

L'IMPIEGO DI POZZI PROVA NELLA REALIZZAZIONE DI OPERE IN SOTTERRANEO IN AREA URBANA

P. Lunardi*, A. Focaracci**, A. Valente**

* Studio di progettazione Lunardi, Milano

** Rocksoil S.p.A., Milano

*** Rocksoil S.p.A., Roma

SOMMARIO

L'articolo riporta alcuni risultati di un'indagine sui terreni e sulle caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo di Roma (zona Piazza Cavour), condotta previa esecuzione di un pozzo-prova di 5 m di diametro, spinto sino a circa 30 m di profondità. Essa ha permesso, in particolare, di:

1. studiare la risposta dei terreni ai differenti tipi di trattamento (iniezioni di miscele cementizie e chimiche, jet-grouting, congelamento) e di parametri operativi utilizzati;
2. analizzare le problematiche d'interazione tra trattamenti e falda acquifera;
3. valutare il comportamento allo scavo del complesso geologico circostante il pozzo.

I risultati dell'indagine, di grande interesse, consentiranno una progettazione più accurata della nuova tratta della metropolitana di Roma.

1. GENERALITÀ

La realizzazione di importanti opere sotterranee in area urbana solitamente comporta la risoluzione di delicate problematiche costruttive che, soprattutto se i terreni interessati dagli scavi presentano scarse qualità geomeccaniche, sono legate, per lo più, all'esigenza di minimizzare l'entità dei cedimenti in superficie. Questi, infatti, se non convenientemente contenuti, potrebbero causare gravi dissesti agli edifici e alle altre strutture e infrastrutture già esistenti. D'altra parte, la definizione, in fase di progettazione esecutiva, dei sistemi d'attacco, delle metodologie di consolidamento e degli interventi conservativi più idonei a garantire la stabilità e la sicurezza degli scavi a breve e a lungo termine, quindi la minimizzazione dei suddetti cedimenti, richiede la perfetta conoscenza delle caratteristiche dei terreni in gioco, non solo dal punto di vista geotecnico e geoidrologico, ma anche da quello della risposta di ciascun litotipo ai diversi trattamenti di consolidamento (si ricorda, a questo proposito, che spesso è necessario un consolidamento preventivo del terreno anche laddove l'avanzamento è previsto che avvenga con sistemi altamente meccanizzati, quali scudi o frese).

Infatti, se non si vuol correre il rischio di spiacevoli sorprese quando ormai è troppo tardi (come rendersi conto ad opera parzialmente già scavata che gli interventi di consolidamento del terreno non hanno sortito il miglioramento previsto), occorre poter controllare in anticipo, tramite l'osservazione diretta dei terreni, l'effetto prodotto da ciascun tipo d'intervento. Quando le opere da realizzare sono ubicate a debole profondità, ciò è possibile con la realizzazione dei cosiddetti "campi-prova", dove i terreni interessati possono venir indagati e monitorati a fondo, prima durante e dopo i

trattamenti, quindi scavati per osservare direttamente l'effetto prodotto da questi. Quando, invece, le opere da realizzare sono ubicate più in profondità, le stesse informazioni conseguibili normalmente con i tradizionali campi-prova possono essere ottenute attraverso la costruzione di pozzi-prova, di qualche metro di diametro, spinti sino ad intercettare i terreni da studiare. Potendo in tal modo verificare direttamente la risposta di questi ai vari tipi di consolidamento e il loro comportamento allo scavo del pozzo, si rende possibile:

1. ottimizzare gli interventi di consolidamento (miscele d'iniezione, parametri operativi e geometria);
2. stimare con precisione i coefficienti di sicurezza ottenibili con l'impiego dei diversi tipi di trattamento, evitando inutili sovradimensionamenti;
3. analizzare le problematiche connesse all'eventuale presenza di una o più falde acquifere;
4. valutare il comportamento allo scavo del complesso geologico circostante il pozzo.

Di conseguenza, è possibile stimare con precisione tipo, entità e costi degli interventi di consolidamento necessari, la cui incidenza generalmente è di gran lunga preponderante su tutte le voci di costo dell'opera da realizzare.

Il relativamente limitato impegno finanziario necessario per la costruzione di un pozzo-prova è, dunque, ampiamente ripagato dai numerosi vantaggi che questo offre in termini economici e di sicurezza, soprattutto in quelle aree in cui non si è mai costruito in sotterraneo, per le quali non sono note a sufficienza le caratteristiche dei terreni in gioco, né si dispone di una qualsiasi casistica di riferimento.

2. PROGETTO E COSTRUZIONE DI UN POZZO-PROVA

Quando si è posto il problema della realizzazione di nuove tratte della metropolitana di Roma (Linee B1 e C), avendo constatato dalle prime indagini geognostiche che le gallerie da scavare avrebbero interessato formazioni sabbiose ed argillose-torbose particolarmente infide e difficili da trattare, ai tecnici incaricati della progettazione è apparso subito assolutamente necessario studiare a fondo detti terreni e la loro risposta ai trattamenti previsti.

Data la notevole profondità da raggiungere, veniva deciso che la via migliore e più sicura per acquisire le informazioni che necessitavano era costruire un pozzo-prova spinto sino alla profondità delle opere da realizzare.

Si è dunque progettato e scavato, in piazza Cavour a Roma (fig. 1), un pozzo di 5 m di diametro, che secondo le previsioni iniziali avrebbe dovuto raggiungere la profondità di -35,5 m da p.c..

La scelta di ubicarlo in piazza Cavour è scaturita principalmente da due considerazioni:

- la stratigrafia del sito, comprendente un po' tutti i tipi di terreno prevalenti sulla linea da costruire;
- il fatto che qui si sarebbero avute le minori interferenze con le infrastrutture preesistenti (viabilità, servizi, ecc.).

Gli scavi del pozzo, eseguiti su progetto della Rocksoil S.p.A. di Milano dall'Impresa aggiudicatrice della gara d'appalto, Ing. G. Rodio & C. S.p.A., sono iniziati nel novembre 1996 e sono terminati nel giugno 1997. Durante i lavori di costruzione sono emersi problemi tecnici di diverso tipo, tutti connessi alla particolare natura dei terreni in gioco. Se ignorati e non adeguatamente considerati in fase progettuale, essi avrebbero certamente portato a serie difficoltà durante la costruzione delle opere previste per la metropolitana. Nel contesto di un "campo prove", invece, acquistano un valore positivo, essendo riferimenti utili per l'analisi e la messa a punto del progetto esecutivo, con particolare riguardo agli interventi di consolidamento e impermeabilizzazione necessari.

2.1 Quadro geostratigrafico e idrogeologico del sito

Nell'area compresa tra il F. Tevere, Piazza Cavour e Castel Sant'Angelo i sondaggi eseguiti in fasi successive (spinti anche

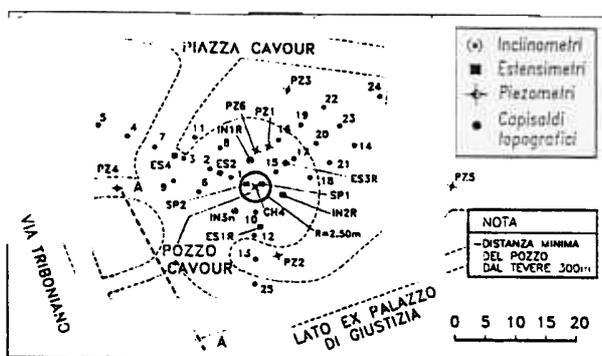


Fig. 1. Corografia e ubicazione strumenti di misura

sino a -65 m da p.c.) e la realizzazione stessa del pozzo Cavour hanno evidenziato la seguente situazione stratigrafica (fig. 2):

da -00,00 a -09,00 m	riporti (R);
da -09,00 a -12,00 m	argille palustri (AP),
da -12,00 a -22,00 m	alternanze di sabbie e limi con livelli argillosi (LS/SL; LS da 12 m a 16,5 m e SL da 16,5 m a 22 m);
da -22,00 a -32,00 m	argille torbose (AT);
da -32,00 a -55,00 m	argille di colore grigio-azzurro, a volte limose (AL);
	sabbie (S);
da -55,00 a -56,40 m	ghiaie in matrice sabbiosa
da -56,40 a -60,90 m	(GS);
da -60,90 a -65,00 m	alternanza di argilla-limosa e limo sabbioso (Argille Vaticane).

Dal punto di vista idrogeologico, risultano presenti principalmente due falde idriche: una si attesta nelle "ghiaie", a circa -60 m da p.c. (con livello piezometrico pari a -10 m da p.c.), l'altra nelle "sabbie", a circa -22 m da p.c. (con livello piezometrico pari a -11 m da p.c.). Le letture piezometriche effettuate con cadenza bisettimanale, escluso un periodo di circa due mesi in cui sono state eseguite ogni tre ore, evidenziano fluttuazioni anche di due metri, riconducibili, con un ritardo di circa sei ore, alle variazioni di livello del F. Tevere misurate all'idrometro "Ripetta" nello stesso periodo (fig. 3).

2.2 Aspetti progettuali

Il progetto per la costruzione del pozzo, tenuto conto anche che lo scopo ultimo della sua realizzazione era verificare la compatibilità e la resa dei differenti interventi di consolidamento operati sul terreno e l'effetto impermeabilizzante dei diversi tipi di miscele d'iniezione, prevedeva:

- l'esecuzione di una serie d'interventi di precontenimento del terreno al contorno del profilo di scavo, da realizzare con la tecnologia jet-grouting e, nei termini argillosi, con iniezioni di miscele cementizie e chimiche;
- l'impermeabilizzazione del nucleo di scavo (fondo del pozzo) con iniezioni di miscele cementizie e chimiche.

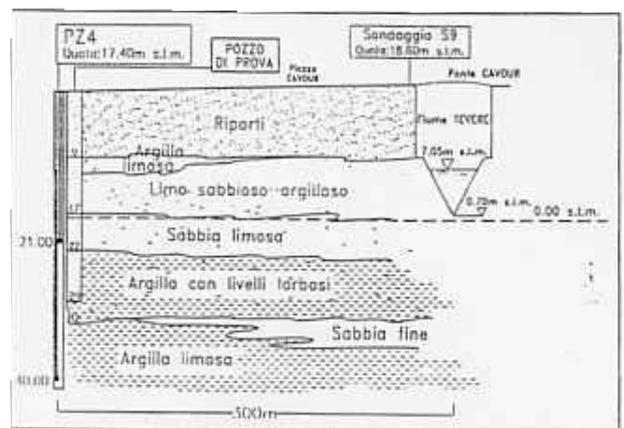


Fig. 2. Sezione stratigrafica A-A

2.3 Programma di monitoraggio

Ai fini dell'acquisizione di informazioni sul comportamento allo scavo dei terreni e sulla loro risposta ai diversi tipi di trattamento, era fondamentale progettare una campagna completa d'indagini da esperire in situ e in laboratorio e un sistema di monitoraggio consoni per il perseguimento degli obiettivi.

Di conseguenza, prima di cominciare i lavori di costruzione dell'opera, nella zona circostante il pozzo si è installata tutta una serie di strumenti di misura eseguendo le letture di riferimento necessarie: in tutto 30 capisaldi topografici, 3 tubi inclinometrici, 3 tubi estensimetrici e 10 piezometri. La distribuzione planimetrica di tutti questi strumenti è sintetizzata in figura 1. Si sono inoltre eseguiti:

- sondaggi a carotaggio continuo in corrispondenza dei fori PZ1, PZ5, CH4 per prelevare almeno 12 campioni indisturbati da sottoporre a prove di laboratorio ed eseguire alcune prove pressimetriche tipo "Menard" e di permeabilità tipo "Lefranc";
- perforazioni a distruzione di nucleo con esame visivo del "cutting", in corrispondenza dei fori IN1, IN2, IN3, ES1, ES2, ES3, PZ2, PZ3, PZ4;
- alcune prospezioni geofisiche tipo "cross-hole".

Controlli in corso d'opera

Il progetto prevedeva tutta una serie di indagini e misure da eseguire, con tempistiche diverse, durante la realizzazione del pozzo.

- Dopo l'esecuzione degli interventi di iniezione con miscele cementizie e chimiche e prima di eseguire lo scavo del pozzo:

- sondaggio a carotaggio continuo con determinazione dell'indice RQD per ogni tratto di terreno consolidato, ivi compreso quello interno al pozzo trattato con jet-grouting;
- prove pressimetriche, una per ogni tratto consolidato;
- prove di permeabilità "Lefranc", una per ogni tratto consolidato.
- Durante lo scavo del pozzo, nei tratti consolidati con iniezioni:
 - prelievo di campioni cubici indisturbati di terreno, di dimensioni minime 30 x 30 x 30 cm, per l'esecuzione di prove di laboratorio;
 - rilievo geostrutturale sistematico dei trattamenti.
- Durante lo scavo del pozzo, nei tratti consolidati con jet-grouting:
 - rilievo geostrutturale delle colonne con misura del diametro efficace delle stesse.
- Durante lo scavo del pozzo, qualunque fosse il tipo di trattamenti operati:
 - posa in opera di 2 stazioni strumentate nel rivestimento dello stesso, realizzate rispettivamente a 26,0 m e 31,0 m di profondità, ognuna costituita da 3 celle di carico e da 3 estensimetri disposti a 120°.

2.4 Fase costruttiva

La costruzione del pozzo è iniziata subito dopo la messa in esercizio del relativo monitoraggio sopra descritto ed è proceduta secondo le seguenti fasi:

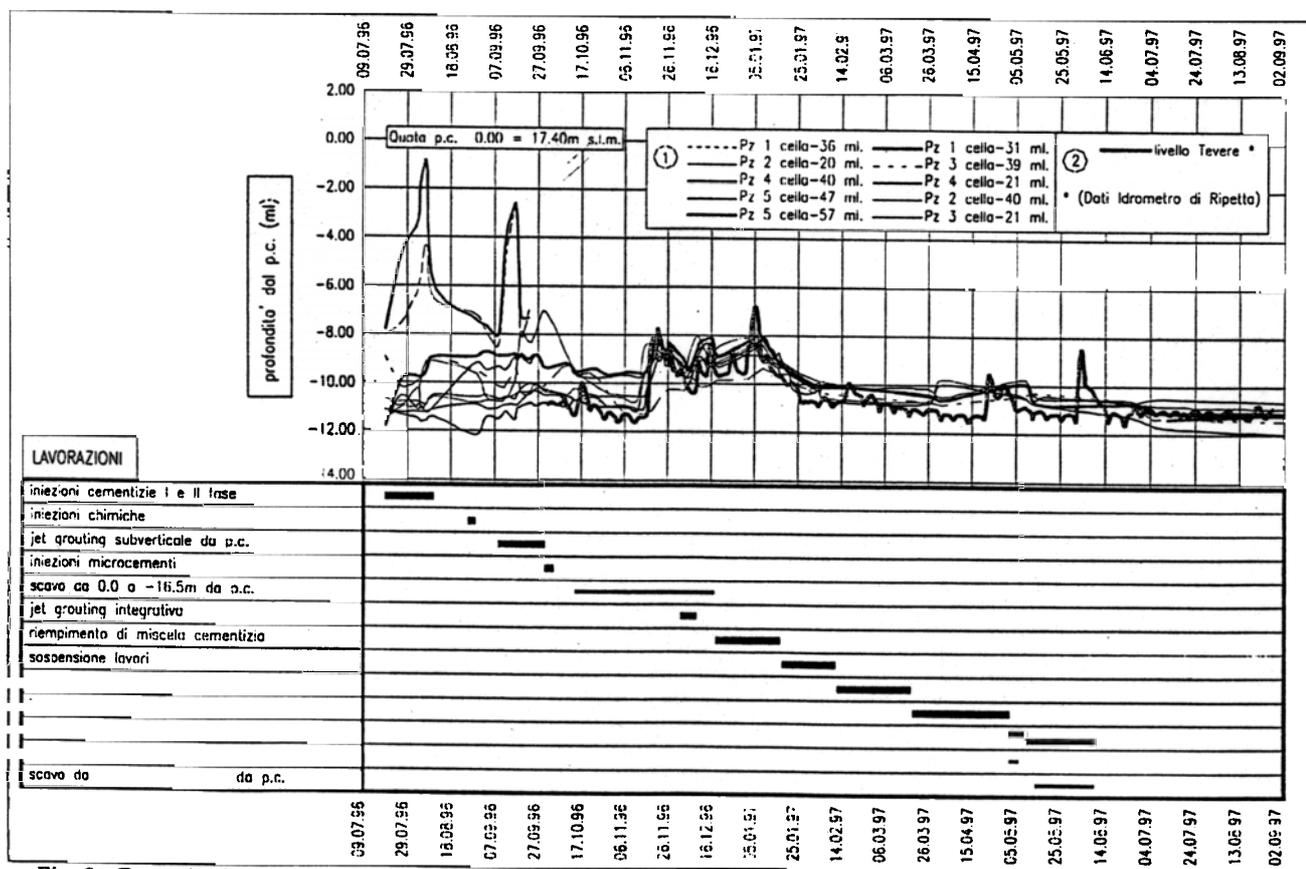


Fig. 3: Escursioni della falda durante le diverse lavorazioni e livello del F. Tevere

- Fase 1:

Si sono eseguite, a partire dal p.c., le perforazioni per la realizzazione dei primi due campi di iniezioni (tra -12,0 e -17,0 metri e tra -22,0 e -34,0 metri da p.c.), disposte all'interno del pozzo su due maglie ad interasse diverso (0,71 e 1,00 metri) e attrezzate con tubi di PVC equipaggiati con valvole (3 al metro) nei tratti da iniettare.

- Fase 2:

Dopo aver realizzato le iniezioni cementizie e la trave di testata, lasciando in opera adatti tubi d'invito di PVC: si è proceduto nella realizzazione della coronella circolare esterna al pozzo di colonne di terreno consolidato mediante jet-grouting, ciascuna di 60 cm di diametro efficace 30 m di lunghezza, armate con tubi d'acciaio Ø 88,9 mm, spessore 8 mm.

- Fase 3:

Si è quindi scavato il pozzo con avanzamenti di 1 m fino a quota -16,5 m da p.c. con contemporanei stabilizzazione delle pareti di scavo con centine a profilato singolo IPE 120 (una al metro) e spritz-beton fibrorinforzato (spessore medio 10 cm).

Giunti a tale profondità (dicembre 1996) cominciarono a manifestarsi importanti venute d'acqua con trasporto di materiale, tali da impedire il proseguimento dei lavori in condizioni di sicurezza. In seguito a ciò, per proseguire la costruzione del pozzo apparve necessario predisporre un progetto di variante che ne assicurasse l'impermeabilità. Le scelte possibili erano due:

- integrare la coronella di colonne di terreno consolidato con il sistema jet-grouting esistente al contorno del pozzo con una seconda analoga, realizzata con colonne operate a passo più ravvicinato;
- congelare il terreno per un'opportuna fascia al contorno dello scavo da realizzare.

La Direzione Lavori optava per la seconda ipotesi che, tra l'altro, avrebbe consentito di verificare *a posteriori* la verticalità delle perforazioni, una delle cause principali del problema verificatosi.

Il nuovo progetto, redatto su tale base dalla Rocksoil S.p.A., prevedeva anche di limitare la profondità dello scavo a -29 m da p.c. e di predisporre per la realizzazione del cunicolo-prova inferiore, senza però procedere alla sua costruzione.

I lavori sono dunque ripresi nel Febbraio 1997 seguendo il seguente schema operativo:

- Fase 3 bis (proseguimento della Fase 3 precedente):

Da un piano di lavoro formato a -14 m da p.c.: realizzazione delle perforazioni per l'esecuzione del campo d'iniezioni tra -29,0 m e -34,0 m da p.c. per l'integrazione del tampone di fondo.

- Fase 4:

Esecuzione di un trattamento d'iniezioni cementizie di ricompressione di una fascia di terreno, al contorno del pozzo, compresa tra -8,0 m e -34 m da p.c.. Quindi, realizzazione, da p.c., del consolidamento per congelamento della stessa (mediante l'impiego di azoto liquido), attraverso l'opportuna messa in opera di 34 sonde congelatrici (interasse 0,63 m) (fig. 6) utilizzando le stesse canne utilizzate per l'operazione precedente. Lo spessore di terreno congelato, valutato in circa

1 m, avrebbe assicurato la perfetta impermeabilità del contorno del pozzo e sarebbe stato controllato, a varie profondità, tramite la misurazione della temperatura rilevata da 6 sonde termometriche.

- Fase 5:

Scavo per avanzamenti di 1 m fino a raggiungere quota -29 m da p.c., posa delle centine IPE 120 (una al metro) e getto del rivestimento di 1° fase di spritz-beton fibrorinforzato di spessore medio 10 cm.

- Fase 6:

Posa dell'armatura (compresi i ferri di attesa) e getto della platea di fondo di spessore 1,5 m; quindi: sospensione dell'erogazione dell'azoto liquido con conseguente scongelamento del terreno al contorno del pozzo. Sarebbe seguito il getto per campioni del rivestimento definitivo del pozzo, armato in corrispondenza dell'apertura dell'eventuale cunicolo-prova inferiore, tra -22,95 m e -27,10 m da p.c.

I lavori sono terminati nel Giugno 1997 senza più incontrare difficoltà di rilievo.

2.6 Modalità operative e interpretazione dei dati di monitoraggio

Come abbiamo precedentemente accennato, la realizzazione del Pozzo "Cavour" aveva tra gli scopi quello di studiare la risposta dei diversi tipi di terreno ai differenti tipi di trattamento. Di conseguenza, le operazioni di costruzione sono state condotte in maniera da consentire di provare il maggior numero possibile di tecnologie e di prodotti e studiarne il comportamento attraverso un accurato monitoraggio.

In particolare, i trattamenti d'iniezione previsti per la 1° fase sono stati operati in più riprese suddividendo il volume cilindrico da iniettare in quattro quadranti e, verticalmente, in più campi. Sono state eseguite iniezioni di miscela cementizia in due fasi su 33 fori differenziando il dosaggio della miscela con colore rosso (II e III quadrante) e colore giallo (I e IV quadrante), sui 19 fori del I e IV quadrante è stata, inoltre, eseguita una terza fase di iniezione chimica. Successivamente è stata eseguita un'integrazione di miscela cementizia rossa nel 2° campo (da -22 m a -27 m) in 8 fori del III quadrante (di cui 4 riperforati) e un'iniezione di cementi microfini nel 2° campo (da -22 m a -27 m) in 4 fori riperforati del II quadrante. Complessivamente sono stati eseguiti n°45 fori da p.c. (circa 2 tubi a m²). Nel 1° campo sono state iniettate circa 15 m³ di miscela cementizia rossa e 25 m³ di miscela cementizia gialla, nel 2° campo sono state iniettate circa 51 m³ di miscela rossa e 71 m³ di miscela gialla. Di miscela chimica sono stati iniettati circa 8 m³ nel 1° campo e circa 19 m³ nel 2° campo. Nel 2° campo sono state iniettate circa 5 m³ di cementi microfini.

La composizione della miscela di guaina e cementizie è

stata la seguente:

	A/C	Ac-qua	Ce-men.	Bento-nite	Flui-dific.	Colo-rante	Peso spec.
		l/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/l
Miscela Guaina	1.6 7	826	495	33	--		1.356
Miscela 1 (gialla)	1.0	736	736	15	7.35	7.5	1.502
Miscela 2 (rossa)	1.2	766	638	25.5	6.8	6.8	1.442

La geometria dei trattamenti è illustrata in fig. 4.

L'influenza dei diversi trattamenti eseguiti sulle pressioni interstiziali è illustrata nei diagrammi riportati in fig. 3, dai quali si evince anche la diversa risposta idraulica dei vari materiali ai diversi tipi di trattamento. Nelle sabbie e nelle argille grigio-azzurre a volte limose (-36 m da p.c.) il massimo incremento di pressione interstiziale si è registrato durante l'esecuzione dei trattamenti jet-grouting; nelle argille torbose, invece, il massimo incremento si è osservato durante l'esecuzione del trattamento con iniezioni tradizionali.

La rete di capisaldi topografici (n° 30) intorno al pozzo, gli estensimetri incrementali (n° 3) e gli inclinometri (n° 3) hanno permesso di monitorare tutti i movimenti del terreno all'interno del pozzo, sia a piano campagna, sia in profondità fino a -32 m, durante tutte le varie fasi lavorative. Sia gli estensimetri che gli inclinometri hanno rilevato i movimenti del terreno alle varie profondità ben correlabili ai vari trattamenti o scavi, con deformazioni locali variabili fino a circa 20 mm. Nella figura 5 sono riportati i movimenti del piano campagna, ricavati dalle livellazioni topografiche, in funzione del tempo e delle lavorazioni eseguite: si notino i sollevamenti centimetrici dovuti al jet-grouting e i cedimenti dovuti allo scavo.

Il congelamento del terreno intorno al pozzo è stato realizzato con azoto liquido immesso in sonde congelatrici poste ad interesse di circa 60 cm. È stato eseguito un monitoraggio giornaliero della temperatura fino a -34 m di profondità mediante sei sonde termometriche disposte all'interno del pozzo e a diverse distanze da questo, in modo da poter valutare anche lo spessore di terreno congelato ottenuto. In figura 6 è riportato un esempio dell'andamento della temperatura rilevata ad una certa profondità in funzione del tempo.

2.7 Risultati dei trattamenti eseguiti

L'efficacia dei trattamenti è stata controllata durante gli scavi valutando sia la loro funzione strutturale sia l'azione impermeabilizzante ottenuta.

Mentre l'effetto dei consolidamenti operati sui terreni situati entro i primi 22 m da p.c. [(alternanze di sabbie e limi con livelli argillosi (LS/SL) e argille torbose (AT)] si è potuto verificare senza difficoltà, la verifica dell'effetto dei trattamenti operati più in profondità (nei terreni argillosi torbosi e argillo-limosi) è stata considerevolmente più complessa, in seguito ai fenomeni accaduti in fase costruttiva (venute d'acqua con trasporto di materiale), ed ai conseguenti interventi resisi necessari. In particolare, quello di congelamento ha reso problematica la verifica dell'efficacia degli altri trattamenti poiché, con il procedere degli scavi, i

suoi effetti, estendendosi al terreno all'interno del pozzo, hanno progressivamente prevalso, anche in termini strutturali, su quelli di questi ultimi.

- Iniezioni cementizie da p.c.

Nello strato sabbioso-limoso (SL/LS), le miscele, iniettate a 10 bar di pressione nella prima fase e a 15 bar nella seconda fase, hanno interessato una zona pari a 3 + 4 volte l'area di scavo del pozzo, estendendosi a profondità non direttamente interessate dal trattamento. L'elevato assorbimento di miscela e la bassa percentuale di valvole a rifiuto, sono conseguenza dell'effetto "claquage", che si è sviluppato secondo vie preferenzialmente sub-orizzontali, con spessori compresi tra 1 mm e 10 cm. L'estensione delle vie di fuga della miscela è stata mediamente di 1 m.

Tra gli effetti delle iniezioni cementizie sullo strato SL/LS, va citato un significativo addensamento sia del materiale direttamente trattato sia di quello esterno al campo di trattamento (particolarmente deformabile). L'addensamento delle sabbie è confermato dalla maggiore percentuale di recupero del sedimento ottenuta durante la fase di carotaggio post-trattamento (si è passati da RQD 30% a RQD 80%).

Sullo stesso strato, le iniezioni cementizie hanno sortito un buon effetto impermeabilizzante, che è stato perfezionato dalla chiusura dei vuoti prodotta per permeazione dalle successive iniezioni chimiche. Infatti, le venute d'acqua più consistenti sono provenute dal contorno dello scavo protetto dalla singola coronella di colonne "jet-grouting" e non dal fondo dello stesso.

I cedimenti misurati dagli estensimetri nello strato sabbioso-limoso e, durante lo scavo, le dimensioni delle guaine dei tubi

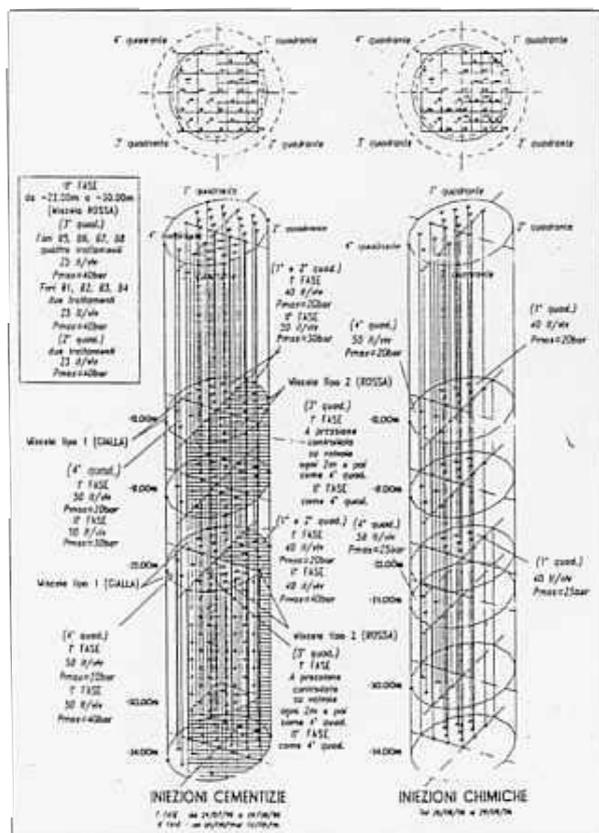


Fig. 4: Geometria dei trattamenti d'iniezione

d'iniezione (dell'ordine dei 30 cm di diametro) hanno evidenziato l'estrema compressibilità del materiale che lo costituisce.

Nel campo di trattamento più profondo (da -22 m a -34 m da p.c.), nelle argille torbose delle alluvioni recenti (AT), l'assorbimento delle miscele ha avuto le stesse caratteristiche dello strato superiore, mentre gli estensimetri non hanno riscontrato la stessa intensità di cedimento.

Il "claquage", provocato dalle iniezioni nelle argille (AT) si è sviluppato secondo vie preferibilmente sub-verticali che, con

la ripetizione delle passate, sono andate via via allargandosi (spessori fino a 20 cm). Il "claquage" orizzontale si è riscontrato principalmente nelle zone delle argille più torbose, lungo i livelletti di torba. In alcune zone dove questi erano più frequenti, il "claquage" ha provocato una vera e propria distruzione della struttura originaria con sostituzione delle zone più aperte con miscela cementizia.

Dove l'argilla si presentava piuttosto compatta, le iniezioni si sono sviluppate prevalentemente in senso sub-verticale

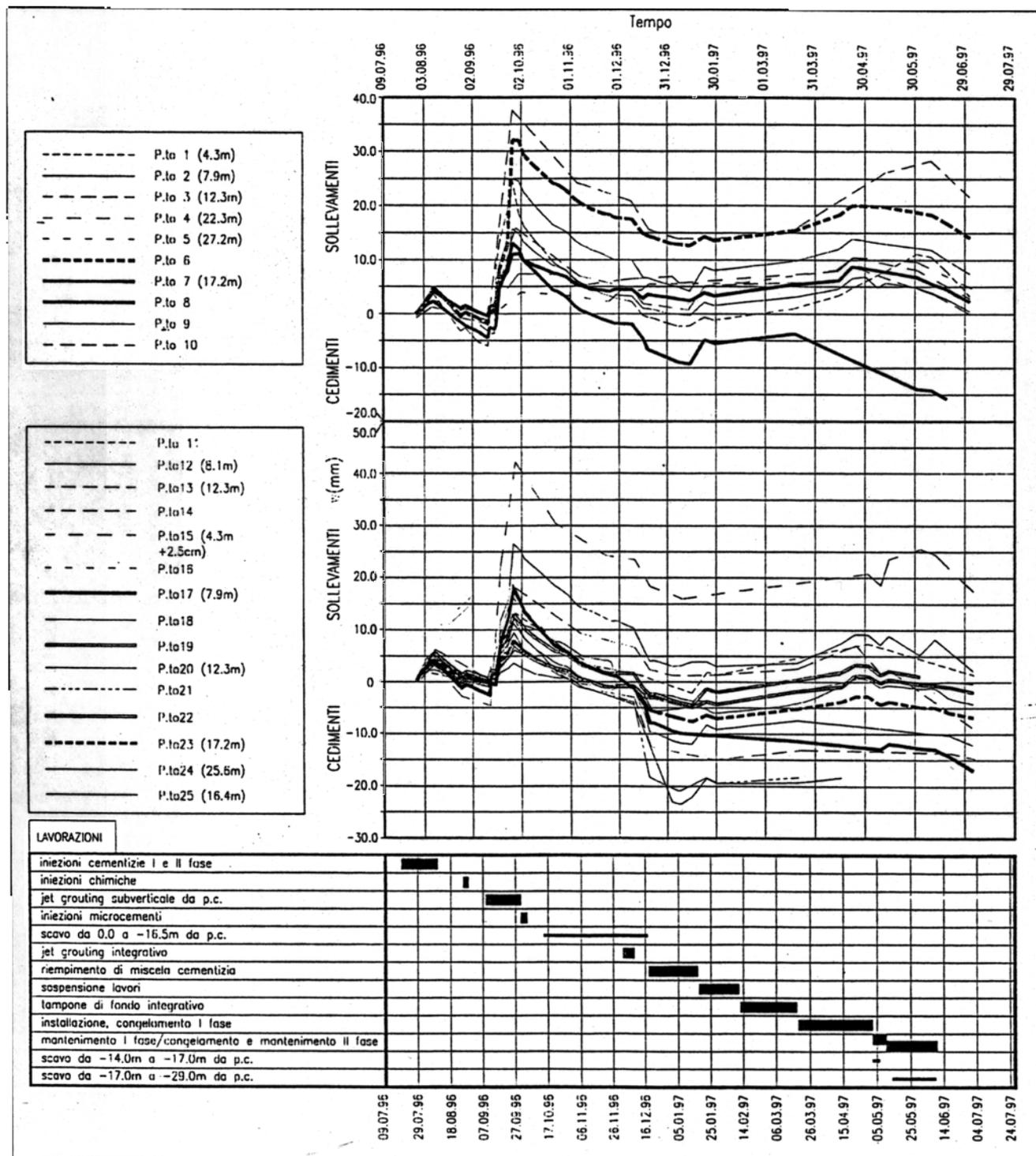


Fig. 5: Movimenti del piano campagna intorno al pozzo nel corso dei diversi trattamenti

intorno alla guaina, le cui dimensioni sono risultate inferiori rispetto a quelle nello strato più superficiale (mediamente 15 cm).

- **Tattamento *jet-grouting* al contorno del pozzo**

Come già accennato, con la tecnologia *jet-grouting* si è realizzata la coronella di colonne di terreno consolidato per il contenimento provvisorio delle pareti di scavo del pozzo e per l'impermeabilizzazione delle stesse.

L'effetto del trattamento nelle alluvioni recenti e nei riporti ha prodotto il danneggiamento di alcuni strumenti (inclinometri, estensimetri, celle piezometriche) e sollevamenti superficiali centimetrici localizzati nelle adiacenze delle colonne eseguite.

Per la zona dai -18 ÷ -20 m da p.c. (strato sabbioso-limoso si sono registrate elevate percentuali di spurgo.

Durante lo scavo del pozzo si sono poi riscontrate delle discontinuità nel trattamento causate, da un lato, dall'eterogeneità del terreno e, dall'altro lato, dalla presenza del precedente trattamento di iniezioni (zone con guaine di dimensioni rilevanti e con importanti lame di "claquage"). Per gli stessi motivi si sono avuti anche problemi di deviazione dall'asse teorico di progetto durante la perforazione, (complessivamente le colonne con deviazione percentuale superiore a quella ammessa (1%) sono 8, il 19,5%).

La mancanza di continuità nella singola coronella, anche solo in alcuni punti, in questo tipo di terreni, caratterizzati da

valori di permeabilità d'ammasso molto disomogenei, è causa di rilevanti venute d'acqua con trasporto solido.

Dal punto di vista strutturale, le dimensioni delle colonne "*jet-grouting*" nello strato sabbioso-limoso (SL/LS) hanno raggiunto valori prossimi a quelli di progetto (diametro medio 55 cm), sono risultati invece leggermente inferiori nelle argille (AT). Non si è riscontrato alcun effetto "*claquage*" a conferma della rilevante disgregazione causata nel terreno dal trattamento.

- **Tattamento di congelamento al contorno del pozzo nei terreni sottofalda**

Il trattamento di congelamento, come abbiamo già detto, è stato necessario per por riparo all'insufficiente impermeabilizzazione garantita dal consolidamento "*jet-grouting*" eseguito precedentemente.

Le temperature rilevate nel terreno (fig. 6), dopo le iniezioni di ricompressione (18°C ÷ 25°C), mostrano un incremento, rispetto alla situazione della falda nel terreno naturale, che ha ostacolato il raggiungimento, nella prima fase di congelamento, delle temperature necessarie per la formazione di un sufficiente spessore di terreno congelato (circa -10°C).

La successiva consistente ripresa del congelamento, che in termini di quantitativi di azoto immesso ha superato le necessità teoriche di progetto, ha avuti come conseguenza il propagamento del congelamento ben oltre lo spessore di progetto, fino ad avere, negli ultimi metri di scavo, una

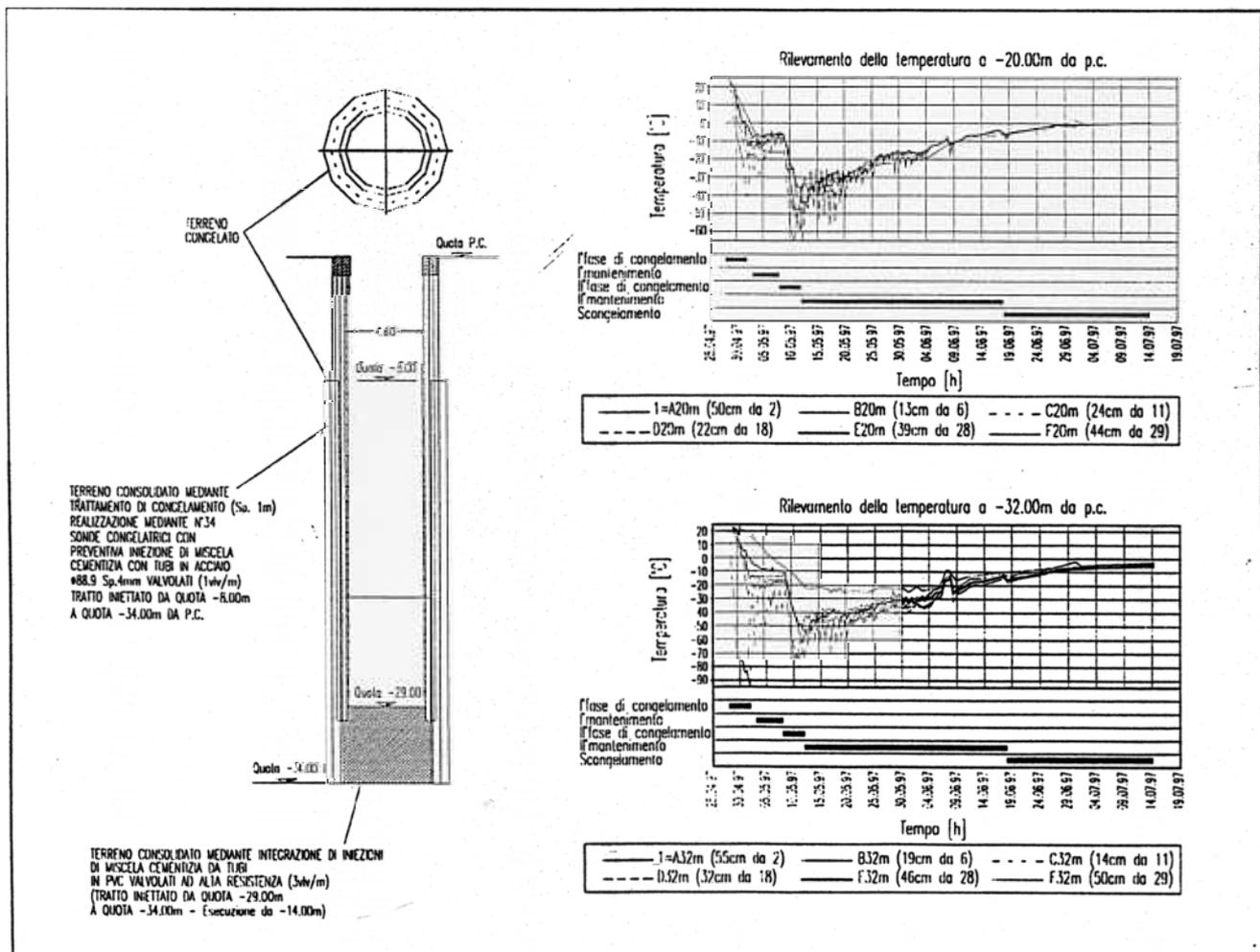


Fig. 6: Trattamento di congelamento: distribuzione della temperatura nel terreno al contorno del pozzo

funzione non solo impermeabilizzante, ma anche strutturale, che ha prevalso sul trattamento in jet grouting precedente.

Le ripercussioni del successivo scongelamento sui terreni trattati sono state misurate dalle celle di pressione installate, che hanno mostrato un incremento di carico legato sia alla migrazione delle sollecitazioni dal terreno consolidato al rivestimento definitivo, sia all'effetto dello scongelamento dell'acqua interstiziale. Una lettura topografica (eseguita a 4 mesi di distanza dallo scongelamento) ha evidenziato un cedimento, nei punti più prossimi al pozzo, di circa 1,5 cm e un valore medio di assestamento di 1 cm.

3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La costruzione del pozzo Cavour, propedeutica alla realizzazione di importanti opere in sotterraneo per le nuove tratte della metropolitana di Roma è risultata molto utile sia per verificare la risposta dei terreni interessati dagli scavi ai vari tipi di consolidamento previsti, sia per ottimizzare tali consolidamenti che, nel caso di costruzioni sotterranee in ambiente urbano, costituiscono una delle voci più importanti di costo delle opere.

Mentre, le difficoltà incontrate durante la costruzione del pozzo Cavour si sono potute superare facilmente mediante il ricorso al congelamento del terreno (una tecnologia di consolidamento non prevista dal progetto iniziale), grazie al fatto che si trattava di una "prova", certamente non sarebbe stato altrettanto semplice ed economico cambiare in corso d'opera il progetto esecutivo delle gallerie e delle stazioni della metropolitana, una volta constatata l'impossibilità di avanzare con le modalità previste.

Considerato ciò e i costi di costruzione di un pozzo-prova, tutto sommato modesti se rapportati a quelli dell'opera finale (per il pozzo Cavour si sono spesi circa 1,5 miliardi di lire), è evidente come questa vada considerata un oculato investimento per evitare sorprese future ben più onerose.

È in questa ottica che, in accordo col Comune di Roma, è stato realizzato un nuovo campo prove (pozzo prova + cunicolo prova) anche in piazza Annibaliano. I risultati, attualmente in fase di elaborazione, serviranno per la stesura del progetto esecutivo della linea B1 della metropolitana.

SUMMARY

The construction of major underground works in urban areas usually involves facing delicate construction problems which are for the most part connected with the need to minimise surface subsidence and this is especially so when the ground in question is of poor geomechanical quality. On the other hand, defining the most appropriate tunnelling systems, methods of ground improvement and conservation techniques to ensure the stability and safety of the tunnel in the long and short term at the detailed construction design stage requires a perfect knowledge of the ground involved, not only from a geotechnical and geohydrological viewpoint, but also in terms of the response of each lithotype to different ground improvement treatments. In fact in order to avoid the risk of

unpleasant surprises when it is too late (such as discovering that ground improvement is not having the desired effect when tunnel advance is already underway), the effect of each type of treatment must be tested in advance by direct observation of the ground.

When the works to be undertaken are located at shallow depths, this can be done by means of so-called "test fields", where the ground in question can be investigated and monitored in detail, before, during and after treatments, and then excavated for direct observation of the effect produced. When, however, the works to be undertaken lie at a greater depth, the information that is normally obtained by means of traditional test fields, can be acquired by constructing test-shafts, a few metres in diameter, that are sunk to intercept the ground to be studied. Since these can be used to test directly the response of the ground to various types of treatment and to observe its behaviour when excavated, the type, entity and cost of the necessary ground improvement can be forecast accurately. This is important because it generally constitutes by far the greatest item of cost in the construction of underground works.

Experience acquired from the construction of the Cavour shaft for sections of the Rome metro showed that the small financial investment required for the construction of a test shaft, pays for itself amply in terms of the numerous advantages provided in terms of cost reductions and safety, above all in those areas which had never been tunnelled before, where the characteristics of the ground were not sufficiently well known and where no similar cases to refer to existed.