

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA .

**SVILUPPI NELL'ESECUZIONE  
E NELL'IMPIEGO  
DELLE INDAGINI GEOTECNICHE**

**XX CONVEGNO NAZIONALE  
DI GEOTECNICA**

Parma, 22-25 Settembre 1999

*Estratto*

PÀTRON EDITORE  
BOLOGNA

# L'IMPREVEDIBILITÀ DELL'INNALZAMENTO DELLA FALDA NELL'AMBITO DELLA PROGETTAZIONE DI UNA GALLERIA METROPOLITANA A MILANO

A. Balossi Restelli, E. Rovetto, A. Sesini  
Studio di Ingegneria Civile, Milano

## SOMMARIO

I lavori per la realizzazione del lotto 2PA2-7P1 del Passante Ferroviario di Milano sono iniziati nel 1985 con lo scavo, tramite piccola fresa, del cunicolo di preavanzamento e solo ora sono in fase di completamento. Infatti i finanziamenti a disposizione hanno consentito di eseguire lo scavo del cunicolo di preavanzamento tra il 1985 ed il 1987, mentre lo scavo della galleria è andato in appalto solo nel 1993.

Nel corso di questi anni la riduzione del consumo d'acqua per usi industriali ha invertito la precedente tendenza di abbassamento della falda tanto che dal 1985 al 1993 la falda si è innalzata di circa 3m.

In fase di appalto è stato di conseguenza necessario riprogettare tutti gli interventi di consolidamento ed impermeabilizzazione già previsti dal vecchio progetto.

Durante l'esecuzione dei consolidamenti si è dovuto adattare nuovamente il progetto all'effettivo incremento della falda, che è risultato essere decisamente superiore rispetto a quanto stimabile in fase di appalto. L'attento e frequente monitoraggio della falda nel corso dei lavori ha consentito l'ottimizzazione del progetto stesso permettendo di fare una previsione dell'incremento della falda per tutto il periodo interessato dagli scavi. A partire dal 1985 ad oggi la falda si è innalzata di circa 7m e solamente nel corso di quest'ultimo anno la velocità di crescita sembra essersi rallentata rispetto agli ultimi 8 anni. Tali escursioni hanno comportato problematiche di notevole peso a molti cantieri in esecuzione ed anche a manufatti profondi già esistenti.

## 1. PREMESSA

Il Passante Ferroviario di Milano, a causa di vari motivi, soprattutto dovuti ai finanziamenti differiti nel tempo, ha avuto una lunga storia che ora sta per concludersi, essendo stato appaltato l'ultimo lotto che lo collegherà anche a Sud con le FF.SS. (stazione di Porta Vittoria).

Si tratta di un'opera molto impegnativa che vanta interventi di ingegneria geotecnica di grande interesse, sia per il superamento di alcune situazioni assai delicate determinate dall'ampiezza dei cavi realizzati in adiacenza o addirittura sotto fabbricati importanti (vedi grattacielo di Piazza Repubblica, case di Viale Giustiniano e Viale dei Mille), sia per le nuove tecnologie adottate (le grandi stazioni di Repubblica e Venezia).

I tempi lunghi di realizzazione hanno originato situazioni assai difficili per la progettazione, tenuto conto soprattutto dei "capricci" della falda freatica di Milano.

In questa nota tentiamo di evidenziare come si siano dovuti apportare continui adattamenti al progetto degli interventi del sottosuolo e come questi abbiano avuto impatti sempre più importanti e sempre più delicati nei

confronti delle strutture degli edifici coinvolti.

In breve desideriamo sottolineare come l'interazione trattamenti del terreno/strutture di edifici possa essere facilmente governata se le situazioni al contorno dei cavi sono ben definite, mentre serie difficoltà possono nascere quando si debbano affrontare le conseguenze di mutamenti delle condizioni stesse.

Così, da una parte si è potuta realizzare, in un tempo limitato, la grande stazione Repubblica ai piedi del grattacielo all'angolo Piazza Repubblica/Viale Tunisia, senza generare movimenti di rilievo nella struttura del grande edificio (sollevamenti contenuti in qualche millimetro - Amagliani U. et Al., 1991), dall'altra parte la lunga storia del lotto 2PA2/7P1, oggetto di questa nota, evidenzia situazioni ben diverse superate con grande difficoltà e dispendio di risorse.

Si vuole qui porre l'accento sulle delicate "manovre" che qualche volta progettisti e realizzatori di opere devono affrontare quando i tempi lunghi mutano le condizioni iniziali.

## 2. DESCRIZIONE DEL FENOMENO E RIPERCUSSIONI PROGETTUALI

Le prime indagini eseguite in corrispondenza del lotto 2PA2 risalgono al 1980, anno in cui furono eseguiti i sondaggi in via Barbarigo e Piazzale Dateo.

Una successiva campagna di indagini fu eseguita nel corso del 1984, appena prima dell'inizio dei lavori relativi al lotto 2PA. In questo periodo fu installato il piezometro di via Ruzzante.

Al momento della prima progettazione esecutiva dei consolidamenti, che risale al 1986, la tratta di scavo 2PA1 tra le progressive 5782,377 e 5195,120 faceva ancora parte del lotto 2PA che si estendeva da piazzale Dateo a piazza VIII novembre. Solamente in una seconda fase fu deciso di eseguire il cunicolo di preavanzamento nel tratto del lotto 2PA2 e rimandare i consolidamenti e gli scavi della galleria ad un periodo successivo (vedere figura n°1).

Il progetto 1986 prevedeva come quota di falda di riferimento la 98,05 m s.l.m. Le sezioni di scavo risultavano a quel periodo tutte fuori falda ed i trattamenti di consolidamento prevedevano degli archi iniettati che dalla calotta si estendevano fino al di sotto dei piedritti. Non sarebbe stato necessario alcun intervento in corrispondenza dell'arco rovescio.

preavanzamento rimase aperto e sostenuto da centine provvisorie e panconcelli in legname.

In figura n°3 sono riportati i dati rilevati da un piezometro in zona Parco Lambro dove si può osservare che dal 1986 al 1992 l'oscillazione della falda era stata di neppure 1m, e comunque tale da non far prevedere la tendenza a risalire che ci sarebbe stata negli anni successivi.

Tuttavia un approfondimento intervenuto nella quota del piano ferro aveva portato già in fase di gara a dover prevedere un intervento di impermeabilizzazione al di sotto dell'arco rovescio.

Inoltre la falda era in quell'anno cresciuta fino a quota 99,60 m s.l.m. nella zona in questione.

Come in tutti i precedenti progetti relativi a gallerie metropolitane situate in falda, nel dimensionamento degli spessori del consolidamento si era tenuto conto di un possibile incremento di 1m della quota di falda, rispetto alla quota rilevata alla data della progettazione. Questo metro di "franco" rispetto al valore effettivo avrebbe dovuto tenere conto di una possibile, eventuale oscillazione del livello piezometrico, che avrebbe potuto manifestarsi nel corso della durata del cantiere.

Dal punto di vista dell'Ente appaltante sarebbe stato difficilmente giustificabile richiedere alle Imprese un progetto degli interventi di impermeabilizzazione che



Figura 1 - Planimetria dei lotti 2PA e 7P1. Ubicazione dei quattro piezometri e del caposaldo n°330.

La figura n°2 illustra lo schema dei consolidamenti con iniezioni di miscele consolidanti in corrispondenza delle due sezioni tipo in asse strada e al di sotto dei fabbricati.

Dal 1986 al 1992, anno della gara di appalto per la realizzazione del lotto 2PA2-7P1, il cunicolo di

prevedesse degli incrementi maggiori di 1 metro della piezometrica.

In figura n°4 sono illustrati gli interventi di consolidamento ed impermeabilizzazione con iniezioni in corrispondenza delle due sezioni tipo proposti nel progetto

di offerta sotto gli edifici e sotto la strada, omologhe a quelle illustrate in figura n°2.

La quota di falda di progetto era dunque la 100,60 m s.l.m., compreso il metro di franco.

Nel tempo intercorso tra la preparazione dei documenti per la gara da parte dell'Ente appaltante (fine 1992) e la consegna del cantiere, avvenuta nel febbraio 1994, la falda aveva subito un incremento di circa 1,5m ed in particolare era già stata superata la quota 100,60m s.l.m., quota a suo

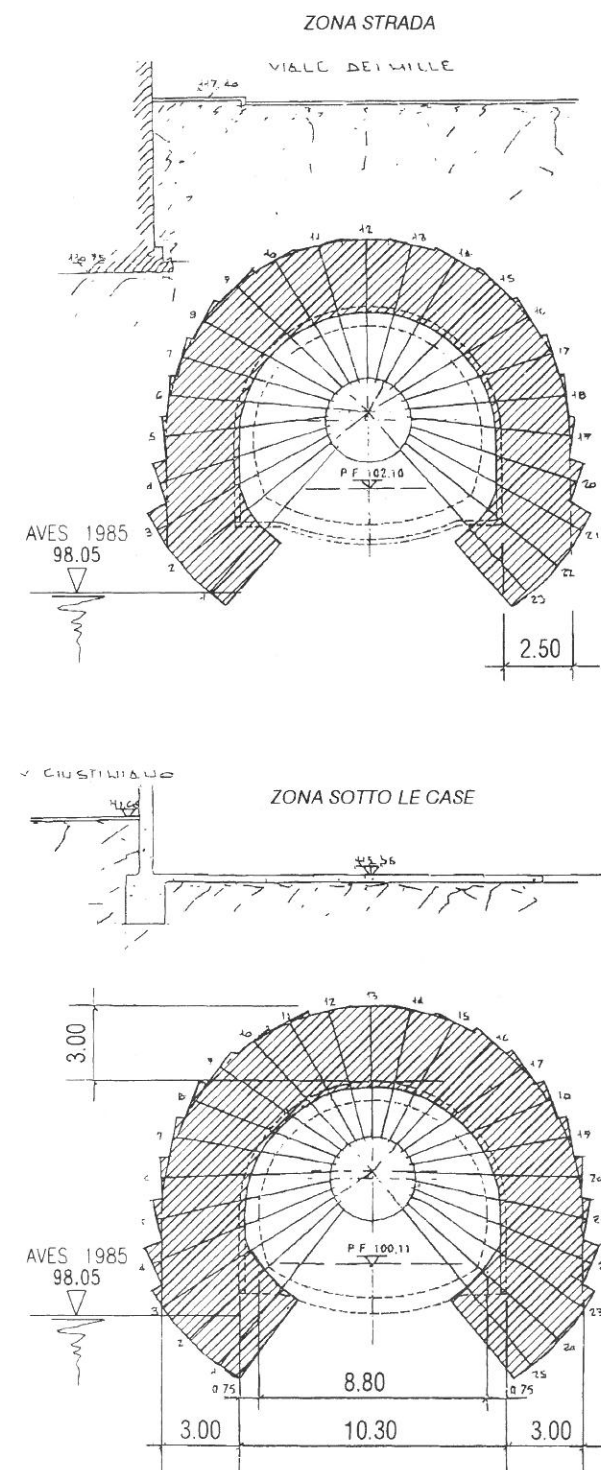


Figura 2 - Schema dei consolidamenti progettati nel 1986 per l'intero lotto 2PA.

tempo stimata come massima raggiungibile nel corso dei lavori. Il progetto doveva di conseguenza essere variato ed adattato ai nuovi parametri di progetto contingenti.

Tale progetto fu dunque rivisto semplicemente basandosi sul nuovo livello di falda misurato nei due punti estremi del lotto ed assumendo nuovamente 1m di franco per tenere conto di un eventuale ulteriore possibile incremento.

In figura n°5 sono illustrate le due sezioni tipo proposte nel primo progetto di variante che risale al 1994.

E' necessario sottolineare il fatto che in quel periodo il fenomeno della risalita della falda non si poneva ancora come problematica generalizzata a buona parte del territorio milanese e di conseguenza poche e sporadiche erano le informazioni a disposizione dei vari enti preposti o comunque interessati allo studio della stessa.

Si poteva ancora ritenere che il fenomeno potesse essere localizzato ad una certa area e comunque non se ne conoscevano con precisione le cause in termini quantificabili.

Gli studi relativi al fenomeno dell'innalzamento della falda sono stati pubblicati solo recentemente e coprono generalmente un periodo di osservazione che parte dal 1995, anno che segna evidentemente l'estendersi del fenomeno a tutto il territorio milanese.

Il primo studio pubblicato dalla Provincia di Milano risale all'ottobre 1996; sono state qui esaminate in maniera approfondita le cause dell'innalzamento della falda sul territorio milanese, riconducibili all'urbanizzazione intensa della zona a Nord della città ed alla dismissione delle attività industriali.

Per quanto concerne le misure effettuate nei quattro piezometri a suo tempo installati per il controllo del cantiere, queste venivano effettuate ogni 15 giorni e ad ogni lettura era possibile osservare una variazione di livello di qualche centimetro.

Inoltre in corrispondenza di un pozzo (Dateo) di accesso al cantiere in sotterraneo, la falda aveva superato la quota di scavo e conseguentemente era possibile osservare visivamente l'oscillazione della stessa.

Nel corso del primo anno di osservazione (febbraio 1994-febbraio 1995) la falda aveva subito un incremento massimo di 1m, mentre nel corso del secondo anno di osservazione (febbraio 1995-febbraio 1996) l'incremento massimo era stato leggermente inferiore e pari a 0,60 m.

La quota raggiunta nella zona più a Nord del lotto era la 102,40 m s.l.m.; quindi veniva superata la quota di progetto (102,00 m s.l.m.) fissata con la prima variante.

L'ulteriore variante, resasi a questo punto necessaria per assicurare l'impermeabilità degli scavi e la stabilità delle sovrastrutture doveva tenere conto dei seguenti aspetti:

- corretta valutazione del fenomeno in corso, effettuata tenendo conto di quanto osservato nei precedenti due anni e della fenomenologia che l'aveva provocata, che si stava lentamente chiarendo
- le problematiche connesse con il superamento da parte della falda, in alcune tratte, del piano di lavoro dal quale

effettuare gli interventi integrativi di impermeabilizzazione. In figura n°6 sono riportati i valori delle letture effettuate nei quattro piezometri al momento della definizione della seconda variante e la linea di tendenza prevista in data 1/3/96.

Si arrivava dunque a definire la 103,50 m s.l.m. quale più probabile quota massima raggiungibile in fase di scavo sulla base della quale studiare gli interventi di impermeabilizzazione integrativi. Tuttavia, tenuto conto delle oscillazioni stagionali e della media dei valori lungo tutta la tratta, abbiamo eseguito il calcolo di filtrazione e stabilità, considerando la quota 103,00 m s.l.m., come

tale da garantire un grado di impermeabilità da considerarsi praticamente totale, oltre a tre fori integrativi, come mostra la figura n°9.

In particolare, nella tratta assai delicata al di sotto dei fabbricati si è ritenuto opportuno eseguire il getto definitivo della calotta prima degli scavi di ribasso in falda realizzati a campioni successivi.

In figura n°10 è riportato l'andamento delle letture piezometriche, aggiornato al marzo 1999, dal quale si può osservare che la quota 103,50m s.l.m. è stata raggiunta in corrispondenza del solo piezometro in via Barbarigo. A partire dal febbraio 1998 si osserva inoltre una inversione di

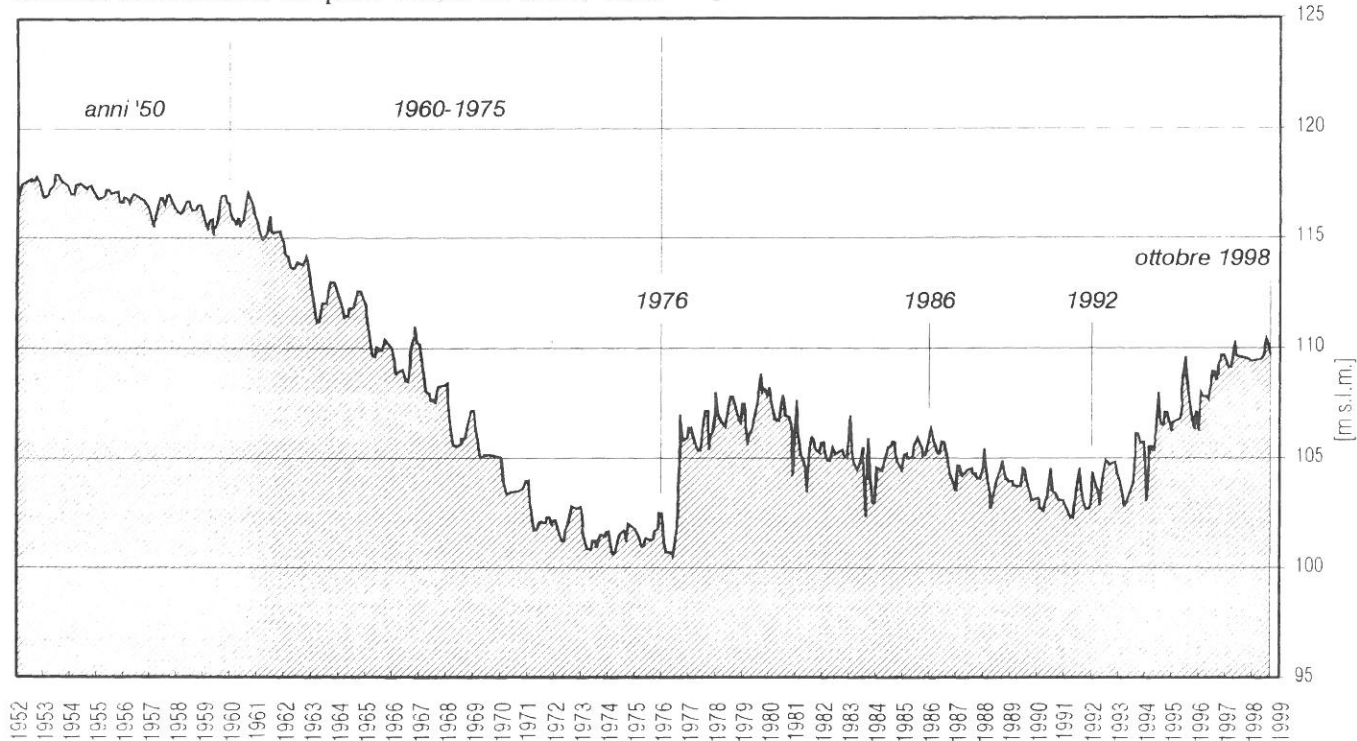


Figura 3 - Oscillazioni piezometriche della prima falda (1952-1998) in un piezometro sito in zona Parco Lambro nel Comune di Milano. (Per gentile concessione del Settore ecologia della Provincia di Milano).

segnato sulla figura n°7.

In figura n°7 è riportato l'intervento integrativo di consolidamento ed impermeabilizzazione, tramite nuove perforazioni ed incremento dello spessore trattato di 2m in arco rovescio e a lato dei piedritti.

Nel corso della realizzazione di questi interventi, e precisamente nel marzo 1997, la falda ha evidenziato una ulteriore impennata (1 metro tra febbraio 1996 e febbraio 1997).

Per questa ragione si è dovuto riconsiderare di nuovo l'equilibrio generale di tutti i cavi.

E' nata la terza variante, legata alle curve tendenziali esposte in figura n°8.

Sono state prese in esame due soluzioni.

La prima, molto costosa, che prevedeva un ulteriore incremento dello spessore di terreno trattato di 1,60 m. è stata scartata tenuto conto della prossimità dello scavo in falda e quindi del nuovo rischio del medio termine; la seconda, poi adottata, prevedeva solamente un incremento del quantitativo della miscela silicatica in falda, in modo

tendenza, dovuta probabilmente anche ad interventi di pompaggio forzato in falda, gestiti dalla Provincia di Milano, che al momento sembra abbiano permesso di stabilizzare la quota della falda stessa.

A seguito del completamento delle iniezioni integrative della terza variante, gli scavi di ribasso sono proseguiti con buona regolarità a partire dalla stazione Dateo verso Nord (fabbricati di Viale Giustiniano).

Oggi, primi di giugno 1999, possiamo dire che tutti gli scavi ed i rivestimenti definitivi stanno per essere conclusi.

L'impermeabilità totale è stata ottenuta lungo tutto il percorso in falda.

### 3. ASPETTI OPERATIVI CONSEGUENTI ALLE SUCCESSIVE VARIANTI PROGETTUALI

Lo scavo della calotta della galleria è stato completato e sostenuto ovunque da centine, rete e spritz-beton.

In alcune zone a prevalenza sabbiosa si è verificato

qualche fenomeno localizzato corticale di distacco sempre contenuto dallo spritz e da qualche iniezione di intasamento a tergo.

Bisogna dire che la falda aveva già raggiunto la quota delle reni dell'arco ed in qualche tratto la presenza dell'acqua rendeva abbastanza precario l'appoggio dei piedini delle centine.

Come si può vedere dalla figura n°7 a questo punto è stato necessario eseguire delle perforazioni ed iniezioni integrative in tutta la zona in falda che comprendeva la totalità dei piedritti e l'arco rovescio (seconda variante).

Inoltre in corrispondenza della sola tratta di scavo sotto le case, è stato eseguito un ulteriore intervento di colonne jet-grouting subverticali a partire dalla base delle centine ed un arco rovescio provvisorio in calcestruzzo da demolire poi al momento dello scavo di ribasso.

Il graduale e costante aumento della quota di falda rendeva infatti sempre più sollecitata la zona alla base delle centine di calotta.

Inoltre la terza variante (figura n°9) ha comportato degli interventi integrativi in un terreno già parzialmente interes-

sato dalle iniezioni di miscele cementizie e di conseguenza dei quantitativi complessivi di miscele iniettate superiori a quelli normalmente previsti per interventi di questo tipo (36% del volume di terreno trattato contro il consueto 28-30%).

D'altro canto, un aumento così considerevole del battente rendeva indispensabile l'utilizzo di quantitativi ragguardevoli di miscele in grado di conferire un alto grado di consolidamento e raggiungere anche il valore di impermeabilità richiesto per mantenere lo scavo all'asciutto. Un' ulteriore problematica emersa durante la realizzazione del lotto e non direttamente legata all'innalzamento della falda è stata quella dovuta al notevole lasso di tempo trascorso tra lo scavo del cunicolo di preavanzamento e la realizzazione dei consolidamenti per lo scavo della galleria.

La presenza del cunicolo ha infatti comportato una decompressione del terreno nella zona a questo circostante ed ha provocato delle anomalie (cedimenti antecedenti non rappresentati sui diagrammi e sollevamenti concentrati a seguito delle iniezioni iniziali di riempimento sopra la zona

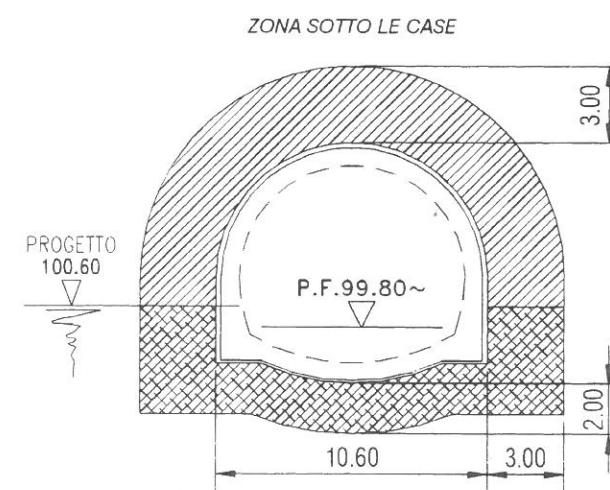
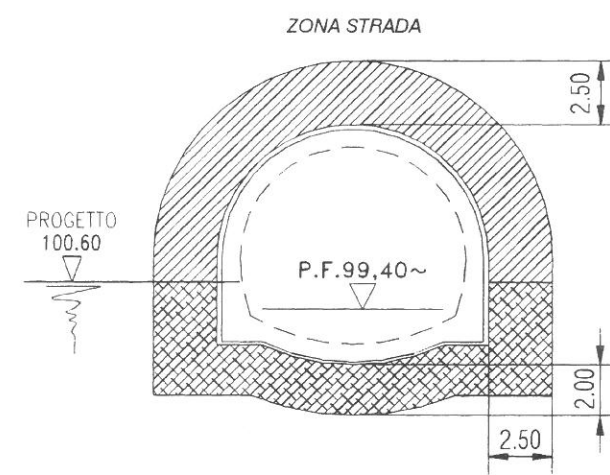


Figura 4 - Spessori proposti nel progetto d'offerta del 1993.

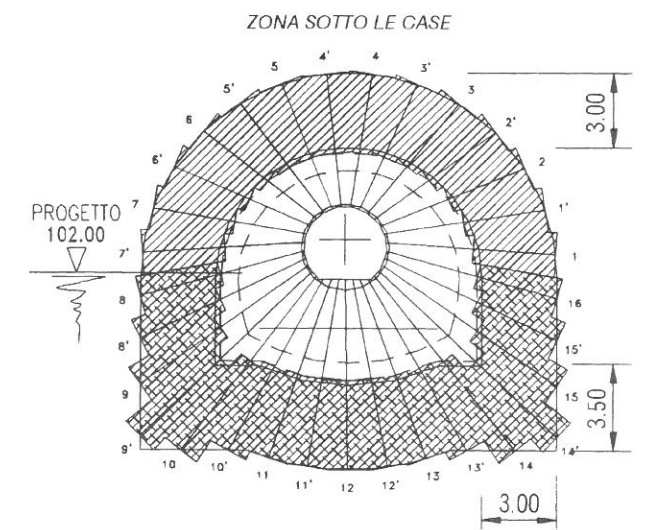
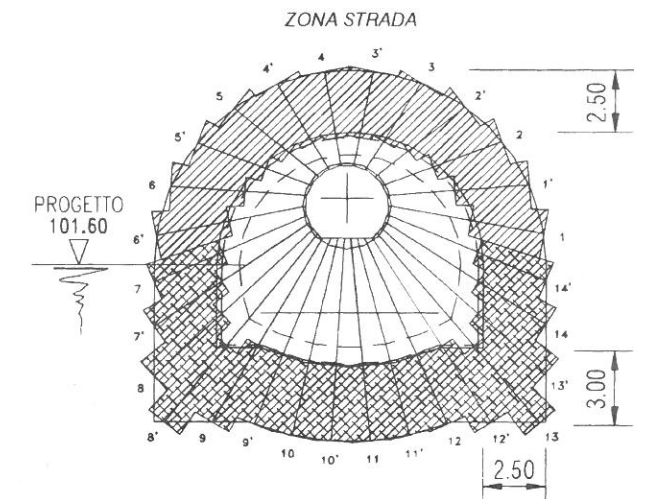


Figura 5 - Spessori proposti con la prima variante del 1994.

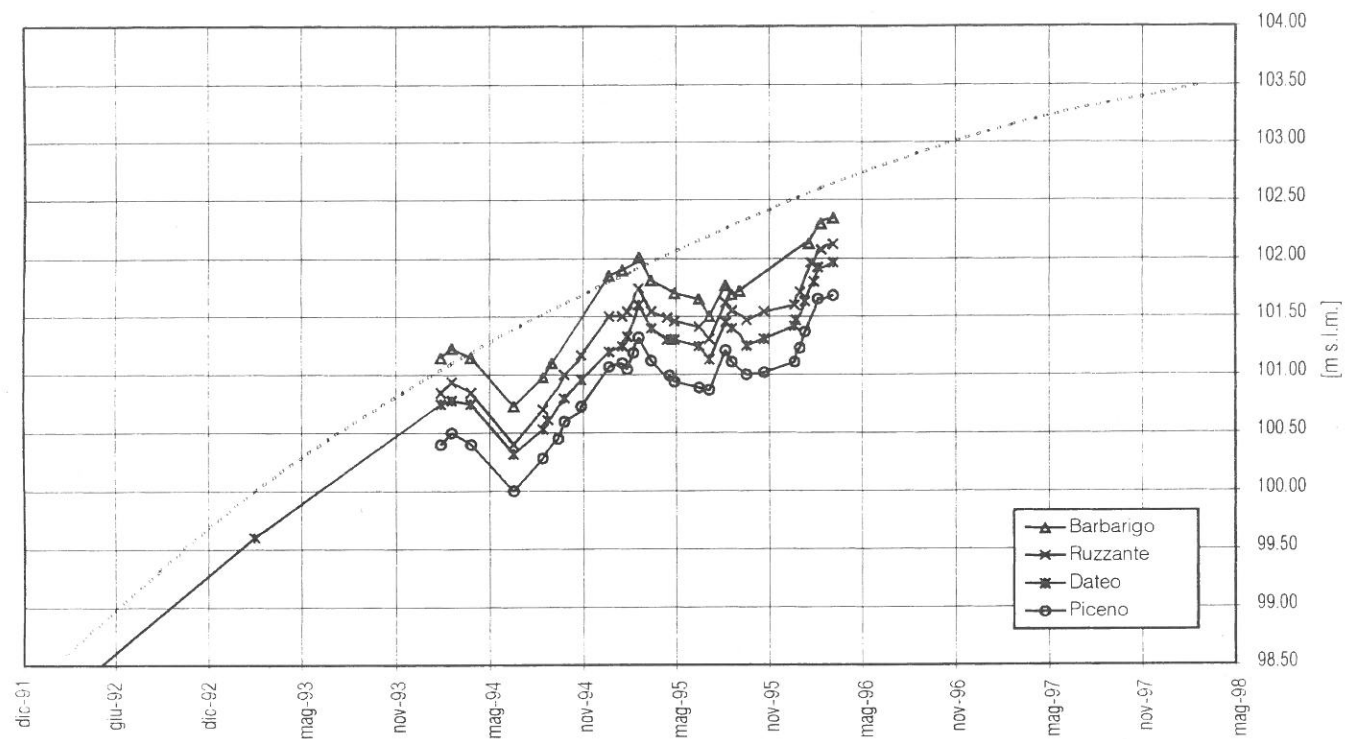


Figura 6 - Linea di tendenza prevista per l'incremento della falda in data 1/3/1996 (letture 3/92-3/96).

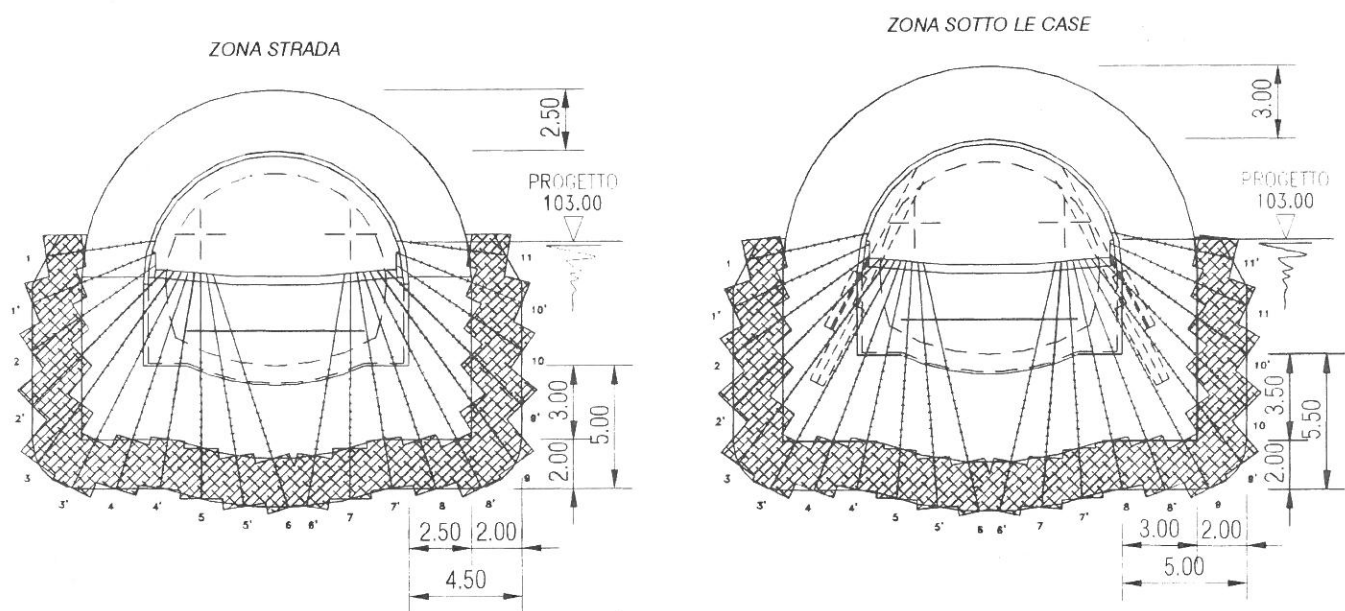


Figura 7 - Seconda variante del marzo '96.

calotta) che hanno non poco influenzato il regolare svolgimento dei trattamenti più superficiali.

In figura n° 11 è riportato il grafico dei movimenti rilevati in corrispondenza di un caposaldo topografico posto in Viale Giustiniano.

Sulla stessa figura sono anche riportate le diverse fasi delle lavorazioni di iniezione e scavo e l'andamento del livello della piezometrica.

Riteniamo che questi diagrammi siano molto interessanti perché mettono in correlazione le operazioni di cantiere con i livelli di falda.

Dopo il sollevamento di 14÷15 mm circa dovuto alle iniezioni da cunicolo, come detto influenzate dai vuoti sopra il cunicolo stesso, segue il cedimento immediato dello scavo di calotta.

La "coda" del cedimento (4÷5 mm) che si protrae per 18 mesi circa è dovuta principalmente all'incremento concomitante del carico idraulico, pari a 1.5 m circa.

Le iniezioni integrative in falda della seconda e terza variante hanno invertito questa tendenza ed infine lo scavo di ribasso ha comportato cedimenti trascurabili fino alla completa chiusura del rivestimento definitivo.

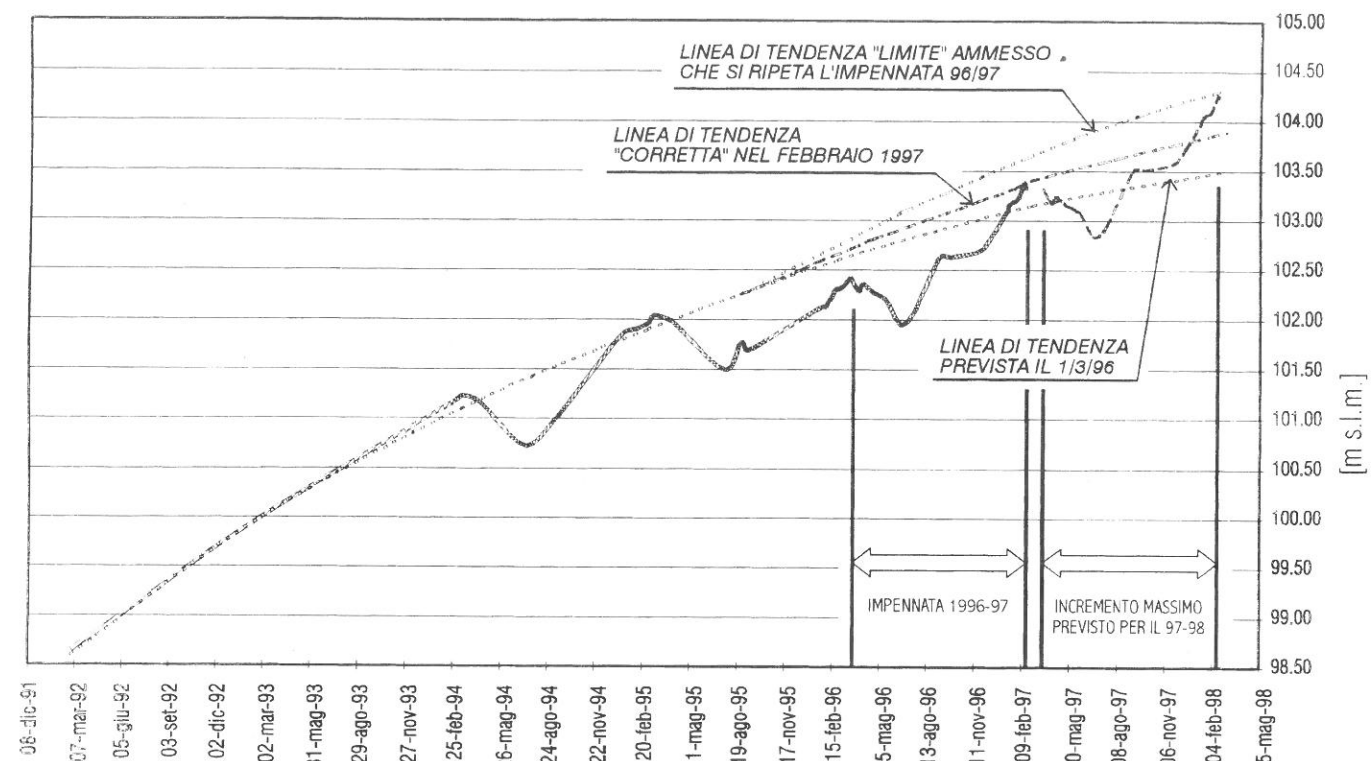


Figura 8 - Andamento previsionale della falda freatica considerando le letture effettuate nel periodo marzo 1992-febbraio 1997. Quote verificate fino al 14/2/97.

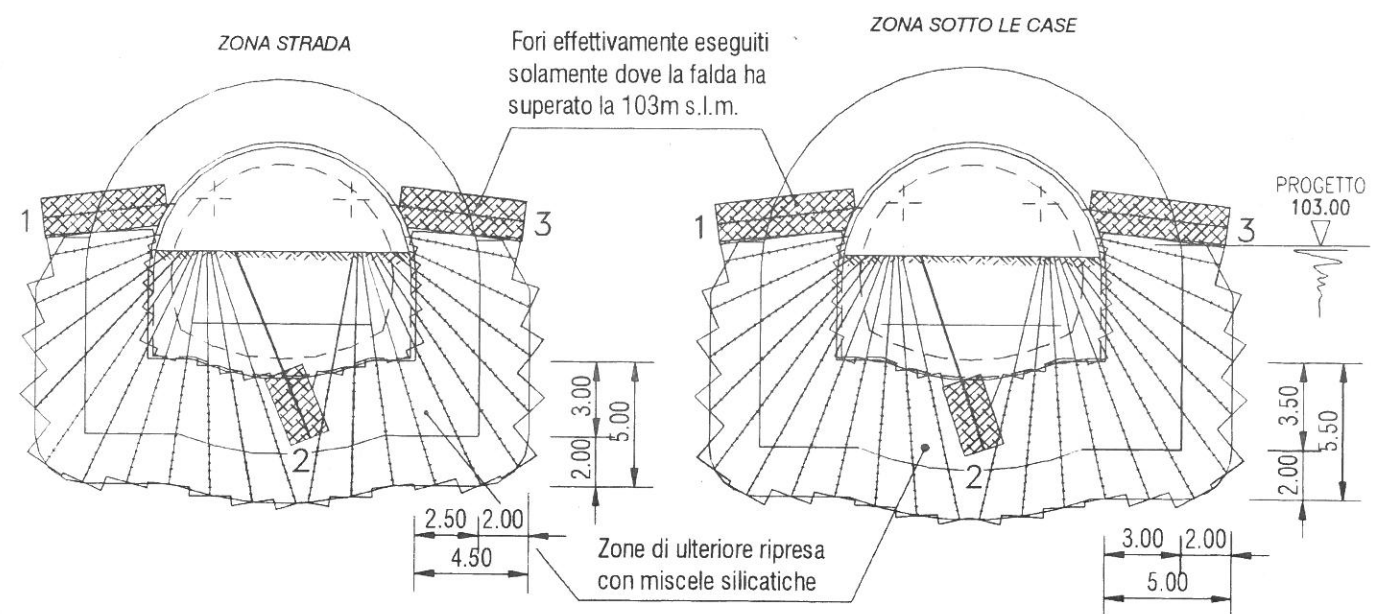


Figura 9 - Integrazioni legate alla terza variante del marzo 1997.

#### 4. CONCLUSIONI

Questa nota espone un esempio rappresentativo delle conseguenze sulla progettazione e realizzazione provocate dall'aumento della falda nell'area milanese.

In questo caso particolare alcune circostanze concomitanti hanno enfatizzato il problema: infatti la quota di falda ha raggiunto e superato le reni della calotta,

sollecitando quindi una zona assai delicata dello scavo di prima fase e la galleria è sempre risultata a contatto con le fondazioni di edifici importanti, addirittura sottopassandoli per un centinaio di metri tra Viale dei Mille e Viale Giustiniano.

Le numerose varianti che si sono dovute adottare evidenziano le delicate "manovre" che progettisti e realizzatori devono affrontare quando, nel corso stesso dei

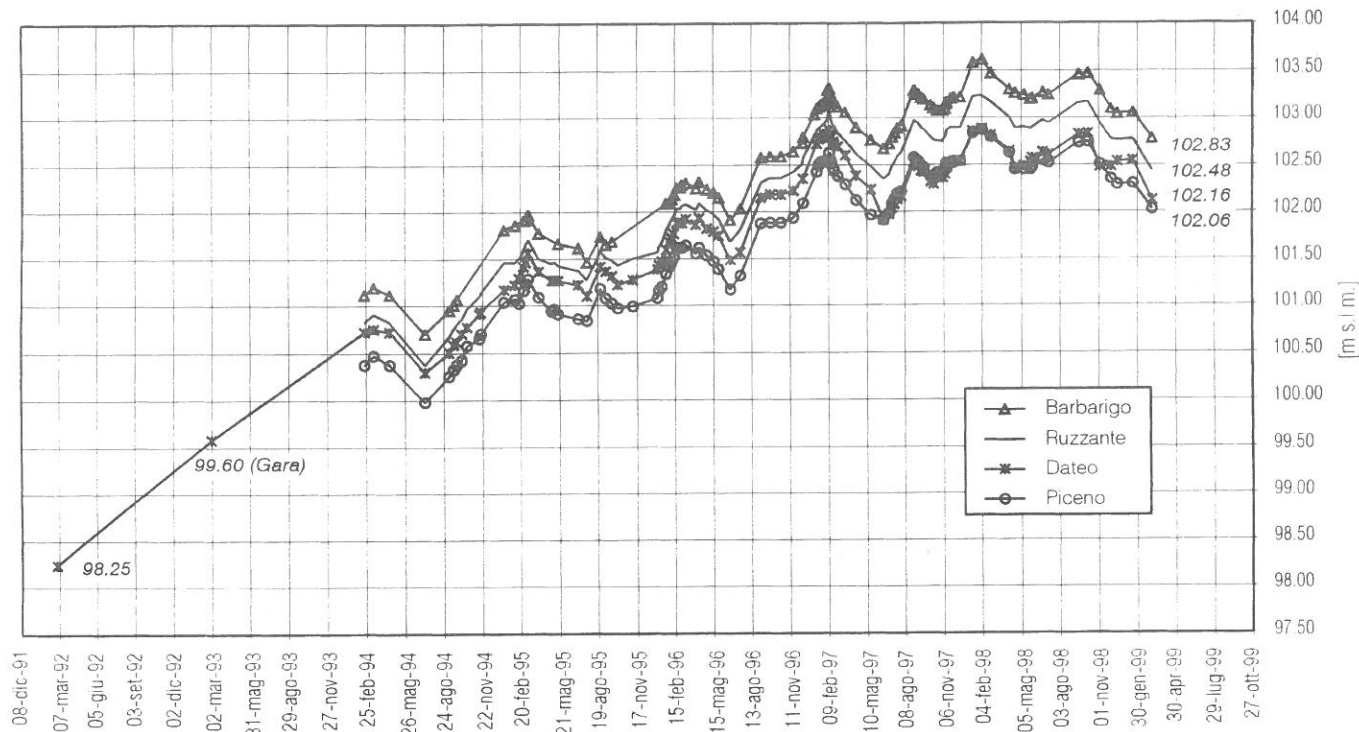


Figura 10 - Diagramma delle letture piezometriche effettuate nella zona del cantiere tra il 1992 e il marzo 1999.

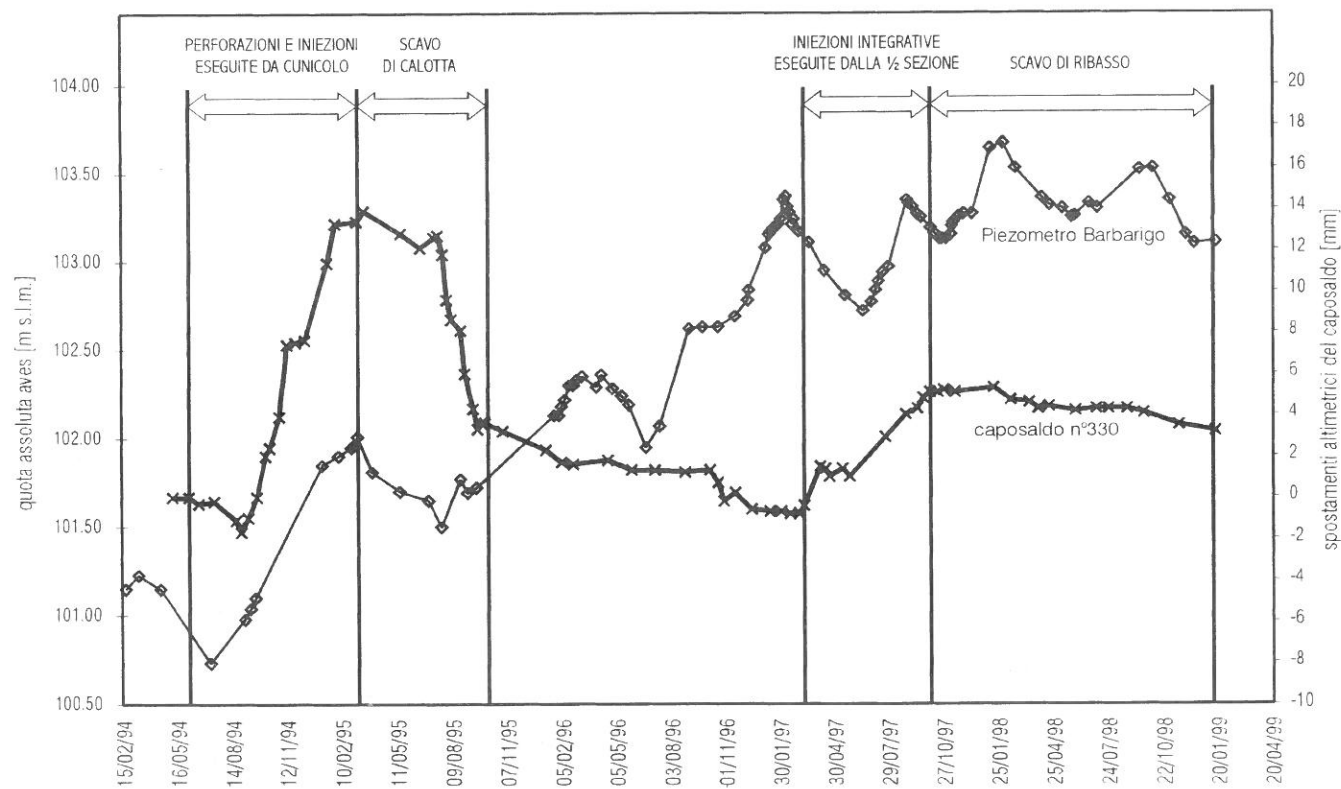


Figura 11 - Movimenti rilevati durante le fasi esecutive dei lavori in corrispondenza del caposaldo n°330 situato in viale Giustiniano. Crescita della falda freatica nella medesima zona (piezometro di via Barbarigo).

lavori, mutano le condizioni iniziali, senza che tali variazioni possano essere previste. Ampliando il discorso possiamo dire che problemi simili hanno interessato numerosi manufatti in fase di realizzazione nello stesso periodo nell'area milanese e che quindi si sono dovuti progettare interventi di impermeabilizzazione per

consentire il regolare svolgimento degli scavi e prevenire conseguenze dannose nei confronti dell'utilizzo degli spazi. Le osservazioni rigorose dell'evoluzione della piezometrica e dei movimenti delle sovrastrutture esistenti sono risultati elementi fondamentali per la più corretta progettazione degli interventi integrativi.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Metropolitana Milanese S.p.A. per averci consentito di pubblicare i dati relativi al cantiere in oggetto. Si ringrazia l'Associazione Temporanea di Imprese Piceno S.c.a.r.l. (Impregilo-Italstrade) per la gentile collaborazione nell'averci fornito i dati relativi alle diverse fasi di avanzamento del cantiere. Un ringraziamento particolare all'Impresa Rodio S.p.A., che ha eseguito i trattamenti di consolidamento ed impermeabilizzazione.

## BIBLIOGRAFIA

AMAGLIANI U., BALOSSI RESTELLI A. (1991) "Movimenti di un grattacielo interessato dallo scavo di una grossa stazione metropolitana nella città di Milano". Atti del congresso su il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo, Milano, Vol. 1, pp.291-309.

ARINI E., BALOSSI RESTELLI A., COLOMBO A., GERVASO F., MONGILARDI E. (1988) "Problems caused by the water table in Lot 2B of line 3 of the Milan subway", Int. Congr. On "Tunnels and water", Madrid.

BALOSSI RESTELLI A. (1969) "Trattamento preventivo, mediante iniezioni, di terreni incoerenti per consentire lo scavo di gallerie metropolitane sotto zone edificate, senza che intervengano cedimenti nelle fondazioni delle opere sovrastanti". 1° Conv. Int. Sui Problemi Tecnici nelle Costruzioni di Gallerie, Torino.

BALOSSI RESTELLI A. (1972) "Alcuni esempi di trattamenti di iniezione nel terreno di Milano per consentire la creazione di nuovi spazi sotterranei in adiacenza o sotto i fabbricati vecchi da conservare". Il Nuovo Cantiere, n. 12.

BALOSSI RESTELLI A. (1986) "Interventi speciali atti a garantire la stabilità del cavo in condizioni difficili". Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce MIR, Torino, Memoria n. 14.

BALOSSI RESTELLI A. (1995) "Il congelamento del terreno può risolvere situazioni difficili di scavo sotto battente di falda". Rivista Italiana di Geotecnica, n. 3 pp. 179-199.

BALOSSI RESTELLI A., CASTELLOTTI U., CECCOLINI E., GHELFI G., FINZI B. (1991) "Blindhole Tunnel for Underground Station in Milan: Finite Element Analysis and Comparison with in Situ measured Settlements". Proc. Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble, Paris, pp 295-306.

BALOSSI RESTELLI A., COLOMBO A., GERVASO F., LUNARDI P. (1986) "Tecnologie speciali per il sostegno di scavi nelle alluvioni di Milano, in occasione della costruzione della linea 3 della MM". Atti del Congresso Internazionale su Grandi Opere Sotterranee, Firenze, Vol. 1, pp. 612-618.

PROVINCIA DI MILANO - Assessorato all'Ambiente e POLITECNICO DI MILANO D.S.T.M. Geologia

Applicata (1995) "Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano". Vol. I Lineamenti idrogeologici.

PROVINCIA DI MILANO - Assessorato all'Ambiente - Settore Ecologia, U.O. Tecnica Progetti Speciali (1998) "Contributo operativo della Provincia di Milano per il monitoraggio ed il controllo del fenomeno dell'innalzamento della falda freatica nell'area milanese"

PROVINCIA DI MILANO - Assessorato al Ciclo delle Acque, U.O. Tecnica Progetti Speciali (1999) "Progetto pilota per il drenaggio rilevante di acqua di falda da un bacino di cava".

## SUMMARY

The works for the construction of Lot 2PA2-7P1 of the new Underground Railway Link in Milan started in 1985 by the excavation of the drift carried out with a small cutter and only now are nearly finished.

As a matter of fact, the financing funds allowed the excavation of the drift between 1985 and 1987, while the excavation of the tunnel was given out by contract only in 1993.

In the last few years the reduction in industrial water consumption by factories caused a rise of the water table level of about 3 meters between the years 1985-1993.

For that reason we were compelled, during the tender period, to revise the design of consolidation and impermeabilization works.

During the works, again it was necessary to adapt the project to the actual rise of the water table level, which resulted to be higher than estimated during the tender phase.

The accurate and frequent monitoring of the water table level during the works allowed the design to be suitably adjusted because we were able to have a clear control of the water table rise all along the whole stage of the excavation.

From 1985 up to now the water table has risen of about 7 meters and only in the course of the last year the rising speed has slowed down compared to the last 8 years.

Such fluctuations have caused considerable problems in several sites and also in the case of deep foundations of existing buildings.