

***Estratto  
dalla  
rivista***

# **leStrade** *dal 1898*

**Casa Editrice  
La Fiaccola s.r.l.**

Via Conca del Naviglio, 37 - 20123 Milano  
Tel. (02) 89421350 (6 linee r.a.) - Fax (02) 89421484

Internet: <http://www.fiaccola.com>  
e-mail: [lestrade@enter.it](mailto:lestrade@enter.it)

# E la falda è tagliata fuori

*Lo svincolo fra la S.S. Paullese e la S. P. 159, aperto al traffico nel dicembre dello scorso anno, ha comportato un trattamento innovativo di impermeabilizzazione del terreno per consentire lo scavo in falda di un sottopasso stradale.*

**Achille Balossi Restelli, Raffaella Granata, Giuseppe Manuli, Elena Rovetto**

**L**o svincolo a livelli sfalsati tra la S.S. Paullese e la S.P. 159 ha comportato la realizzazione di un sottopasso, scavato in falda, e di una rotonda con due impalcati a livello campagna.

Lo scavo è sostenuto lateralmente da paratie tirantate e la tenuta idraulica è garantita lateralmente dalle paratie stesse e verticalmente da un fondello impermeabile di modestissimo spessore (1m), realizzato con l'iniezione di miscele cementizie e chimiche.

Le miscele sono state iniettate nel terreno attraverso piccoli tubi accoppiati monovalvola, collegati direttamente in testa alla linea di iniezione, eliminando pertanto completamente la gestione degli otturatori all'interno dei tubi di iniezione.

La composizione granulometrica del terreno, caratterizzato da sabbie e ghiaie con lenti decimetriche di sabbia limosa e permeabilità naturale attorno a  $10^{-3}$  cm/sec, ha richiesto la realizzazione preventiva di un "cappello" di iniezioni cementizie per delimitare orizzontalmente le successive iniezioni chimiche costituite da un gel tenero.

Si tratta di una novità nel campo dei cosiddetti "fondelli impermeabili". Infatti, a differenza di quanto si usa fare per le iniezioni di permeazione nei terreni granulari, in questo caso il gel è stato iniettato attraverso una sola valvola ad elevate pressioni e portate, allo scopo di fare penetrare nel terreno la miscela lungo una fessura orizzontale sottile, assicurando così l'impermeabilità con una notevole concentrazione di gel tenero in poco spazio.

Il grado di impermeabilità raggiunto nell'ambito del fondello è risultato di  $1,5 \times 10^{-5}$  cm/sec.

La massima quota di scavo in corrispondenza della zo-

na centrale, dove è localizzata la vasca di aggotamento delle acque è stata di 13,4 m dal piano strada sotto un battente di 10,70 m.

All'interno della vasca di aggotamento è in funzione un impianto di sollevamento per lo smaltimento sia delle acque residue di filtrazione provenienti dal fondo scavo sia delle acque piovane.

L'impianto di sollevamento comprende anche un sistema di sicurezza che in caso di guasto devia il traffico nelle controvie laterali.

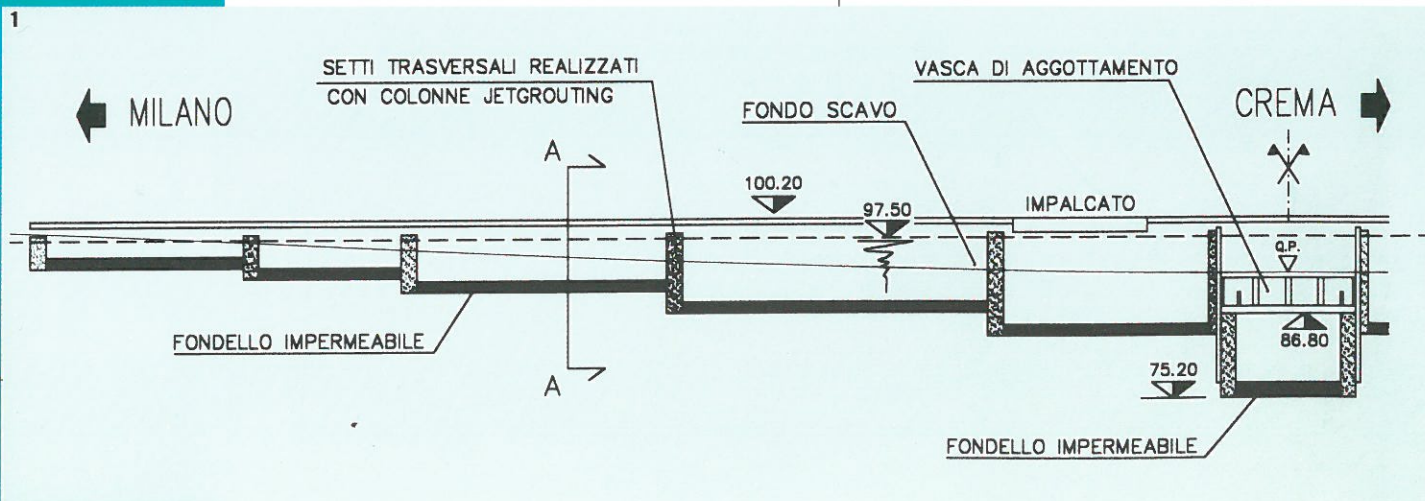
## L'OPERA DI SVINCOLO

Il lavoro di realizzazione del sottopasso lungo la S.S. 415 "Paullese" nel Comune di Peschiera Borromeo (MI) rientra nei lavori di riqualificazione con eliminazione degli incroci a raso ed adeguamento della sezione alle Norme CNR, previsto su tutto il tratto di strada statale da Milano a Crema, ed in particolare fa parte del 1° lotto e comprende il tratto dalla tangenziale Est di Milano alla S.P. n. 159.

Tali lavori furono previsti per migliorare ed allo stesso tempo garantire maggiori condizioni di sicurezza al transito di una delle strade statali più trafficate d'Italia, che le danno il triste primato di strada con maggiore incidentalità.

Il lavoro in argomento, come già detto sopra, è costituito da uno svincolo a livelli sfalsati fra la S.S. 415 e la S.P. n. 159 ottenuto mediante la realizzazione di un sottopasso ed una rotonda con due impalcati a piano campagna in cui convergono la viabilità locale, le controvie di accesso alla statale e la strada provinciale milanese n. 159 "Bettola-Sordio".

A fine lavori il sottopasso presenta una lunghezza di



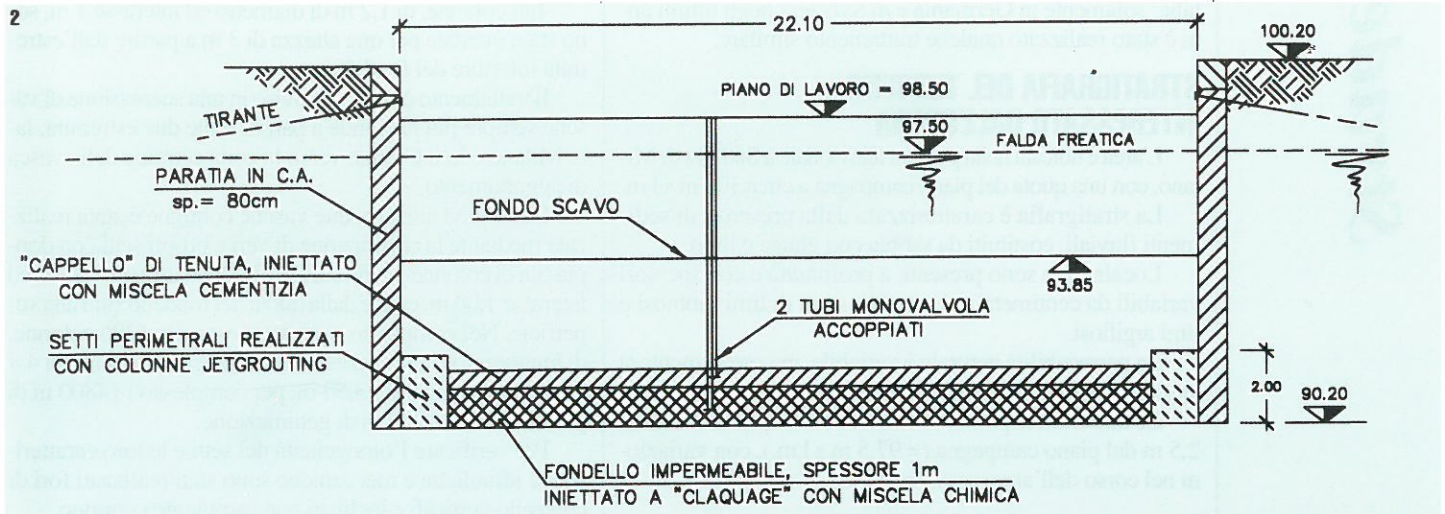
**Ing. Giuseppe Manuli,**  
Responsabile del  
Centro manutentivo  
di Crema dell'Anas  
di Milano.

**Ing. Achille Balossi  
Restelli,** libero  
professionista  
nell'ambito della  
progettazione di  
opere geotecniche.

**Ing. Elena Rovetto,**  
Studio Balossi  
Restelli.

**Dott.sa Raffaella  
Granata,** Impresa  
Rodio, Servizio  
Tecnico.





700 m ed una sezione stradale del tipo III CNR con spartitraffico centrale del tipo new jersey monofilare.

La piattaforma stradale è 22,10 m di larghezza e comprende 4 corsie, due per ogni senso di marcia, di 3,50 m ciascuna con due banchine laterali da 1,75 m, due marciapiedi laterali da 1,75 m, oltre ad uno spartitraffico di 1,10 m.

La pavimentazione è in conglomerato bituminoso drenante.

Il tracciato è illuminato con pali centrali a due braccia, una torre faro per la rotonda e riflettori sotto gli impalcati.

## DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO PER IL SOSTEGNO E L'IMPERMEABILIZZAZIONE DELLO SCAVO IN FALDA

La strada S.S. Paullese si immerge con un sottopasso in trincea fino ad una profondità di 9 m circa dal piano campagna, interessando un terreno costituito da sabbia con ghiaia e limo, immerso in falda.

Il carico idraulico a fondo scavo risultava di 6,20 m nel punto centrale del sottopasso e di 10,90 m in corrispondenza della vasca di aggotamento centrale.

Nella figura n. 1 viene riportata la sezione longitudinale del sottopasso (lato Milano).

In figura n. 2 è illustrata una sezione trasversale dell'opera.

Come si può notare lo scavo della trincea è stato sostenuto sui due lati da pannelli di paratia in c.a. di spessore 80 cm, con un solo ordine di tiranti; uguale sistema è stato utilizzato per la vasca di aggotamento, con la differenza che le spinte laterali sono state contrastate oltre che da un ordine di tiranti superiori anche da una struttura di contrasto in c.a. realizzata all'interno, nel corso delle operazioni di scavo.

Per quanto concerne l'equilibrio dei manufatti nei confronti della sottospinta idraulica il progetto originario prevedeva il funzionamento di una combinazione di un "fondello" realizzato con jetgrouting secondo colonne di 1,50 m di diametro compenetrante fra loro e di uno strato drenante in grado di convogliare nella vasca di aggotamento l'acqua di filtrazione residua.

In una prima fase sono state realizzate tutte le paratie ed i tiranti laterali.

A questo punto si è avuta una lunga interruzione dei lavori.

Alla ripresa dei lavori si è studiata una soluzione alternativa che potesse unire due prerogative importanti: quella di ridurre al massimo i tempi di intervento e quella di contenere i costi entro i limiti imposti.

È nata così la nuova soluzione qui di seguito descritta, che può essere considerata decisamente innovativa per l'I-



1. Sezione longitudinale del sottopasso.

2. Sezione trasversale.

3. Sonda in fase di perforazione e vista della maglia di tubi in PVC accoppiati da 3/8" già cementati nel terreno.

4. Vista del cantiere di iniezione. Sullo sfondo l'impianto di iniezione con i silos per lo stoccaggio dei componenti delle miscele.



talia: solamente in Germania e in Svizzera negli ultimi anni è stato realizzato qualche trattamento similare.

## STRATIGRAFIA DEL TERRENO INTERESSATO DALL'OPERA

L'area è ubicata nella pianura alluvionale a Sud-Est di Milano, con una quota del piano campagna a circa 100 m s.l.m.

La stratigrafia è caratterizzata dalla presenza di sedimenti fluviali, costituiti da sabbia con ghiaia e limo.

Localmente sono presenti, a profondità e con spessori variabili da centimetri a decimetri, strati di limi sabbiosi e limi argillosi.

La permeabilità naturale è variabile, ma mediamente si aggira attorno al valore di  $10^{-3}$  cm/sec.

Le alluvioni ospitano una falda, con superficie a circa 2,5 m dal piano campagna (= 97,5 m s.l.m.), con variazioni nel corso dell'anno assai modeste.

## DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI SPECIALISTICI

Le sottospinte idrauliche sono state contrastate da un tampone di fondo realizzato con iniezioni concentrate di gel di silice, che hanno abbattuto la permeabilità del terreno ad un valore attorno a  $1,5 \times 10^{-5}$  cm/sec.

La relativa tecnologia viene descritta nel paragrafo successivo.

Inoltre sono state eseguite delle cuciture tra tampone di fondo e paratie mediante colonne di jet grouting bifluido.

Tali colonne, di 1,2 m di diametro ed interasse 1 m, sono state iniettate per una altezza di 3 m a partire dall'estremità inferiore del fondello.

Il trattamento è stato suddiviso in una successione di vasche sempre più profonde a partire dalle due estremità, lato Milano e lato Crema, verso la zona centrale della vasca di aggotamento.

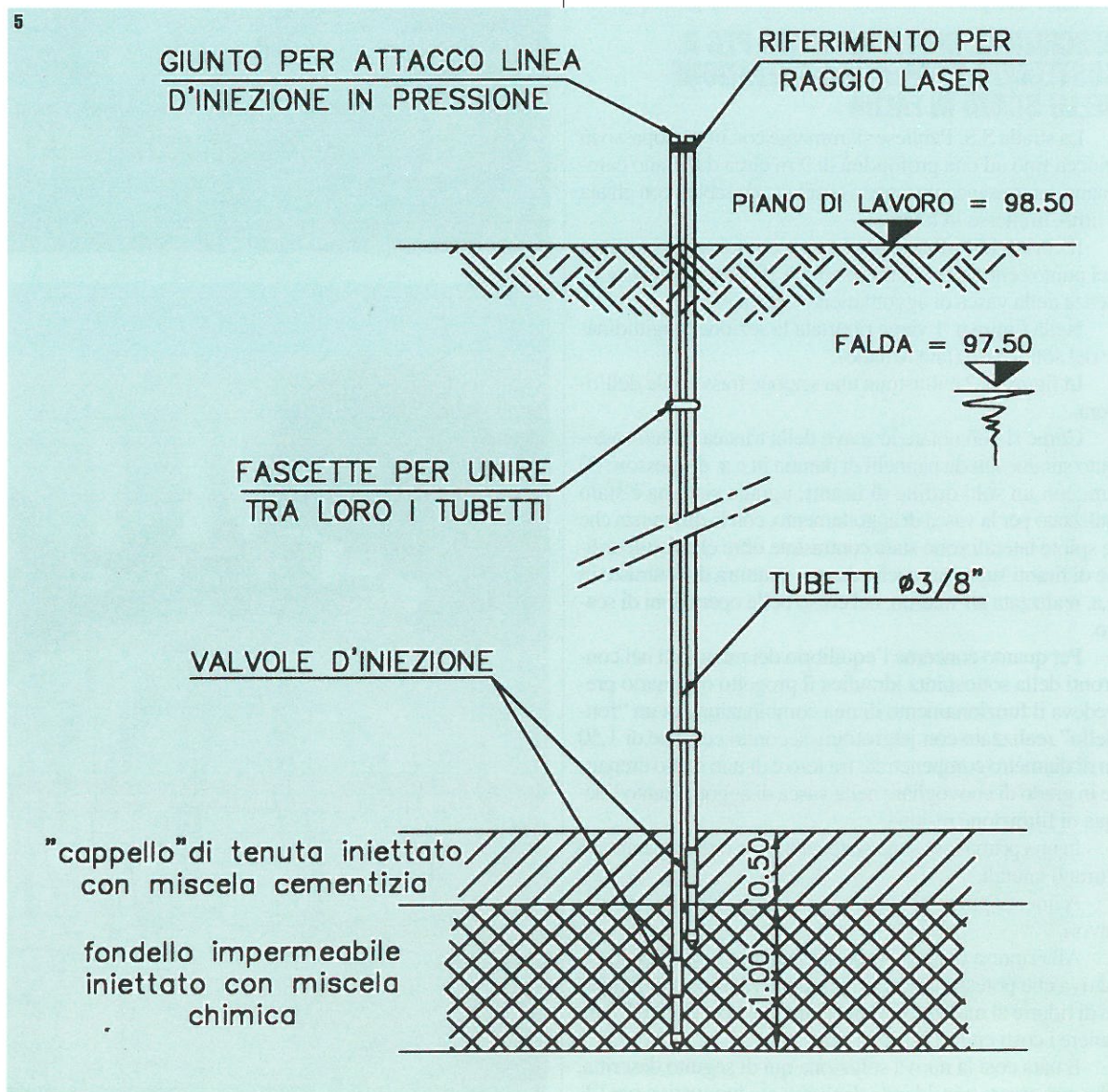
La suddivisione tra due vasche contigue è stata realizzata mediante la costituzione di veri e propri setti con doppia fila di colonne jet grouting bifluido, diametro 1,20 m ed interasse 1,00 m, estese dalla quota del fondello sino alla superficie. Nel complesso sono state eseguite 1396 colonne, di lunghezza di perforazione variabile tra un minimo di 4,8 m ed un massimo di 23,50 m, per complessivi 14800 m di perforazione e 7700 m di gettiniezione.

Per verificare l'omogeneità dei setti e le loro caratteristiche idrauliche e meccaniche sono stati realizzati fori di controllo verticali e inclinati con carotaggio continuo.

## LA SOLUZIONE ALTERNATIVA DI REALIZZAZIONE DEL FONDELLO IMPERMEABILE

Dai calcoli di verifica dell'equilibrio del masso di terreno al di sotto della linea di scavo si è potuto constatare che un sottile strato di terreno fortemente impermeabilizzato (teoricamente rappresentabile con una guaina impermeabile orizzontale), localizzato in corrispondenza della parte più profonda delle paratie in c.a. laterali, avrebbe potuto garantire la stabilità dello scavo stesso nei confronti delle sotto-

5. Particolare delle canne per l'iniezione del fondello.





## SCHEDA DELL'OPERA

<b>Direzione Lavori</b>	Dott. Ing. Giuseppe Manuli, Geom. Luigino Scaglione (Anas -Milano)
<b>Impresa esecutrice</b>	A.T.I. Romagnoli S.p.A. Castelli S.p.A. (Milano)
<b>Impresa opere specializzate in subappalto</b>	Rodio S.p.A. - Casalmaiocco (Milano)
<b>Progettista opere specialistiche</b>	Dott. Ing. Achille Balossi Restelli - (Milano)

spinte idrauliche.

Sulla base di questa ipotesi progettuale si è cercata una soluzione pratica che potesse avvicinarsi il più possibile allo schema teorico sopra riferito.

Dopo una attenta disamina di situazioni similari realizzate recentemente in Germania (Berlino e Lipsia) si è giunti alla progettazione di questo trattamento assai peculiare, che poi è stato realizzato con successo.

In un terreno di consistenza e di caratteristiche granulometriche come quello di Peschiera si possono ottenere facilmente con iniezioni in pressione fenomeni di "claquage" (rottture del terreno secondo fessure orizzontali); si è allora pensato di immettere nel terreno, ad una quota prefissata, un notevole quantitativo concen-

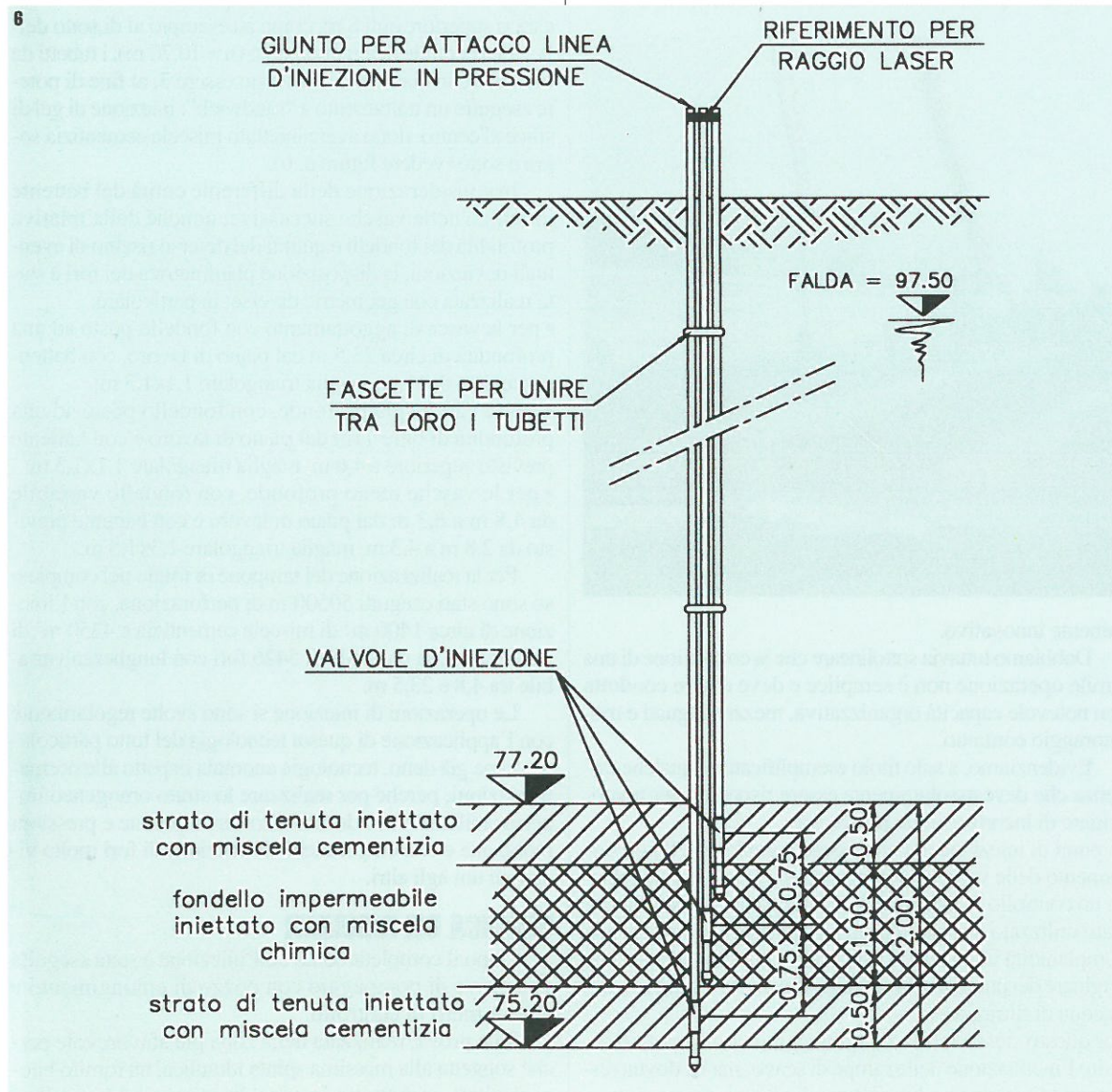
trato di un gel tenero di silicato di sodio e così realizzare quel sottile (1,00 m) strato di terreno impermeabilizzato capace di abbattere il coefficiente di permeabilità, in modo da prevenire qualsiasi fenomeno di sifonamento a fondo scavo.

Spessori così ridotti del fondello affidano al tipo di miscela messa in opera la responsabilità di ottenere un elevato grado di impermeabilizzazione, che può essere raggiunto solo operando con miscele chimiche iniettate ad alta pressione e diffuse orizzontalmente.

Infatti solo una miscela chimica assicura una diffusione continua ed omogenea, perché offre la prerogativa di essere anche molto penetrante nei terreni fini, che potrebbero costituire ostacolo nei confronti di miscele cementizie il cui "cammino" verrebbe interrotto da fenomeni di pressofiltrazione.

In pratica si ottiene una sorta di strato centrale dove si concentra un buon quantitativo di miscela chimica contenuta fra due strati (sopra e sotto), dove le sabbie, a causa della ridotta velocità, vengono permeate dalla miscela stessa: si tratta dunque di un sistema combinato, dove la funzione di claquage viene integrata ai bordi dalla funzione di permeazione.

Il profilo stratigrafico, accertato dalle indagini geognostiche e granulometriche eseguite, ha reso necessaria la realizzazione di un trattamento preventivo superiore di iniezione con miscele cementizie, per ottenere una adeguata "chiusura" delle macroporosità del terreno, prima dell'i-



**6. Particolare delle canne per la realizzazione del fondello a "sandwich" in corrispondenza della vasca di aggotamento.**



nizzazione della miscela chimica: questo per essere sicuri di ottenere una migrazione omogenea del gel di silice nello strato sottostante da impermeabilizzare.

La tecnologia adottata ha previsto operazioni decisamente diverse da quelle che sono normalmente seguite per iniezioni di permeazione di materiali sciolti: infatti per ottenere un'omogenea e continua diffusione si sono dovute prescrivere:

- portata di pompaggio della miscela assai alta, superiore a 1000 l/h per ogni iniettore, contro i 400 l/h adottati usualmente;
- pressione di iniezione anch'essa alta, attorno ai 25-30 bar, contro i 15-18 bar;
- contemporaneità di tubetti, vicini gli uni agli altri, in iniezione simultanea, in modo da creare una sorta di onda di gel di silice in avanzamento da un lato all'altro di ciascun campo in cui è stato suddiviso l'intervento.

Nelle normali iniezioni si usa tenere una certa distanza tra due fori in iniezione contemporanea.

Ulteriore novità adottata è stata quella dell'iniezione a partire dalla testata di tubetti in plastica da 3/8 di pollice, equipaggiati sul fondo con una sola valvola di iniezione (vedere figure nn. 3 e 4).

Questo fatto, oltre che dettato dalla necessità di iniettare nell'intorno di un solo punto (ad una quota bene determinata), ha anche fatto ottenere una notevole rapidità di intervento, essendo stata completamente eliminata la gestione degli otturatori all'interno dei tubi di iniezione.

Come si può notare si è trattato di un intervento deci-

• l'effetto "onda" della miscela iniettata deve essere ben controllato tramite le pressioni di iniezione ed i volumi contemporaneamente iniettati nel gruppo di fori contigui; ciò può essere bene governato se la centrale di iniezione è completamente automatizzata e dotata di un sistema di registrazione che consenta di ricavare i dati di pressione e portate in tempo reale. Così si può assicurare che il "claquage" del terreno sia continuo e quindi non risultino delle zone non impermeabilizzate

• per evitare fughe verso l'alto della miscela di impermeabilizzazione è necessario che attorno ai tubetti  $\phi$  3/8" sia presente una guaina di miscela cementizia che occluda qualsiasi via preferenziale. La decompressione del terreno all'intorno del foro, derivante dall'operazione di perforazione, può essere prevenuta o quanto meno ridotta al minimo utilizzando miscela di guaina nel corso dell'avanzamento dell'utensile

• quando è presente un terreno non perfettamente omogeneo, come ad esempio quello di Peschiera caratterizzato da sabbie prevalenti e ghiaie con presenza di lenti sabbiose limose, vengono normalmente introdotti due tubetti d'iniezione e quindi due valvole di iniezione distanziate di 0,75 m: nella valvola superiore è così possibile iniettare preventivamente un certo quantitativo di miscela cementizia in modo da costituire una sorta di "cappello" che trattenga il gel di silice iniettato successivamente attraverso la valvola inferiore (vedere la figura n. 5)

• laddove la sottospinta risulti importante, dovuta ad un carico superiore agli 8 m, come ad esempio al di sotto della vasca centrale di aggotamento ( $h = 10,70$  m), i tubetti da immettere in ciascun foro devono essere 3, al fine di potere eseguire un trattamento a "sandwich": iniezione di gel di silice al centro, dopo avere iniettato miscela cementizia sopra e sotto (vedere figura n. 6).

In considerazione della differente entità del battente idraulico nelle vasche successive, nonché della relativa profondità dei fondelli e quindi del diverso rischio di eventuali deviazioni, la disposizione planimetrica dei fori è stata realizzata con geometrie diverse; in particolare:

- per la vasca di aggotamento con fondello posto ad una profondità di circa 23,5 m dal piano di lavoro, con battente previsto di 11 m, maglia triangolare 1,1x1,3 m;
- per le vasche più profonde, con fondello posto ad una profondità di oltre 11m dal piano di lavoro e con battente previsto superiore a 4,6 m, maglia triangolare 1,1x1,3 m;
- per le vasche meno profonde, con fondello variabile da 4,8 m a 8,3 m dal piano di lavoro e con battente previsto da 2,8 m a 4,3 m, maglia triangolare 1,3x1,5 m.

Per la realizzazione del tampone di fondo nel complesso sono stati eseguiti 50500 m di perforazione, con l'iniezione di circa 1400 m<sup>3</sup> di miscela cementizia e 4250 m<sup>3</sup> di gel di silice, in un totale di 5426 fori con lunghezza variabile tra 4,8 e 23,5 m.

Le operazioni di iniezione si sono svolte regolarmente con l'applicazione di questa tecnologia del tutto particolare; come già detto, tecnologia anomala rispetto alle normali iniezioni, perché per realizzare lo strato omogeneo impermeabilizzato si è dovuto ricorrere a portate e pressioni molto alte e contemporaneità di iniezione di fori molto vicini gli uni agli altri.

## VERIFICA DEI RISULTATI

Dopo il completamento dell'iniezione è stata eseguita una prova di pompaggio con pozzo di emungimento e 4 piezometri di controllo.

Tale prova, realizzata nella zona più sfavorevole perché soggetta alla massima spinta idraulica, ha fornito buoni risultati, soprattutto in considerazione del fatto che è

7



**7. Vista generale dell'opera in fase di getto della platea armata. Al di sotto si possono notare il geotessile tessuto non tessuto, lo strato drenante con i tubi filtranti, il pacchetto dell'impermeabilizzazione sotto il magrone della platea. I teli impermeabili risvoltano sulle paratie.**

samente innovativo.

Dobbiamo tuttavia sottolineare che la conduzione di una simile operazione non è semplice e deve essere condotta con notevole capacità organizzativa, mezzi adeguati e monitoraggio continuo.

Evidenziamo, a solo titolo esemplificativo, qualche esigenza che deve assolutamente essere rispettata per non rischiare di incorrere in un insuccesso:

• i punti di iniezione devono essere complanari. Il posizionamento delle valvole di iniezione alla stessa quota richiede un controllo di alta precisione. Al cantiere di Peschiera è stato utilizzato un sistema con raggio laser rotante. La non complanarità in un terreno di depositi alluvionali potrebbe originare dei punti di debolezza facilmente "sfondabili" dall'acqua di filtrazione.

Per questo stesso motivo il trattamento non ha potuto seguire l'inclinazione delle rampe di scavo, ma ha dovuto essere suddiviso in vasche orizzontali a quote decrescenti





8. Vista della vasca di aggotamento; si notano i diaframmi con i tiranti in testa e la struttura in c.a. di contrasto. Al centro i pilastri di sostegno dell'impalcato stradale.

stata realizzata prima della sigillatura, a mezzo jet grouting, dei giunti tra pannelli dei diaframmi laterali.

Le misure effettuate sia nel corso di questa prova sia a lavori ultimati, tramite pompaggio direttamente dalla vasca di aggotamento, hanno permesso di calcolare il coefficiente di permeabilità che mediamente ha raggiunto, in corrispondenza del fondello, valori attorno a  $1,5 \times 10^{-5}$  cm/sec.

In considerazione del carico idraulico medio questi valori equivalgono ad una portata residua pari a 0,6 l/s ogni 1000 m<sup>2</sup> di fondello, inferiore a quanto calcolato in progetto (1,3 l/sec per 1000 m<sup>2</sup>).

Sarebbe auspicabile verificare questi valori anche nel lungo termine, tramite prove di pompaggio della vasca di aggotamento in periodi di non pioggia.

Gli scavi, che hanno raggiunto nel punto centrale, in corrispondenza della vasca di aggotamento, la profondità di 13,4 m, con un battente di 10,7 m, sono stati eseguiti in condizioni pressochè asciutte (vedere figura n. 7), con l'ausilio di una sola pompa, che, lavorando ad intermittenza, consentiva lo smaltimento dell'acqua raccolta entro una piccola pozza, ubicata in prossimità della parte più profonda dello scavo.

## TEMPISTICA DELLE LAVORAZIONI

I lavori specializzati per la realizzazione del fondello impermeabile, dei setti di separazione tra vasche, di cucitura dei diaframmi al fondello sono iniziati nel gennaio 1998 e sono stati completati nel mese di luglio dello stesso anno.

Il lavoro è stato organizzato su cinque giorni di lavoro per settimana, con due turni di 8 ore di lavoro al giorno.

Le opere di scavo sono iniziate nel successivo mese di settembre.

L'opera stradale nel suo complesso è stata completata nel luglio 1999.

Dal successivo mese di dicembre il sottopasso è stato aperto al traffico.

## SISTEMA DI POMPAGGIO E DI SICUREZZA

Poiché il piano stradale è situato sotto il livello della falda, per garantire la sicurezza della viabilità è stata realizzata una vasca di accumulo (vedere figura n. 8) che raccoglie separatamente l'acqua di falda proveniente dalle filtrazioni residue attraverso il fondello di impermeabilizzazione o i giunti profondi delle paratie e l'acqua di prima e seconda pioggia che viene recapitata, a seconda dei casi,

nella fognatura comunale o in una roggia.

Il tutto è accompagnato da un importante impianto di sollevamento sotto il corpo stradale.

In assenza di precipitazioni il sistema di sollevamento pompa una portata di 5 l/sec. Tale valore corrisponde a quello teorico che si otterrebbe ipotizzando una permeabilità residua del fondello pari a  $1,5 \times 10^{-5}$  m/sec e la perfetta impermeabilità dei giunti tra le paratie perimetrali.

L'impianto di sollevamento, oltre tutta una serie di pompe funzionanti alternandosi fra loro 24 ore al giorno per garantire l'asciutta del piano viabile, comprende anche un sistema di sicurezza che, in caso di guasto del predetto pompaggio, invia un segnale differenziato nel seguente modo:

- su un pannello a messaggio variabile posto a 200 m al di fuori del sottopasso appare un messaggio di pericolo che preavvisa gli utenti a non prendere il sottopasso, bensì la controstrada laterale;
- un semaforo posto immediatamente al di fuori del sottopasso segnala il rosso per il sottopasso, con una freccia verde di uscita sulla controstrada;
- un sistema telefonico, tramite una voce preregistrata, comunica al Compartimento ANAS di Milano l'immediato guasto.

## CONCLUSIONI

L'intervento specialistico illustrato, per quanto concerne il fondello impermeabile, rappresenta una novità per l'Italia.

Questa tecnologia assomma due vantaggi rimarchevoli nei confronti dei fondelli tradizionali: la rapidità di intervento ed i bassi costi, derivanti dalla semplicità delle operazioni di iniezione e dall'impiego di miscele con prodotti di basso valore.

Si vuole tuttavia porre l'accento sul fatto che, pur nella loro semplicità, questo tipo di intervento per avere successo esige una potenzialità notevole di mezzi a disposizione e una grande maestria nella gestione di tutte le operazioni e controlli in corso d'opera.

Anche il tipo di terreno e la sua composizione granulometrica giocano un ruolo importante, perché il claquage deve essere conseguito con relativa facilità e le pezzature più grossolane devono essere presenti in quantitativo limitato, tale da non ostacolare il procedere "dell'onda" di gel di silice. ■