di terreno resistente senza imporre sensibili spinte al rivestimento e quindi eliminare ogni pericolo di crollo.

4.4. CONTROLLO DEI MOVIMENTI

In cantieri cittadini, dove la probabilità di provocare movimenti nell'ambito delle fondazioni di fabbricati appariva notevole con rischi conseguenti, sono state messe in opera apparecchiature particolari capaci di rilevare in modo continuo gli spostamenti delle fondazioni.

Cito ad esempio l'intervento realizzato dalla MM per la realizzazione di una linea a triplo binario in Corso Garibaldi alla confluenza con Piazza XXV Aprile: la larghezza dello scavo raggiunge qui ben 13,50 m.

Altro caso a Parigi nel corso della realizzazione della famosa

stazione di "rue Auber", dove le apparecchiature assestometriche erano anche collegate ad un sistema d'allarme sonoro. La presenza di queste apparecchiature non ammette tuttavia una riduzione delle precauzioni da adottare per evitare danni: rappresenta una sicurezza in più e soprattutto consente di calibrare ancora meglio la tecnologia d'intervento.

5. ESEMPI D'INTERVENTI D'INIEZIONE IN TERRENI SCIOLTI

In questo capitolo illustro in modo molto schematico alcuni fra i principali interventi d'iniezione, cercando di spaziare il più possibile nel vasto campo d'applicazione di questa tecnica.

5.1. SBARRAMENTI IDRAULICI

Possiamo dire che la tecnica delle iniezioni ha cominciato a svilupparsi una cinquantina d'anni fa proprio in concomitanza del diffondersi degli impianti idroelettrici ricavati in situazioni idrogeologiche sempre più difficili.

Gli schermi impermeabili realizzati con tecnologie d'iniezione sempre più evolute hanno reso possibile lo sfruttamento di bacini ubicati nelle ampie vallate colmate di alluvioni fluvio-glaciali di notevole potenza: in epoca precedente gli sbarramenti dovevano necessariamente poggiare su formazioni rocciose.

Gli schermi per grandi dighe costituiscono il più importante campo applicativo di iniezioni con funzione d'impermeabilizzazione permanente nel tempo.

Riporto qui di seguito alcuni schemi di dighe, facendo rimarcare qualche caratteristica peculiare degli schermi impermeabili relativi (vedere fig. 17).

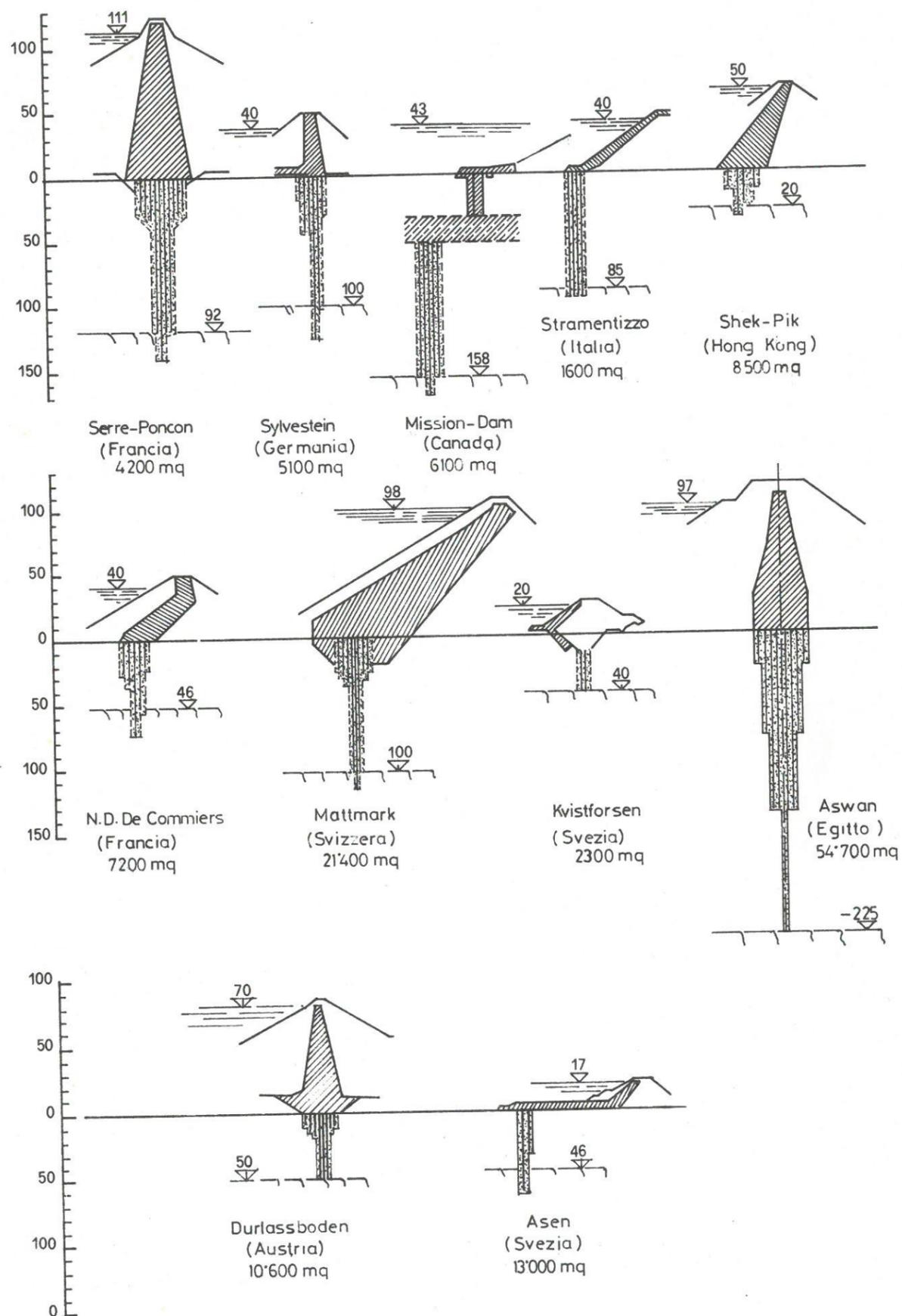


Fig. 17 - Alcuni schermi impermeabili eseguiti in terreni sciolti per l'impermeabilizzazione di sbarramenti idraulici.

Come si può notare gli schermi sono sempre costituiti da più file di fori ed il loro spessore, soprattutto nella zona più superficiale, aumenta con l'altezza del carico idraulico. In generale la zona trattata al contatto con il nucleo impermeabile ha una larghezza pari ad $\frac{1}{3} \div \frac{1}{4}$ dell'altezza dell'invaso.

In tutte le dighe prese in esame le iniezioni sono state condotte in modo da ridurre il coefficiente di permeabilità K a valori compresi entro 10^{-4} e 10^{-5} cm/sec.

Tale obiettivo è stato raggiunto con tecnologie differenti ed iniettando miscele di vario tipo in funzione delle caratteristiche specifiche delle formazioni di terreni sciolti da impermeabilizzare.

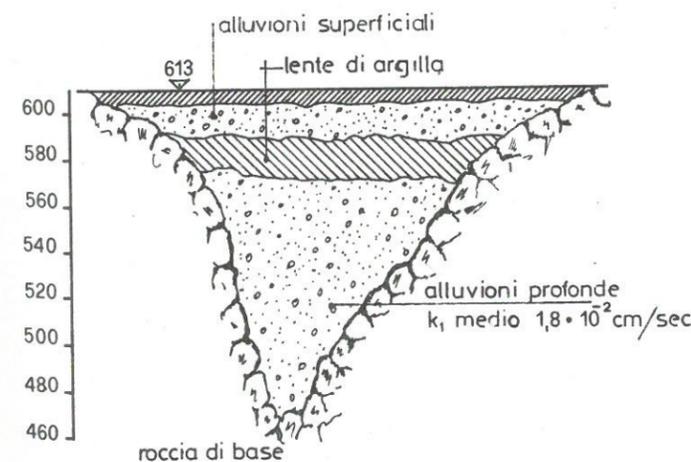
Il grado di impermeabilità voluto si raggiunge con relativa facilità, utilizzando sospensioni cementizie, quando la permeabilità naturale del terreno è alta (K dell'ordine di 10^{-1} cm/sec); più delicato e certamente costoso è il trattamento di un terreno "chiuso" con permeabilità iniziale inferiore ($K = 10^{-2} \div 10^{-3}$ cm/sec).

La presenza nel terreno di sensibili percentuali di frazione fina impone l'utilizzo di miscele più penetranti, oltre al trattamento di prima fase eseguito con cemento: infatti per i noti motivi le sospensioni cementizie in questi casi riempiono i vuoti più grossi, dopodichè tendono a provocare "claquages" senza più influire sulla permeabilità.

L'abbattimento decisivo del grado d'impermeabilizzazione desiderato si ottiene appunto iniettando (attraverso le file più centrali dello schermo) miscele poco viscosi.

A questo proposito significativo è quanto si è verificato nel corso della realizzazione dello schermo della diga

"Mission o Terzaghi" sul "Bridge River" in Canada. Come mostra la fig. 18 si tratta di una diga in terra alta 60 m, impostata su depositi alluvionali permeabili che, dopo un passaggio orizzontale argilloso, si immergono fino a 150 m di pro-



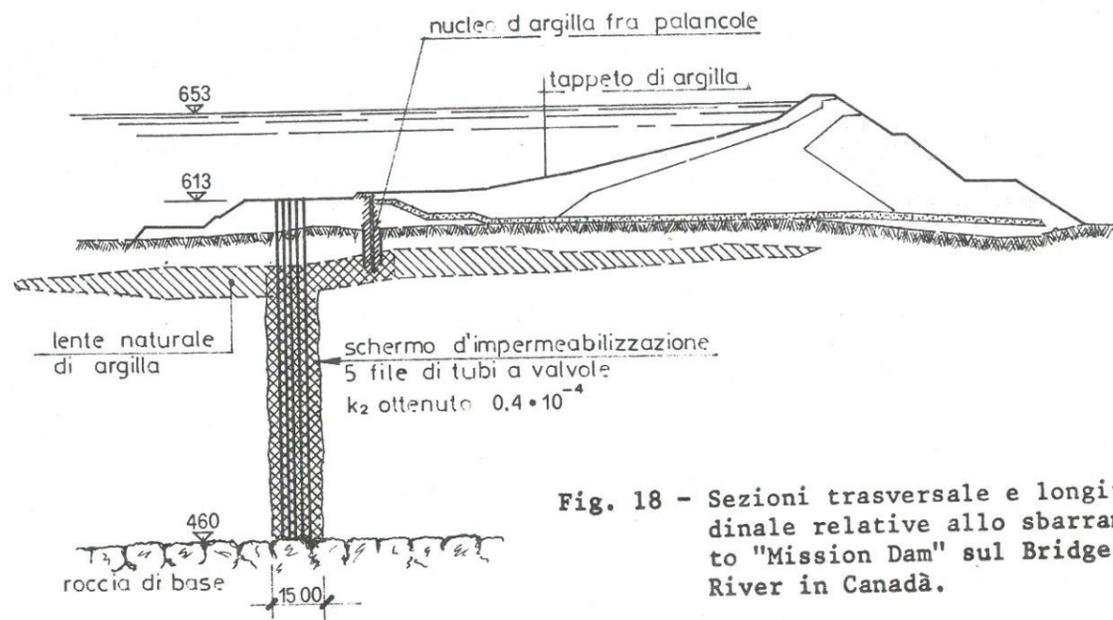


Fig. 18 - Sezioni trasversale e longitudinale relative allo sbarramento "Mission Dam" sul Bridge River in Canada.

fondità.

La diaframmatrice, spessa 15 m e spinta fino alla roccia di base, è stata ottenuta mediante iniezioni argilla-cemento e argilla trattata chimicamente, attraverso 5 file di fori equipaggiati con tubi a valvole.

La permeabilità media delle alluvioni prima del trattamento era pari a $1,8 \cdot 10^{-2}$ cm/sec (qualche passaggio più permeabile faceva registrare valori di $1,8 \cdot 10^{-1}$ cm/sec).

Attraverso il rilevamento giornaliero dei livelli d'acqua in piezometri posti a monte ed a valle dello schermo, è stato possibile verificare il progressivo miglioramento del grado d'impermeabilizzazione in funzione dei quantitativi di miscela iniettati.

La progressione è molto regolare come mostra la fig. 19.

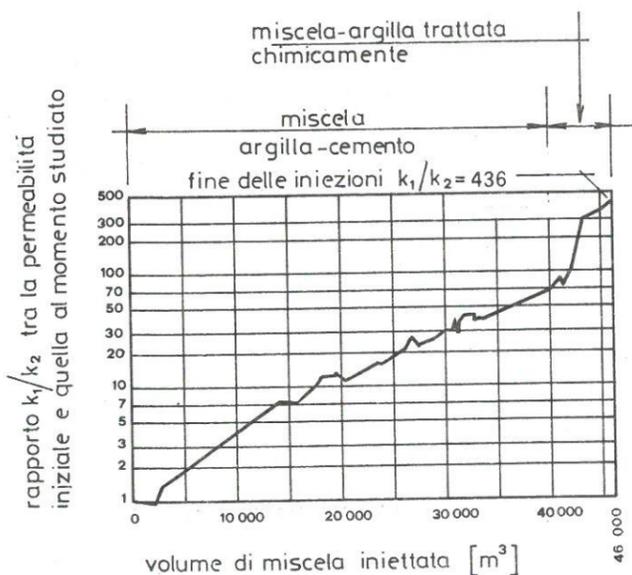


Fig. 19 - Risultati raggiunti mano a mano con il procedere delle iniezioni.

Sono stati ottenuti i seguenti risultati

Permeabilità K	Dopo L'iniezione di
$2,5 \cdot 10^{-4}$ cm/sec	40.000 m ³ di miscela argilla+cemento
$0,4 \cdot 10^{-4}$ cm/sec	Incremento di 6.640 m ³ di argilla deflocculata e stabilizzata

Si possono trarre le seguenti conclusioni:

- il valore della permeabilità finale ottenuta è pari al valore iniziale diviso per 436. Si tratta di un risultato rimarchevole
- l'abbattimento drastico e definitivo della permeabilità è stato ottenuto mediante l'iniezione di un quantitativo abbastanza modesto (il 14% del volume totale iniettato) di una miscela molto penetrante a base di argilla, silicati e fosfati.

Sempre riguardo al campo degli schermi d'impermeabilizzazione riporto qualche dato relativo alla diga di Mattmark: si tratta di un esempio a mio parere molto significativo, sia per l'ampiezza dei terreni sciolti trattati (21.500 m² di superficie; 516.000 m³ di volume di terreno coinvolto dalle iniezioni), sia per le miscele impiegate ed i risultati ottenuti.

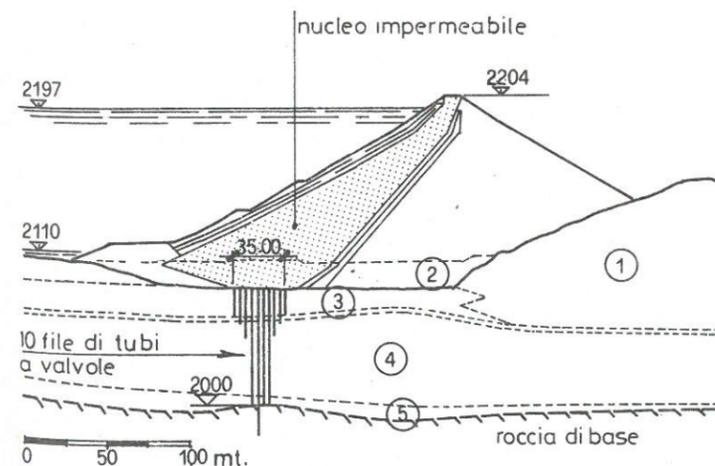


Fig. 20 - Mattmark. Sezione trasversale della diga e schermo impermeabile.

Le figure nn 20-21-22 riportano rispettivamente la sezione trasversale e longitudinale dello sbarramento e le caratteristiche dei terreni incoerenti sui quali appoggia la diga. In questo caso lo schermo è stato realizzato al solo scopo di tenuta idraulica: infatti esso non sarebbe stato al limite necessario per garantire la stabilità della diga.

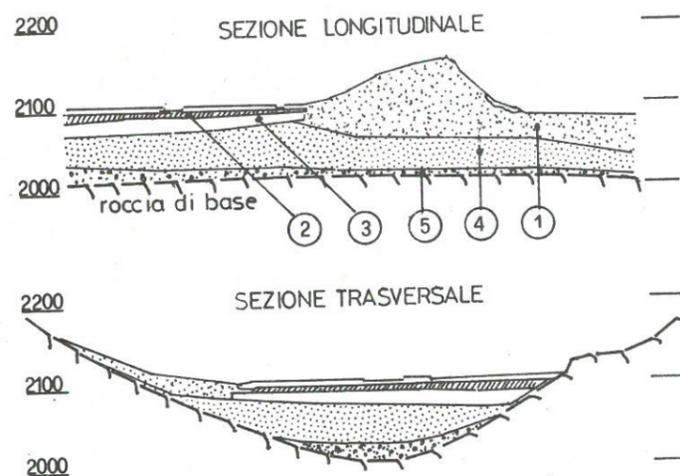


Fig. 21 - Mattmark. Sezione geologica della valle in corrispondenza dello sbarramento.

- 1 Morena laterale
- 2 Sedimenti lacustri
- 3 Depositi alluvionali fluvio glaciali
- 4 Morena Wurmiana
- 5 Formazioni pre-Wurmiane

$$K = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

$$K = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ "}$$

$$K = 10^{-2} \div 10^{-3} \text{ "}$$

$$K = 10^{-1} \div 10^{-2} \text{ "}$$

$$K = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ "}$$

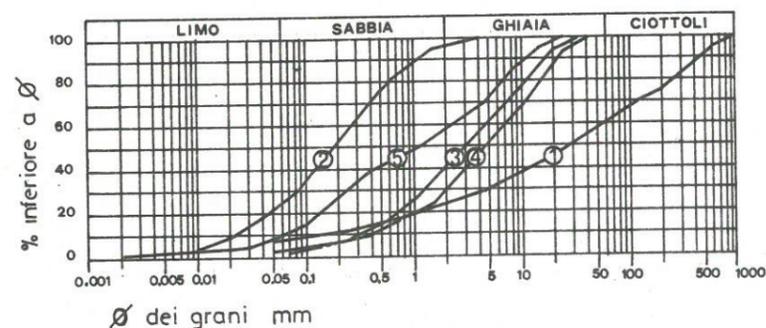


Fig. 22 - Mattmark. Curve granulometriche relative ai vari depositi di fondazione della diga.

Le perdite calcolate attraverso la sezione di imposta, nel caso di non trattamento, sarebbero state di $1 \div 1,5 \text{ m}^3/\text{sec}$ ($20 \div 30$ milioni di m^3/anno , pari al 25% dell'invaso ed a 80 milioni di KWh).

I terreni da iniettare si presentavano mediamente più "chiusi" di quelli, prima esaminati, della diga "Mission"; le permeabilità iniziali più basse hanno reso le iniezioni più difficili ed hanno richiesto una differente ampiezza dello schermo e l'utilizzo di miscele e tecnologie più sofisticate.

Lo spessore dello schermo nella zona più superficiale, al contatto con il nucleo impermeabile, è stato ampliato a ben 35 m (1/3 circa dell'altezza dello sbarramento).

Qui le file di fori sono 10 distanti 3.50 m l'una dall'altra, mentre l'interasse dei fori disposti a quinconce è di 3.00 m. Come mostra il disegno le file diminuiscono mano mano con la profondità fino a ridursi a 4 al contatto con la roccia di base.

Tutti i fori sono equipaggiati con tubi a valvole.

Le iniezioni sono state condotte in due fasi successive con due tipi di miscela, delle quali riporto qui di seguito i quantitativi di prodotti per m^3

I ^a FASE		II ^a FASE	
Acqua	850 Kg	Acqua	950 Kg
Argilla	300 Kg	Bentonite	100 Kg
Cemento	80 Kg	Silicato	16 l
Silicato	12 l	Fosfato	14 Kg

Tali miscele, come mostra la figura n. 23, sono state distribuite nell'ambito dello schermo tenendo conto

- della posizione trasversale: nelle file più esterne si è iniettato un maggiore quantitativo di miscela a base di cemento, mentre nelle file centrali si è inviato (in II^a fase) un volume decisamente alto di miscela fluida

- della profondità: è stato aumentato il quantitativo di miscela fluida in corrispondenza degli strati meno permeabili.

Il quantitativo medio di miscela iniettata al termine del trattamento è risultato pari a

$$\underline{3,7 \text{ m}^3/\text{m di foro}}$$

Avendo ogni foro un'area d'influenza di $10,5 \text{ m}^2$, l'assorbimento medio è stato

$$\underline{0,35 \text{ m}^3 \text{ di miscela}/\text{m}^3 \text{ terreno iniettato}}$$

Questo valore è abbastanza congruente con la porosità del terreno al suo stato naturale compresa tra il 30% ed il 35%, tenuto conto del fatto che le miscele in fase d'iniezione (soprattutto quella a base di cemento) hanno subito una notevole perdita di volume per effetto di pressofiltrazione (pressione d'iniezione

Quote assolute delle successive porzioni di schermo	Numero di file d'iniezione				
	0,9 ^a	1 ^a .8 ^a	2 ^a .7 ^a	3 ^a .6 ^a	4 ^a .5 ^a
	m ³ di miscela per m di foro				
I^a Fase: miscela di cemento/argilla					
2090 - 2070	3	1,5	3	-	-
2070 - 2065	-	3	3	-	-
2065 - 2055	-	-	3	1,5	-
sotto 2055	-	-	-	3	1,5
II^a Fase: miscela di bentonite/silicato					
2090 - 2070	1,5	1,5	1,5	3	3
2070 - 2065	-	1,5	1,5	3	3
2065 - 2055	-	-	1,5	1,5	3
sotto 2055	-	-	-	1,5	3

Fig. 23 - Mattmark. Distribuzione delle due miscele d'iniezione in funzione della posizione nell'ambito del corpo dello schermo.

20 ÷ 25 atmosfere).

Il coefficiente di permeabilità medio al termine del trattamento è risultato

$$K = 3 \cdot 10^{-5} \text{ cm/sec}$$

Uno schermo impermeabile che riveste grande interesse è quello della diga di Aswan: gli approfonditi studi preliminari hanno evidenziato con buona precisione la complicata composizione dei terreni sciolti che per ben 225 m di profondità riempiono l'incisione alluvionale della valle del Nilo.

La figura n. 24 mostra la sezione geologica.

La figura n. 25 riporta le composizioni granulometriche dei vari tipi di depositi alluvionali.

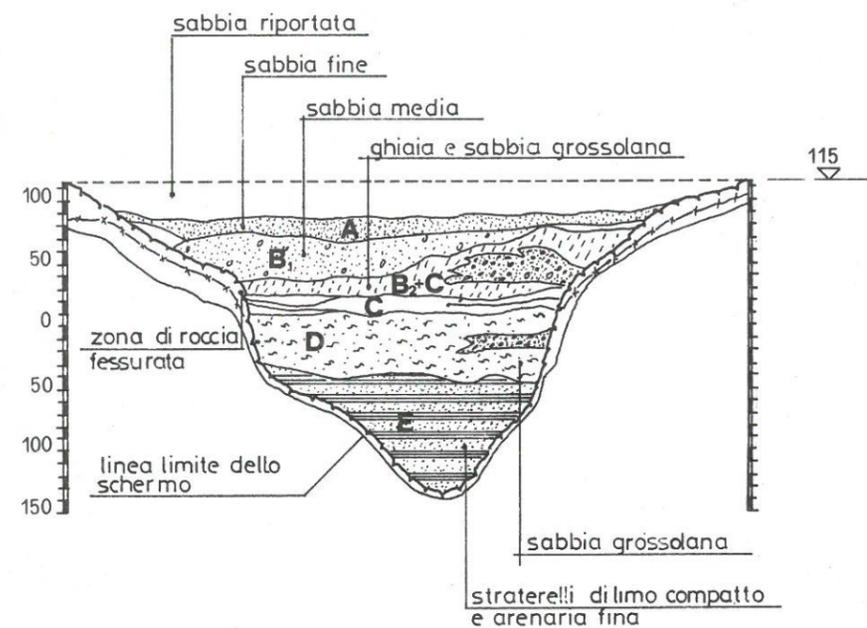


Fig. 24
Aswan. Sezione geologica che mostra i terreni di riempimento dell'incisione valliva in corrispondenza della diga.

Le permeabilità delle varie formazioni dei terreni sciolti sono le seguenti:

$$A = 5,5 \cdot 10^{-3} \div 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm/sec}$$

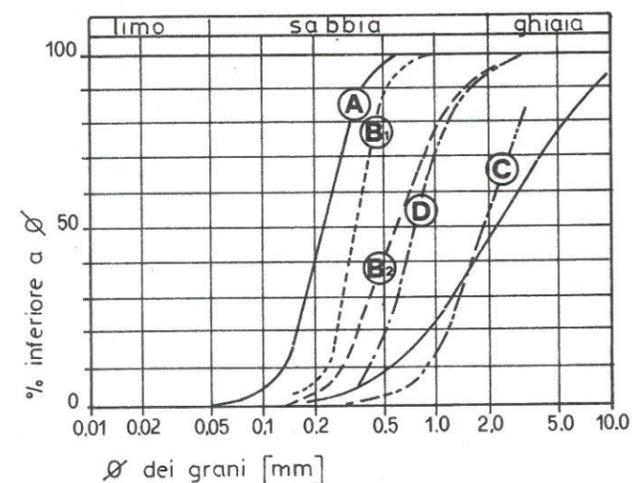
$$B_1 = 1,1 \div 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ "}$$

$$B_2 = 2,3 \cdot 10^{-2} \div 1,1 \cdot 10^{-1} \text{ "}$$

$$C = 5,5 \cdot 10^{-2} \div 1,1 \cdot 10^{-1} \text{ "}$$

$$D = 2,3 \div 7 \cdot 10^{-2} \text{ "}$$

$$E = 4,5 \cdot 10^{-4} \div 7 \cdot 10^{-3} \text{ "}$$



Aswan. Distribuzione granulometrica delle alluvioni nell'ambito dello schermo d'iniezioni.

Lo schermo realizzato è rimarchevole per ampiezza (54.700 m²) e per volume di terreno trattato (1.800.000 m³).

La larghezza della zona trattata nella parte più superficiale, al contatto con il nucleo impermeabile è di 40 m (altezza del-

la diga 111 m) realizzata con 8 file di fori interassati di 2.50 m; la distanza tra le file è di 5.00 m. Le file diminuiscono in profondità e lo schermo assume una larghezza di 30 m, di 20 m, ed infine lungo gli ultimi 100 m di 5 m fino all'incontro con la roccia di base. Questa zona più profonda ha permeabilità bassa (inferiore a 10^{-3} cm/sec) essendo costituita da straterelli d'argilla frammentati a sabbia ed arenaria a grana fine. I fori sono stati tutti equipaggiati con tubi a valvole. Le iniezioni sono state condotte seguendo specifiche ben precise, secondo il metodo "a volume controllato". La pressione limite variava da 30 atmosfere fino a 60 atmosfere nelle zone più profonde. E' interessante l'utilizzo di svariati tipi di miscele in stretto legame con il diametro efficace (D_{10}) di ogni formazione sedimentaria. Riporto qui di seguito in figura n. 26 una tabella che riassume appunto le composizioni delle miscele utilizzate in funzione del D_{10} .

MATERIAL	GROUTS FOR OUTER ROWS OF HOLES ACCORDING TO EFFECTIVE GRAIN SIZE D_{10} OF SOIL					GROUTS FOR FINALIZING INNER ROWS OF HOLES ACCORD. TO EFFECTIVE GRAIN SIZE D_{10} OF SOIL			
	Bentonite silicate grouts		Cement-clay grouts			Silicate grouts	Bentonite-silicate	Clay-silicate grouts	
	0.07 to 0.14 mm	0.14 to 0.21 mm	0.21 to 0.30 mm	0.30 to 0.55 mm	0.55 to 0.85 mm	0.7 to 0.21 mm	0.7 to 0.55 mm	0.21 to 0.55 mm	0.55 to 0.85 mm
Cement			93	125	125	for Layer E			
Aswan Clay			360	415	495		81	570	615
Bentonite	160	190				435	256	41	44
Silicate	1.6	1.9				14	9.1		
Sodium Aluminate			4.8	2.1	2.5			2.9	3.1
Hexametaphosphate						685	785	760	745
Water	940	915	840	810	780				

Fig. 26 - Composizione delle miscele per l'iniezione dei differenti orizzonti alluvionali presenti sotto la diga (in Kg per m³ di miscela). (Tratto dal rapporto di Taber Abu Wafa e Aziz H. Labib presentato al 9° Congresso delle Grandi Dighe - Istanbul, 1967)

Come si può notare per gli orizzonti di sabbie fini sono state impiegate miscele a base di bentonite-silicato in prima fase, di silicati puri nella seconda fase, per la chiusura finale dei vuoti più piccoli. Per gli orizzonti più grossolani e permeabili sono state utilizzate miscele a base di cemento-argilla in prima fase e di

argilla stabilizzata in seconda fase.

Come agente deflocculante (per assicurare la "disintegrazione" delle particelle e quindi ridurre la viscosità della miscela) è stato aggiunto ad argilla e bentonite un certo quantitativo di hexametaphosphato di sodio.

L'alluminato di sodio invece ha agito come indurente per le miscele di silicato.

Il lavoro si è concluso con soddisfazione: la permeabilità residua è stata ridotta ovunque ai valori di $K = 10^{-4}$ cm/sec.

5.2. SCAVI A CIELO APERTO

Le iniezioni possono essere utilizzate per rendere possibili o comunque facilitare scavi all'aperto in terreni sciolti, quali grandi sbancamenti e profondi scavi a pozzo; questi scavi sono da effettuarsi generalmente in condizioni difficili, spesse volte in falda.

In questi casi i trattamenti d'iniezioni sostituiscono od integrano altri sistemi, tipo palificazioni, paratie, congelamento, palancolate, abbassamenti di falda, che per vari motivi sia esecutivi che economici non possono risolvere il problema.

Le iniezioni, a seconda dei casi, assumono funzione d'impermeabilizzazione o di consolidamento del terreno: frequentemente devono avere caratteristiche tali da soddisfare contemporaneamente questi scopi.

In particolare, quando vi è presenza d'acqua è sempre conveniente fare loro assumere la doppia funzione: sarebbe infatti illogico ed antieconomico impermeabilizzare le pareti di un pozzo profondo senza conferire il grado di consolidamento necessario per eseguire lo scavo libero senza particolari strutture di rinforzo.

Un esempio tipico d'intervento è esposto in figura n. 27; si tratta della creazione di un guscio anulare impermeabile e resistente per consentire la creazione di un pozzo di fondazione a sostegno di una pila di viadotto.

La piastra base può appoggiarsi direttamente sulla roccia se questa si trova ad una ragionevole distanza dal piano di lavoro, oppure sul terreno alluvionale trattato per un certo spessore

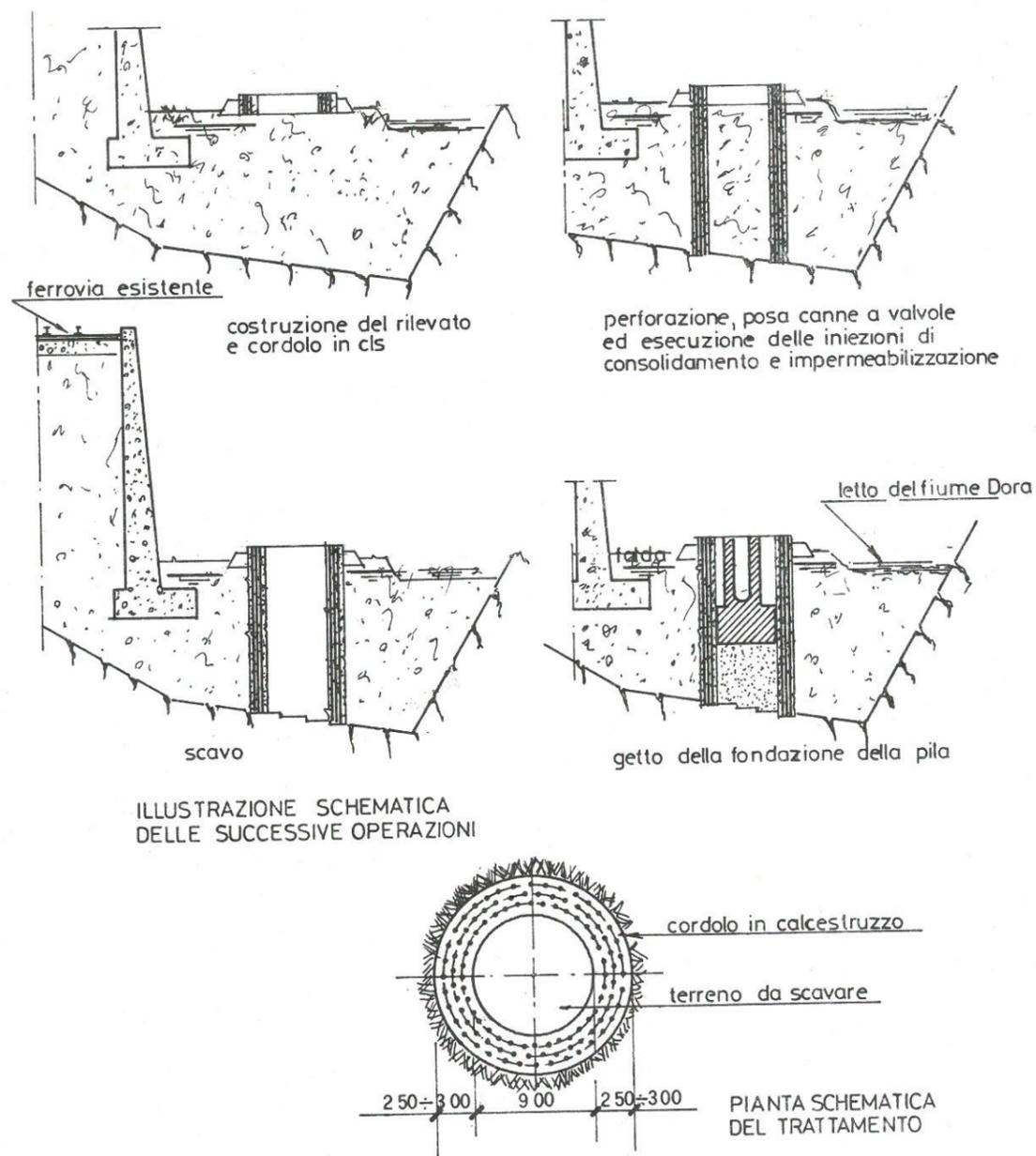


Fig. 27 - Le varie fasi di un intervento tipo d'iniezioni per lo scavo di un pozzo in falda. Questa situazione particolare si è ritrovata in corrispondenza di una pila del viadotto Montjovet (Autostrada Quincinetto-Aosta).

("fondello").

Le iniezioni devono conferire al terreno il grado di coesione indispensabile per la stabilità con buona sicurezza delle pareti dello scavo nel corso dei lavori.

E' evidente che la disposizione reciproca dei fori ed i tipi di miscela da utilizzare dipendono soprattutto dalla composizione granulometrica del terreno in questione.

Alla luce dei risultati dei molti interventi di questo tipo

fin'ora eseguiti, posso tuttavia esprimere alcune considerazioni d'ordine generale.

Uno scavo cilindrico di diametro superiore a 5 m e profondo in falda 10 m ed oltre, può essere eseguito all'asciutto senza rivestimenti di rinforzo, naturalmente con buon coefficiente di sicurezza, se si adottano i seguenti accorgimenti:

- realizzazione di uno schermo laterale costituito da 3 corone di fori d'iniezione equipaggiati con tubi a valvole. Le due corone laterali dovranno essere iniettate per prime, generalmente con miscele cementizie, in modo da creare una tenuta nei confronti delle miscele successivamente immesse a pressione maggiore attraverso la corona centrale
- la corona centrale di fori verrà iniettata in prima fase con miscela di cemento-bentonite, in seconda fase con una miscela a base di silicato di sodio: a meno che la permeabilità del terreno sia alta, si tratti cioè di un'alluvione molto aperta (nel qual caso è sufficiente la miscela cemento-bentonite)
- lo spessore del terreno trattato dovrà essere come minimo di 2,50 m, meglio di 3,00 m
- le iniezioni saranno condotte secondo il sistema "a volume controllato", rispettando inoltre in modo rigoroso le priorità e le specifiche particolari. Inutile e dannoso ad esempio sarebbe iniettare più del quantitativo necessario, calcolato come già detto in funzione della porosità del terreno.

Uguale accuratezza deve essere posta nella realizzazione di schermi di tenuta orizzontali ("fondelli" di pozzi, impermeabilizzazioni del fondo di grandi scavi, impermeabilizzazioni sotto edifici, ecc.).

Per questi trattamenti, nel caso si voglia ridurre lo spessore del trattamento al minimo indispensabile, è molto importante conoscere con buona precisione la composizione granulometrica dei vari orizzonti di depositi alluvionali, allo scopo di potere scegliere le zone più idonee per essere trattate con

il minore dispendio possibile.

Se ad esempio si potesse reperire anche ad una certa profondità uno strato di 2 ÷ 3 m di spessore caratterizzato da un $D_{10} \geq 0,5$ mm ed una permeabilità attorno a 10^{-1} cm/sec, il trattamento potrebbe essere eseguito con successo utilizzando solamente miscela a base di cemento: questo potrebbe compensare il maggiore onere di perforazione.

Per la stabilità del fondo scavo è necessario inoltre tenere conto delle sottopressioni agenti sul lembo inferiore del maso impermeabilizzato.

La figura n. 28 mostra un intervento eseguito recentemente per

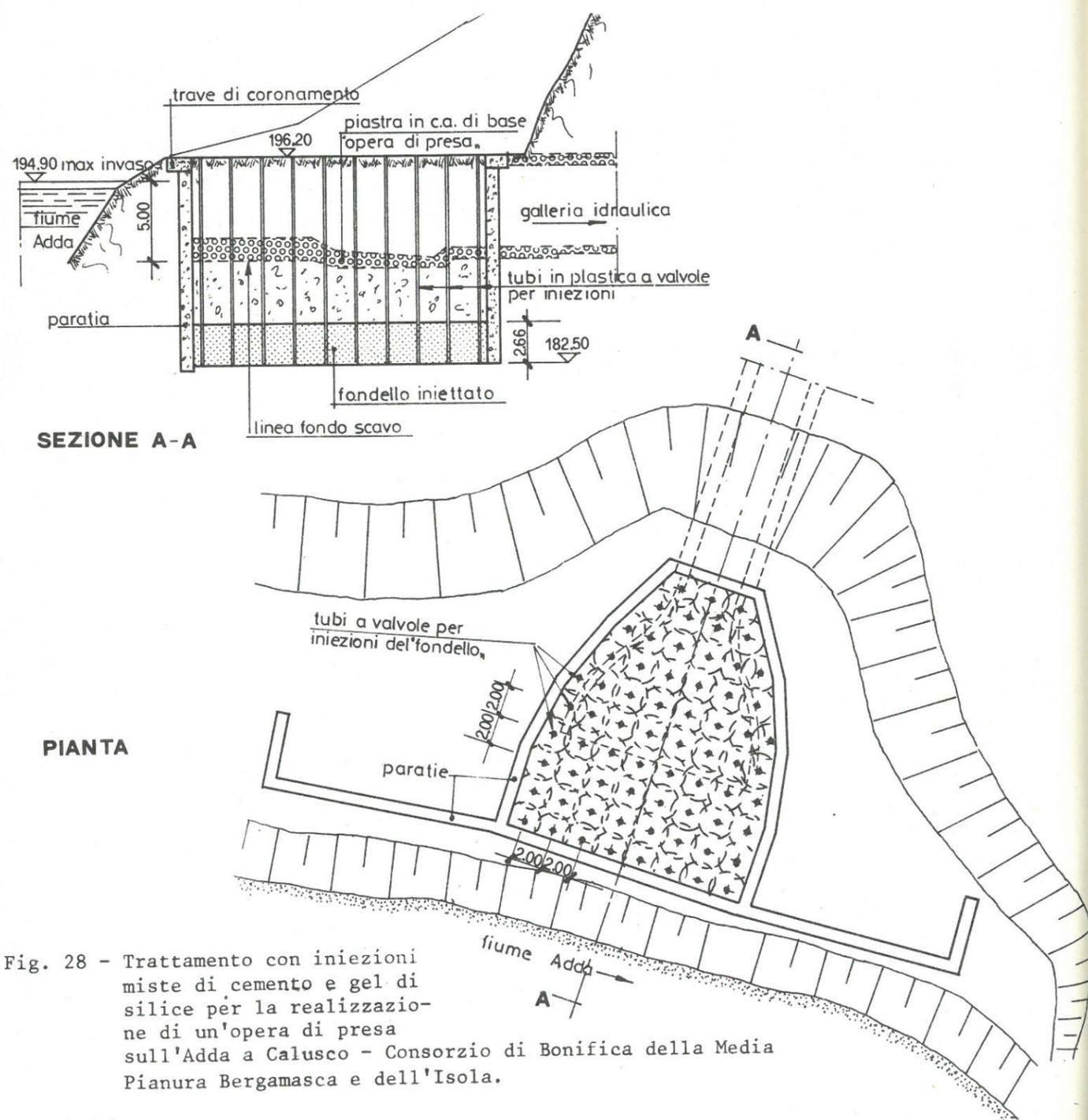


Fig. 28 - Trattamento con iniezioni miste di cemento e gel di silice per la realizzazione di un'opera di presa sull'Adda a Calusco - Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca e dell'Isola.

per la realizzazione dell'opera di presa nei pressi di Calusco (Bergamo) per la derivazione d'acqua dell'Adda da immettere nella costruenda galleria idraulica di proprietà del Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca e dell'Isola. La tenuta laterale è stata realizzata mediante paratie in c.a., mentre il fondo della vasca è stato impermeabilizzato con iniezioni a base di cemento e gel di silice. L'alluvione piuttosto "chiusa" ha richiesto i seguenti quantitativi percentuali di miscela cementizia (V_c) e di gel di silice (V_g) nei confronti del volume del terreno (V_t)

$$V_c = 0,14 V_t$$

$$V_g = 0,14 V_t$$

Il trattamento è stato tenuto volutamente intenso a causa dello spessore ridotto del fondello.

E' stata ottenuta l'impermeabilizzazione totale del fondo: il trattamento è anche stato sottoposto a condizioni di carico decisamente severe in quanto per ragioni programmatiche di cantiere è stato eseguito un primo scavo parziale fino a 2 m sotto il livello della falda (quest'ultima certamente in movimento perchè a pochi metri dall'alveo del fiume) 6 mesi prima del getto del solettone orizzontale in c.a.; un secondo scavo fino a 5 m sotto il livello del fiume è seguito 3 mesi prima del completamento.

Non si sono mai registrate perdite.

Un altro esempio significativo di recente realizzazione è l'intervento d'iniezioni eseguite a Priolo (Siracusa) per consentire lo scavo della nuova opera di presa a mare, cioè di una grande vasca di raccolta dell'acqua necessaria per il raffreddamento degli impianti petrolchimici della Montedison. Si tratta di uno scavo in riva al mare di profondità 9.10 m sotto il livello medio mare di dimensioni 26 m per 58 m. In fase progettuale per l'esecuzione dello scavo era stato previsto un intervento con well-points; nel corso dei lavori si manifestavano preoccupanti fenomeni di instabilità del fondo, soprattutto a causa dell'incontro di una falda artesianica non prevista con carico di 2 m circa sopra il livello medio mare.

Alcuni sondaggi integrativi evidenziavano inoltre la presenza oltre il fondo della vasca di potenti formazioni di sabbie limose e di calcareniti in forte stato di degrado (permeabilità $10^{-2} \div 10^{-3}$ cm/sec).

Era dunque indispensabile realizzare l'impermeabilizzazione del fondo ed anche laterale al di sotto di una certa quota per garantire la stabilità dello scavo: si è deciso di eseguire un trattamento misto d'iniezioni di cemento e gel di silice attraverso tubi a valvole.

Le valvole si sono sempre aperte anche nelle calcareniti, assimilabili dunque queste ultime a terreni incoerenti.

Per quanto concerne le sottopressioni si è dovuto tenere conto della falda artesianiana proveniente da terra e per questo il "fondello" impermeabile è stato tenuto alla profondità mostrata sulla figura n. 29 che riporta lo schema globale del trattamento eseguito.

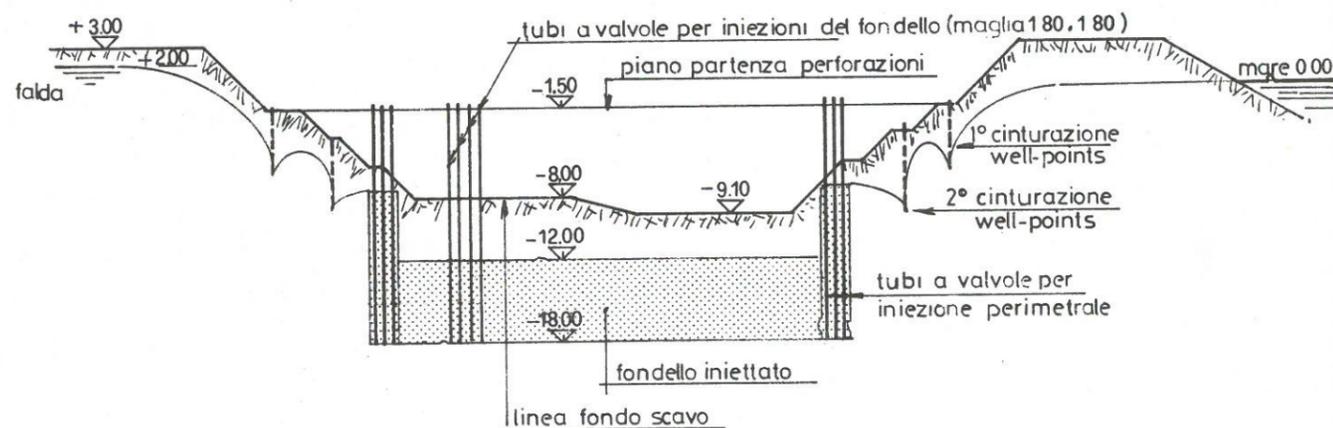


Fig. 29 - Priolo (Siracusa). Opera di presa a mare per gli impianti petrolchimici della Montedison. Schema dei trattamenti d'iniezione eseguiti per l'impermeabilizzazione e la stabilità del fondo scavo.

Come si può notare un primo scavo è stato realizzato mediante abbassamento di falda con well-points; la prosecuzione in profondità non ha potuto sfruttare lo stesso sistema a causa della grande portata d'acqua filtrante attraverso i terreni sottostanti già descritti.

Le iniezioni hanno costituito un vero e proprio tappeto impermeabile al di sotto del fondo dello scavo, oltre ad una protezione verticale tutt'attorno alla grande vasca.

Il volume di terreno trattato è risultato di circa 25.000 m³. Le miscele a base di cemento-bentonite sono state iniettate in

tutto il masso costituito da terreni sabbiosi e calcareniti:

l'assorbimento è risultato pari al 16% del volume totale.

Il gel di silice invece è stato utilizzato solamente per le porzioni di sabbie limose che totalizzavano un volume di 12.000 m³ circa, di cui il gel ha interessato il 10%.

5.3. LE GALLERIE

Grande contributo hanno fornito in questi ultimi anni i trattamenti d'iniezione alla realizzazione di gallerie urbane ed extraurbane, da ricavarsi in terreni di qualsiasi natura, ma soprattutto in terreni sciolti.

Le iniezioni vengono impiegate in questo campo per conseguire svariati scopi e precisamente

- per le gallerie in costruzione

- trattamenti preventivi di consolidamento o/e impermeabilizzazione per consentire uno scavo agevole e sicuro, condotto a piena sezione con il solo ausilio precauzionale della posa di centine e spritz-beton
- trattamenti di ricompressione del terreno e consolidamento nel caso di cedimenti al fronte o grandi sfornellamenti occorsi durante lo scavo, soprattutto in corrispondenza di imprevedibili cambiamenti di condizioni, contatti tra formazioni di caratteristiche strutturali molto differenti fra loro, venute d'acqua improvvise
- per le gallerie urbane i trattamenti hanno anche lo scopo di eliminare o ridurre i cedimenti delle opere sovrastanti entro limiti compatibili con la salvaguardia delle opere stesse

- per le gallerie esistenti

le iniezioni vengono impiegate per il riassetto, qualche volta per il totale rifacimento, del rivestimento di vecchie gallerie che per vari motivi presentano gravi lesioni spesso accompagnate da filtrazioni d'acqua.

Gli esempi d'interventi sono innumerevoli in Italia ed all'e-

stero: l'argomento è già stato ampiamente trattato da molti autori (vedere bibliografia allegata).
 Allo scopo di evitare inutili ripetizioni mi limiterò qui ad esporre alcuni achemi d'intervento eseguiti recentemente e che possono rivestire qualche interesse particolare.
 In figura n. 30 è riportato il trattamento preventivo d'inie-

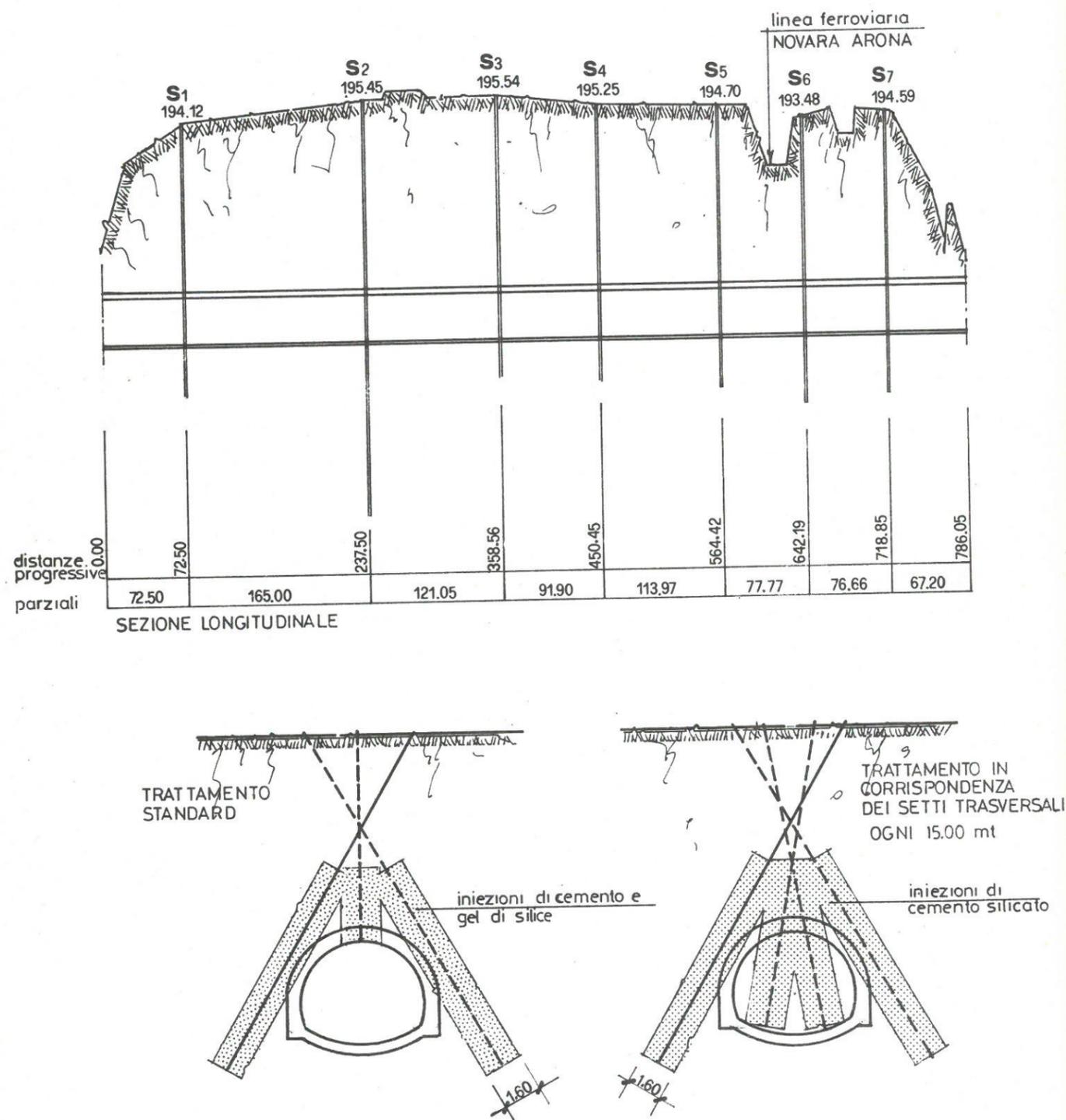


Fig. 30 - Galleria idraulica di Cavagliano. Sezione longitudinale con sondaggi. Schemi del trattamento "a capanna" preventivo di iniezioni per consentire lo scavo con fresa attraverso i terreni alluvionali incoerenti.

zione per l'esecuzione della nuova galleria idraulica di Cavagliano (Novara) costruita per conto dell'Associazione Est Sesia Consorzio di Bonifica Integrale.

La galleria, che attraversa per una lunghezza di 786 m una collina di depositi fluvio-glaciali con abbondante frazione di elementi fini (si tratta di una alluvione ampiamente rimaneggiata da glaciazioni ripetitive), è stata scavata a tutta sezione con una fresa automatica in tempi molto brevi.

Come mostrano le curve granulometriche espone in figura n. 31 il terreno si presentava molto "chiuso".

A seguito di perplessità sul tipo di trattamento più idoneo è stata eseguita una seconda serie di sondaggi utilizzando campionatori di grosso diametro (\varnothing 258 mm e 192 mm) in modo da potere ricostruire in laboratorio la composizione granulometrica del terreno più aderente alle condizioni effettive dell'alluvione al suo stato naturale.

Nel frattempo venivano anche eseguite prove di congelamento su

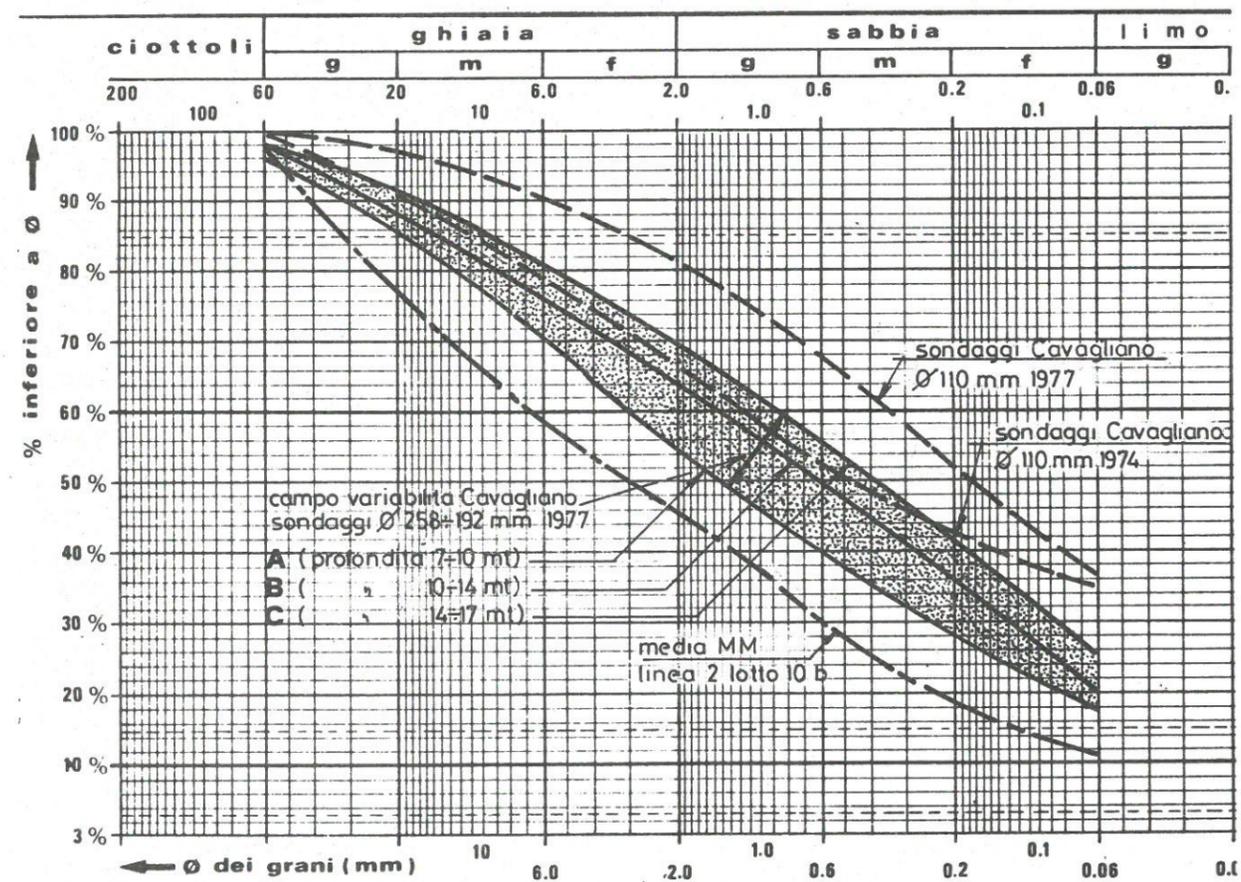


Fig. 31 - Galleria di Cavagliano. Curve granulometriche del terreno di Cavagliano ricavate da sondaggi eseguiti con differenti calibri, comparate con la composizione granulometrica tipica delle alluvioni di Milano.

alcuni campioni estratti.

Al termine di questi studi si è deciso di adottare il trattamento d'iniezioni spostando un poco le percentuali previste originariamente verso un maggiore quantitativo di gel di silice (13% di V_t), riducendo nel contempo il volume di miscela cementizia (10% di V_t).

Il trattamento è riuscito bene: non si sono mai riscontrati fenomeni di "claquage".

Ritengo tuttavia trattarsi di un caso limite per quanto concerne l'iniettabilità del gel di silice.

La percentuale media del 22% di limo presente, come si può notare dalle curve comparative, è superiore a quella che fin'ora si è riscontrata nelle alluvioni di Milano (lavori MM).

Le figure nn. 32-33-34 riportano schematicamente il lavoro di riassetto relativo alla galleria Motto d'Oneggio, posta immediatamente a valle dell'opera di presa sul Ticino delle acque afferenti al canale Regina Elena per l'irrigazione di un'ampia zona del novarese.

La galleria è sotto falda ed attraversa per i 1.500 m della sua lunghezza terreni sciolti molto fini, sabbie leggermente limose con ghiaia sparsa.

L'opera costruita a cavallo del periodo dell'ultima guerra ha dovuto superare grosse difficoltà a causa dei terreni fluenti incontrati in prossimità del corso d'acqua: sembra si sia ricorsi all'abbassamento di falda.

Con l'andare del tempo, a causa di infiltrazioni di acqua carica di elementi fini (sabbie limose) in corrispondenza del contatto piedritti-calotta (realizzata quest'ultima in "bolognini" di calcestruzzo), l'arco di calotta non essendo sufficientemente contrastato dal terreno sempre più decompresso si è rotto generalmente in tre punti, alle reni ed in chiave, compromettendo seriamente la stabilità del manufatto.

Scopo del trattamento d'iniezione è quello di costituire tutt'attorno alla galleria una porzione di terreno consolidato per ridurre gli sforzi ora gravanti esclusivamente sul rivestimento disastroso e per stabilizzare definitivamente gli elementi fini del terreno affinché nei tempi lunghi non abbia modo di reinnescarsi il fenomeno di decompressione che ha ori-

ginato l'attuale situazione.

Si è proceduto come mostrano le figure.

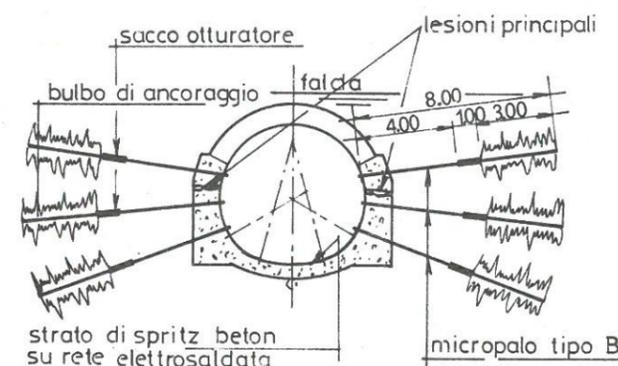


Fig. 32 - Galleria Motto d'Oneggio. Micropali di salvaguardia immediata, allo scopo di poter procedere in sicurezza con le operazioni successive avendo così fissato le parti pericolanti

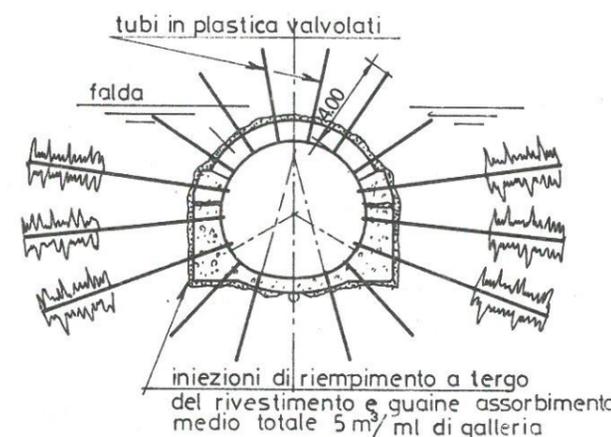


Fig. 33 - Galleria Motto d'Oneggio. Iniezioni di imbottimento a tergo del rivestimento e esecuzione delle raggere d'iniezione: posa tubi a valvole ed esecuzione delle "guaine".

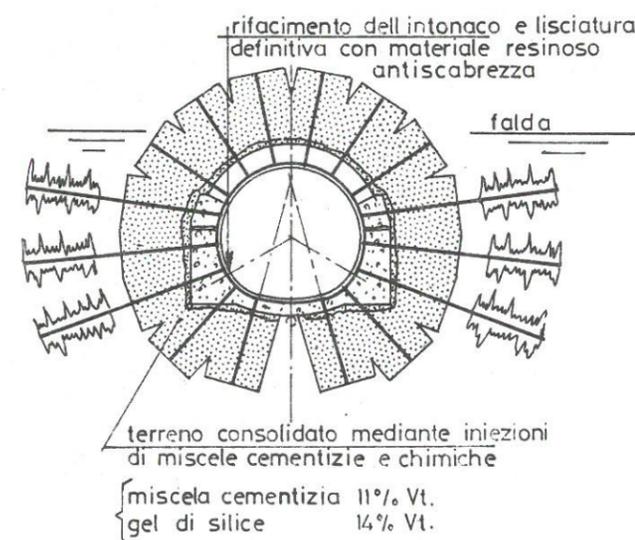


Fig. 34 - Galleria Motto d'Oneggio. Esecuzione delle iniezioni di consolidamento; miscele cemento-bentonite in I^a Fase, gel di silice in II^a Fase. Rifacimento dell'intonaco previo riassetto delle parti più disastrose. Rivestimento antiscabrezza con resine.

La figura n. 35 rappresenta l'andamento effettivo degli assorbimenti in una delle raggere raffrontato con i dati previsti dal progetto.

Le iniezioni hanno dovuto essere eseguite con molto "garbo",

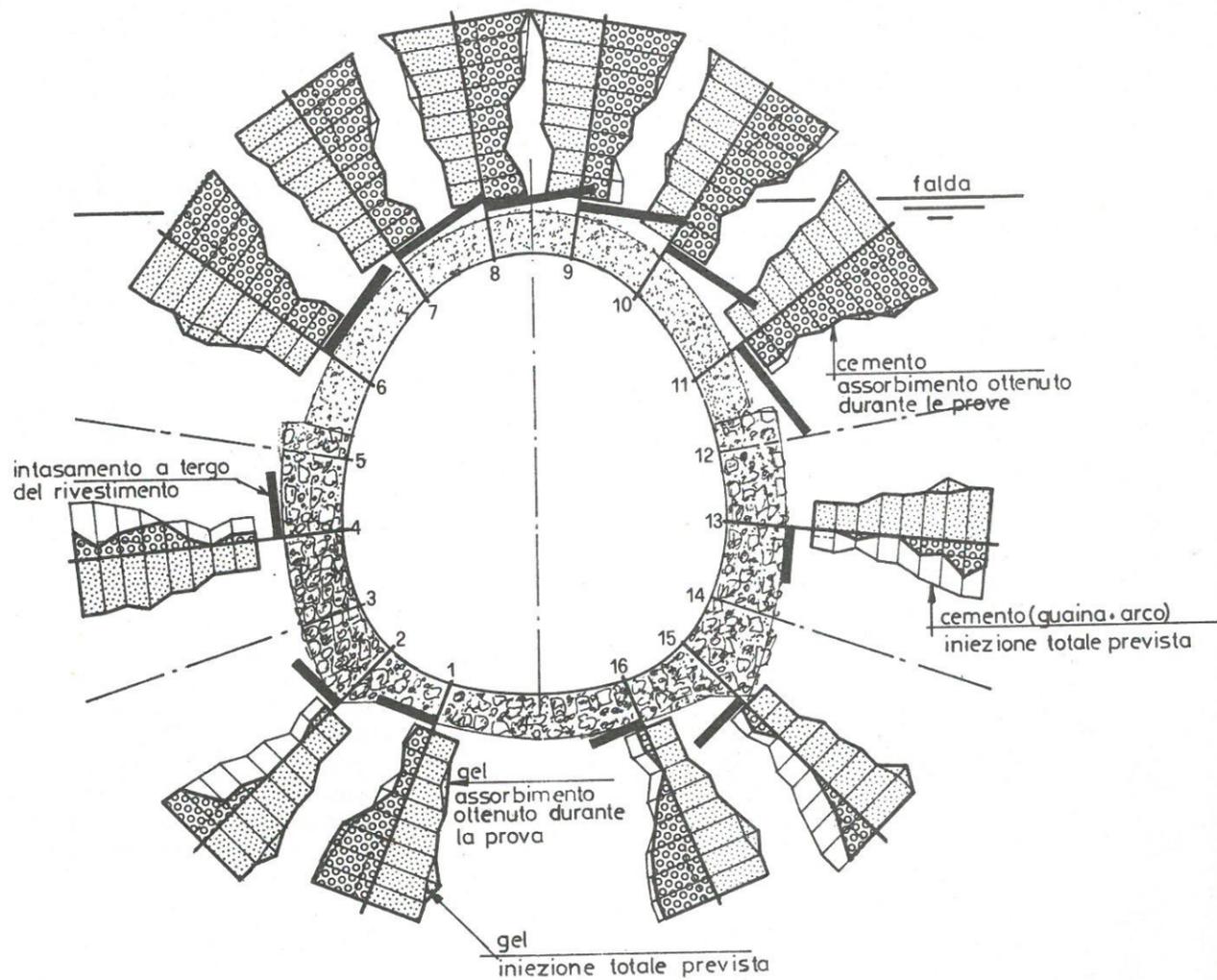


Fig. 35 - Galleria Motto d'Oneggio. Andamento delle iniezioni in una delle raggere di prova; confronto tra assorbimenti effettivi ed assorbimenti previsti in progetto.

rispettando rigorosamente i limiti di quantità e pressioni stabilite, a causa dello stato di estremo degrado della struttura prossima al collasso.

Si possono dedurre le seguenti osservazioni:

- l'intasamento, eseguito praticamente senza imporre pressione (max. attorno a $1,5 \text{ Kg/cm}^2$) ha comportato un quantitativo notevole di miscela in tutta la zona di calotta, minore lungo i piedritti e sotto l'arco rovescio
- il quantitativo di miscela cementizia previsto è stato assorbito totalmente nella parte alta, probabilmente più decompressa. Nella parte bassa la pressione di "rifiuto" è stata spesso raggiunta prima di avere iniettato il volume previsto per

ciascuna valvola

- il gel di silice è stato assorbito integralmente e quasi sempre a pressioni inferiori al "rifiuto".

Si è allora deciso di incrementare un poco il quantitativo di miscela cementizia oltre la calotta e ridurlo nella zona sottostante l'arco rovescio.

La figura n. 36 mostra un trattamento eseguito per la Metropolitana Milanese alcuni anni fa: si tratta della linea n. 2 ladove essa ha dovuto sottopassare il naviglio Martesana in Via Melchiorre Gioia.

Riporto questo particolare cantiere perchè con la tecnologia adottata ha segnato una svolta decisiva nell'ambito della costruzione della MM: per la prima volta infatti a Milano sono stati eseguiti tratti di galleria a "foro cieco" con cunicolo d'avanzamento.

Il sistema qui messo a punto è stato poi utilizzato molte altre volte ed oggi consente la realizzazione della linea n. 3 senza intralciare il traffico di superficie di importanti e centralissime strade della città, lungo la direttrice Repubblica, Turati, Manzoni, P.za Scala, Via S. Margherita, Duomo, Via Mazzini, C.so Porta Romana.

Il sistema viene anche utilizzato per la costruzione delle stazioni.

Da notare la difficoltà di questo scavo eseguito con successo sotto un manufatto vecchio ed in non buone condizioni di conservazione.

Numerosissimi sono gli interventi d'iniezione in galleria realizzati per superare difficoltà intercorse durante gli scavi. Rimando per questo alle svariate pubblicazioni elencate in bibliografia.

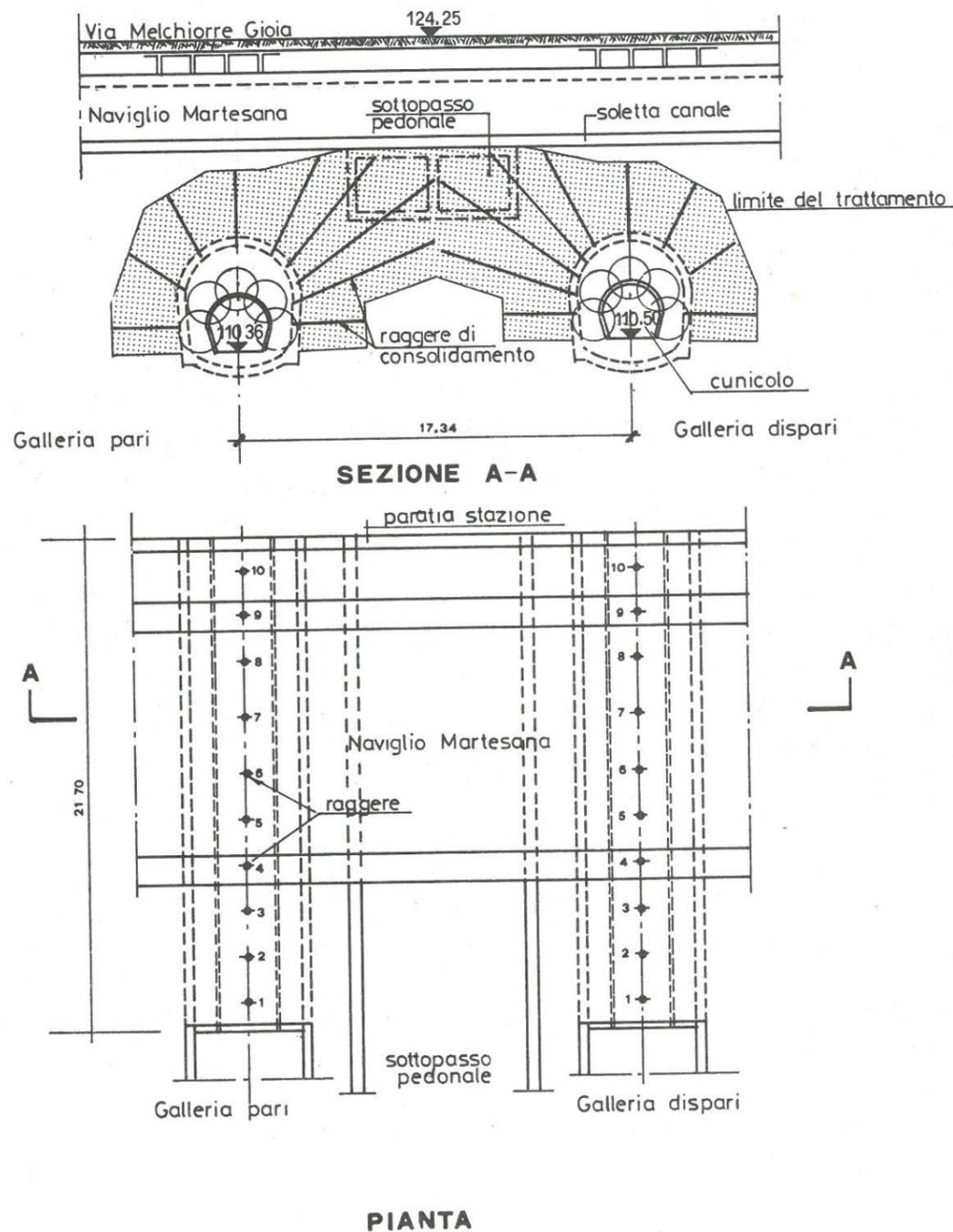


Fig. 36 - Metropolitana Milanese - Linea 2 . Trattamenti d'iniezione eseguiti da cunicoli per il sottopasso del canale Martesana con il sistema a foro cieco.

5.4. CONSOLIDAMENTO DI EDIFICI E SOTTOFONDAZIONI

La figura n. 37 mostra come a mezzo di un trattamento d'iniezioni miste, di cemento e di gel di silice, sia stato possibile costruire il nuovo Hotel du Nord (denominato poi Principe

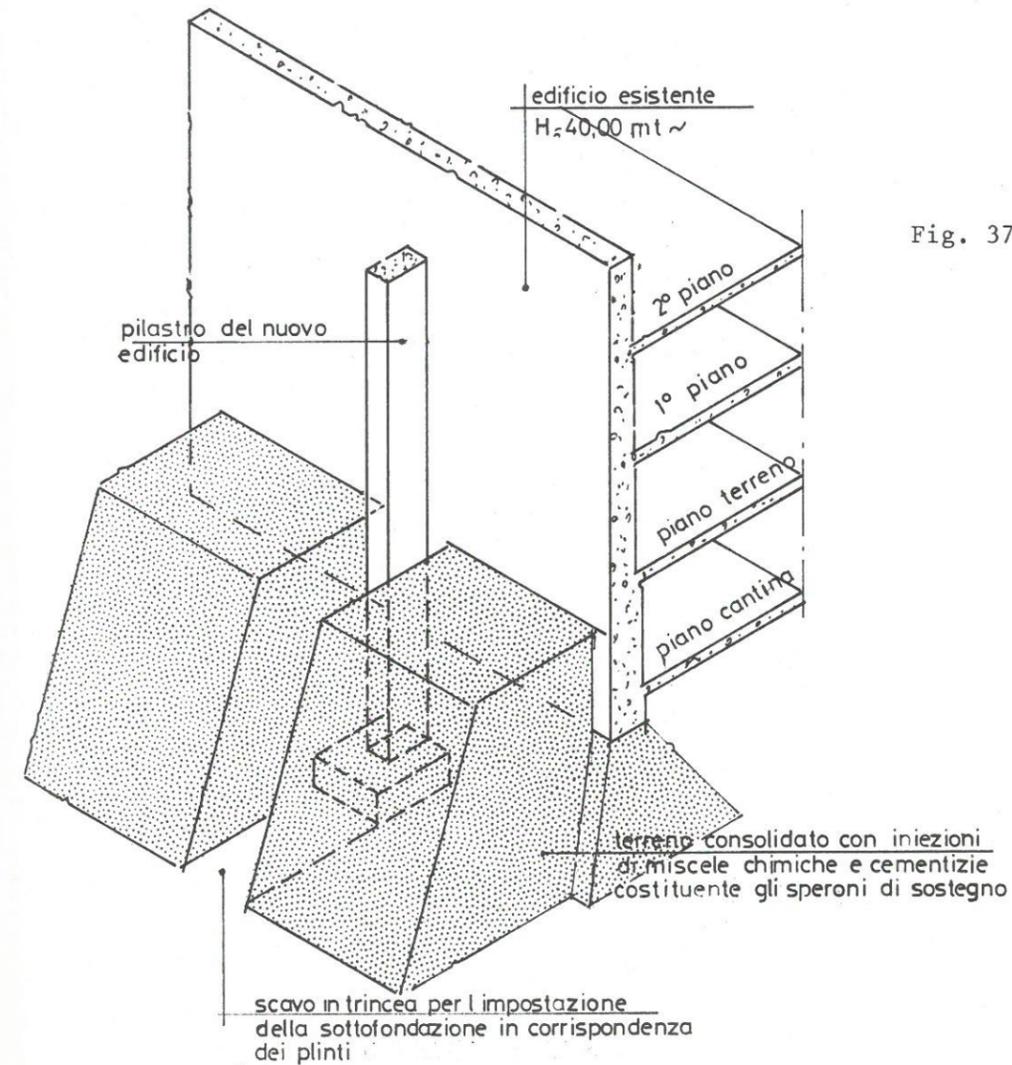


Fig. 37 - Principe e Savoia Residence -Milano. Schema del trattamento d'iniezioni per l'impostazione della nuova struttura a quota più profonda del fabbricato adiacente.

e Savoia Residence) in Piazza della Repubblica a Milano a ridosso di un edificio alto 40 m con fondazioni impostate a livello superiore nei confronti dello scavo da eseguire. Come si può notare dallo schizzo è stato creato un masso di terreno consolidato (carico di rottura a compressione superiore a 20 Kg/cm^2) di forma trapezoidale che si affondava per 3 m circa al di sotto delle fondazioni dell'edificio esistente e si estendeva per 5 m all'interno dello scavo da eseguire. Attraverso scavi in trincea molto stretti ricavati nel masso consolidato, mantenuto integro per contrastare le spinte orizzontali, si sono potuti realizzare in sicurezza i plinti ed i

pilastrini in elevazione della nuova struttura in fregio al fabbricato adiacente: il terreno trattato è stato asportato solamente dopo avere completato i telai in c.a. del 1° e 2° scan-
tinato.

Un trattamento simile al precedente è stato eseguito sempre a Milano (C.so Venezia) per la conservazione della facciata monumentale di palazzo Castiglioni.

Oltre alla posa di parecchi micropali per trasmettere i carichi in profondità, si è provveduto ad iniettare tutto il masso di terreno al di sotto della fondazione della muratura esistente.

Una controventatura realizzata con elementi tubolari metallici contrastava le spinte orizzontali.

Le iniezioni, estese per 3 m circa da una parte e dall'altra dell'asse del muro e per una profondità di 8 m, hanno consentito di ricavare due ordini di piani al di sotto della soletta del piano terreno, mantenendo integro il vecchio muro di facciata.

E' stata usata una tecnica simile a quella dell'Hotel di Nord impostando le nuove strutture in c.a., questa volta di sottomurazione, procedendo a campioni attraverso trincee successive scavate nel masso di terreno consolidato.

La figura n. 38 riporta schematicamente questo intervento.

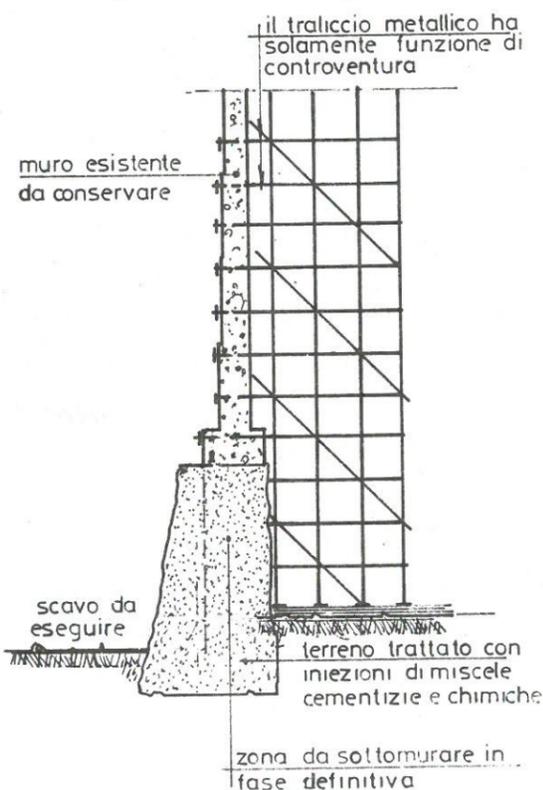


Fig. 38 - Palazzo Castiglioni - Corso Venezia - Milano.
Schema del trattamento d'iniezioni eseguite per consentire le operazioni di sottomurazione di una facciata monumentale da conservare.

6. TRATTAMENTI MISTI D'INIEZIONE E DRENAGGIO

Capita abbastanza frequentemente nello scavo di gallerie di dovere affrontare alternanze di terreni sciolti fini, spesso al limite della iniettabilità, e di terreni coesivi (argille limose, argilliti) disposti secondo strati successivi di spessore variabile.

In presenza d'acqua lo scavo diventa molto delicato anche se il carico non è grande perchè anche una piccola infiltrazione, se non governata e controllata, può evolversi rapidamente e trasportare in galleria grande quantità di materiale sciolto con sfondamento degli strati coesivi.

Questo fenomeno potrebbe essere evitato semplicemente posando una serie di drenaggi in posizioni opportune: è tuttavia preferibile e più sicuro stabilizzare anche con iniezioni di gel di silice (o altre miscele penetranti) gli strati di terreni non coesivi per un certo intorno oltre l'estradosso di scavo.

Esempio tipico è quello dell'intervento intrapreso per superare un tratto difficile della galleria Scampitella, a Vallata sulla Autostrada Napoli-Bari, dove terreni misti del genere sopra descritto carichi d'acqua avevano interrotto gli scavi sulle due canne.

In particolare nella corsia Bari-Napoli è avvenuto uno sfornellamento di sabbie fini che sono fluite in galleria in grande quantità.

Per superare questo tratto di 16 m di lunghezza sono state eseguite iniezioni di gel di silice attraverso tubi a valvole disposti a partire dal fronte secondo il tipico schema d'intervento a geometria tronco-conica (trattamento "ad avanzamento").

Più oltre e sulla canna omologa sono stati eseguiti trattamenti preventivi misti, di iniezioni e di drenaggio con posa di tubi filtri tipo SBF-K ad intagli trasversali di 0,2 mm.

In certi tratti l'azione drenante, abbattendo in breve tempo (dai 5 ai 10 giorni) portate d'acqua e pressioni, ha consentito il procedere sicuro dello scavo.

Complessivamente sono stati necessari questi tipi d'intervento:

lungo 100 m di galleria: costituzione arco resistente oltre la calotta con iniezioni di gel di silice

lungo 140 m di galleria: posa di tubi drenanti secondo tratte successive tronco-coniche

lungo 200 m di galleria: trattamento di consolidamento zona d'appoggio dei piedritti, spesso unito a posa di tubi drenanti nella zona di calotta.

Una dettagliata descrizione (comunicazione 5 sessione II^a) di questo cantiere è ritrovabile tra gli atti del convegno internazionale sui problemi tecnici nella costruzione delle gallerie, tenutosi a Torino nel settembre del 1969.

7. CONCLUSIONI

Come già anticipato all'inizio, l'argomento delle iniezioni nei terreni sciolti è così vasto da rendere assai difficile una trattazione organica e soprattutto completa.

I campi d'applicazione sono molteplici: mi rendo conto ora di avere posto attenzione forse eccessiva sulle applicazioni più comuni a scapito di trattamenti meno frequenti, ma forse più interessanti perchè consentono l'ottenimento di scopi molto importanti.

A titolo puramente esemplificativo accenno

- agli schermi "antivibranti" eseguiti con iniezioni di resine acriliche (elasto-plastiche)
- alle iniezioni per la costituzione dei bulbi d'ancoraggio dei tiranti e micropali
- alle iniezioni preventive collegate agli interventi di congelamento, nel caso di forte permeabilità e di falde subalvee in movimento
- agli interventi tipo "Prepakt" dove le miscele cementizie vengono immesse fra elementi preselezionati generalmente di tipo ghiaioso, porzioni quindi di terreno molto aperto e facilmente consolidabile
- iniezioni eseguite a seguito di lavaggi in pressione (acqua e aria), aventi questi ultimi lo scopo di asportare le parti più fini non iniettabili (vedere intervento di consolidamento delle fondazioni della diga di Ravasanella eseguito per il Consorzio di Bonifica della Baraggia Vercellese).

Spero tuttavia di essere riuscito a dare una idea della versatilità di questa tecnologia che ha aiutato a risolvere moltissimi problemi anche di grande difficoltà e soprattutto a fare comprendere come con i macchinari e mezzi di controllo oggi a disposizione, adeguatamente utilizzati, possano essere portati a termine lavori in grande economia con i quantitativi di miscele minimi indispensabili per garantire il grado di sicurezza previsto in sede progettuale.

Gli alti costi di manodopera e prodotti devono incentivare la ricerca continua di miglioramenti, secondo me ancora possibili, per rendere sempre più attenti e precisi gli interventi d'iniezione in un clima di massimo risparmio senza nulla cedere nei confronti della sicurezza.

B I B L I O G R A F I A

=====

- Cambefort H. "Injection des Sols" - Eyrolles, Paris, 1967 vol. I e II
- Caron C. (1956) "Conditions d'injection des terrains pulvérulents" (documento Solétanche, Paris)
- Balossi Restelli A. (1968) "Una soluzione d'avanguardia per un difficile problema di scavo in alveo fluviale" - Il Nuovo Cantiere, n. 11
- Cambefort H. (1977) "Principes et applications de l'injection" - Ann. Inst. Techn. Bât. Trav. Publ., n. 353, 3-23
- Balossi Restelli A. (1969) dagli Atti del 1° Convegno Internazionale sui problemi tecnici nella costruzione di gallerie - Torino 1969
- "Trattamento preventivo, mediante iniezioni, di terreni difficili sotto falda, per consentire lo scavo di grandi gallerie" - Sessione II - Comunicazione 4
 - "Trattamento preventivo mediante iniezioni di terreni incoerenti per consentire lo scavo di gallerie metropolitane sotto zone edificate, senza che intervengano cedimenti nelle fondazioni di opere sovrastanti" - Sessione V - Comunicazione 1
- Balossi Restelli A., Ginetti L. (1969) Ancora dagli Atti del Convegno di Torino "Un esempio di trattamento misto d'iniezione e di drenaggio per rendere possibile lo scavo di una galleria dell'autostrada Napoli-Bari" - Sessione II, Comunicazione 5
- Balossi Restelli A. (1972) "Alcuni esempi di trattamenti d'iniezione nel terreno di Milano per consentire la creazione di nuovi spazi sotterranei in adiacenza o sotto fabbricati vecchi da conservare" - Il Nuovo Cantiere - n. 12
- Balossi Restelli A., Ginetti L. (1970) "Stabilità nel tempo dei terreni trattati con gel di silice" - Atti IX Convegno di Geotecnica, Bari, 1970
- Balossi Restelli A., Tornaghi R. (1974) "Multi-stage chemical treatment of cataclastic-mylonitic rock to reduce seepage under an arch-gravity dam" - Geologia Applicata e Idrogeologia, vol. IX, Bari, 1974
- "Foundations for dams" - Asilomar Conference Grounds Pacific Grove, California, March 17-21, 1974 (published by ASCE)
- Chadeisson R. (1963) "Etanchement du barrage de Mission Dam (Canada)" - Revue des Ingénieurs - Octobre 1963
- Rambert O., Würth W. "Die Anlagen der Kraftwerke Mattmark A.G." - Elektro-Watt, Zurich
- Manacorda A., Colicigno P., Macchniz G. (1969) "Il consolidamento con miscele chimiche della Galleria Scampitella" - Autostrade - Marzo 1969
- Bellini A., Jurina N. (1967) "Alcune considerazioni sull'impiego delle iniezioni nel terreno di Milano" - Atti dell'VIII Congresso di Geotecnica, Cagliari 1967, vol. I - 80-87
- Tornaghi R. "Iniezioni" - Atti Seminario su consolidamento di terreni e rocce in posto nell'ingegneria civile Stresa, 1978
- Wolf E, Collini R., Balossi Restelli A. "Attraversamento di una tratta della galleria Capo Calavà (autostrada Messina-Palermo) in presenza di gas tossici in pressione" - Rivista 'Gallerie e grandi opere sotterranee' (marzo 1979)
- Ventriglia U. (1975) "Stabilizzazione chimica dei terreni" - Rassegna dei Lavori Pubblici, 22, n. 4, 99-109