

DUE DIFFERENTI METODOLOGIE DI AVANZAMENTO NELL'AMBITO DI UN LOTTO DELLA LINEA 3 DELLA METROPOLITANA MILANESE

Balossi Restelli A*., D'Alò G.**., Pettinaroli A.*

* Studio di Ingegneria Civile, Milano

** Direttore Tecnico Impresa Astaldi

SOMMARIO

La galleria relativa al prolungamento Nord Zara-Maciachini della Linea 3 della Metropolitana di Milano per un buon tratto corre sotto i fabbricati e prosegue poi in fregio agli edifici di Via Menabrea e Via Imbonati.

Sono state adottate due differenti metodologie di consolidamento e sostegno del cavo. La prima, utilizzata sotto i fabbricati e nei tratti in falda, è consistita in trattamenti mediante iniezioni tradizionali eseguite da un cunicolo di preavanzamento. La seconda, utilizzata nelle tratte centrali del tracciato non interessate dalla falda e dalla presenza di edifici in superficie, ha comportato il consolidamento della calotta mediante la realizzazione di una doppia coronella di colonne jet grouting eseguite dal fronte di scavo della mezza sezione, previa esecuzione di un apposito campo prova in galleria. Sono seguiti il trattamento per l'arco rovescio e i piedritti mediante iniezioni, e lo scavo di ribasso.

Il controllo dei movimenti indotti in superficie, con livellazioni topografiche di precisione di punti posti sui fabbricati e in strada, ha fornito risultati interessanti anche per una valutazione comparata dei due sistemi di scavo utilizzati.

1 LA NUOVA TRATTA ZARA - MACIACHINI

La linea 3 della Metropolitana di Milano è in estensione a nord, lungo l'allineamento di via Imbonati, verso i quartieri di Affori e della Comasina.

Il nuovo tratto appena realizzato che collega la stazione Zara alla stazione Maciachini è suddivisibile in due tronchi; il primo è in curva, e raccorda le direttrici di viale Stelvio e via Imbonati sottopassando alcuni edifici abitativi; il secondo rettilineo corre sotto le vie Menabrea ed Imbonati, in fregio a fabbricati e comprende la stazione (figura 1).

La galleria è stata scavata a foro cieco. Gli accessi sono stati ricavati in corrispondenza della stazione Maciachini, realizzata a cielo aperto, e dei tre pozzi Menabrea, Pasolini e San Genesio, questi ultimi due dotati di elevatori per permettere l'accesso ai mezzi più pesanti..

Prima di raggiungere la stazione da inizio lotto il tracciato altimetrico risale di circa 3 metri con una pendenza dello 0,75%, mentre oltre la stazione verso Nord prosegue quasi in orizzontale (0,1%).

La galleria ha un'altezza complessiva di 8,65 m. Lo

scavo, in chiave calotta, si trova circa 11-12 m al di sotto del piano campagna.

La sezione di scavo corrente ha una larghezza di 10,80 m; nei due tratti di ingresso alla stazione aumenta fino a 11,20. In corrispondenza dell'ingresso sud, per circa 40m, la galleria si biforca in due fornici (gallerie siamesi).

Lungo il tracciato sono presenti alcune nicchie e manufatti speciali, anch'essi scavati a foro cieco.

2. LE INDAGINI PRELIMINARI E IL COMPORTAMENTO DELLA FALDA

In fase di progettazione esecutiva sono stati eseguiti 3 sondaggi di 30 m di profondità ad integrazione di quelli già realizzati.

Su alcuni campioni rimaneggiati sono state condotte in laboratorio prove granulometriche ed areometrie, dove necessario..

Nei sondaggi sono stati installati piezometri per il controllo della falda.

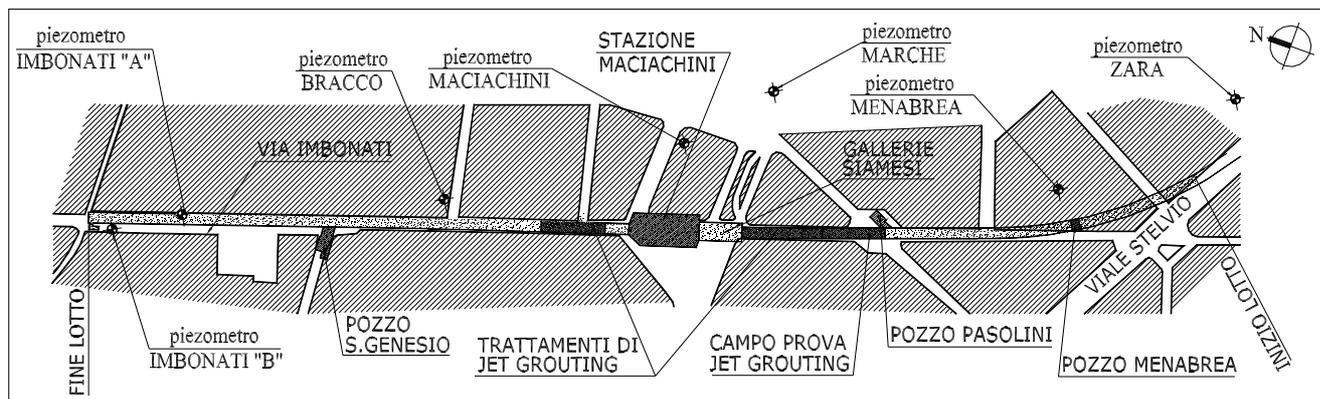


Figura 1. Planimetria generale

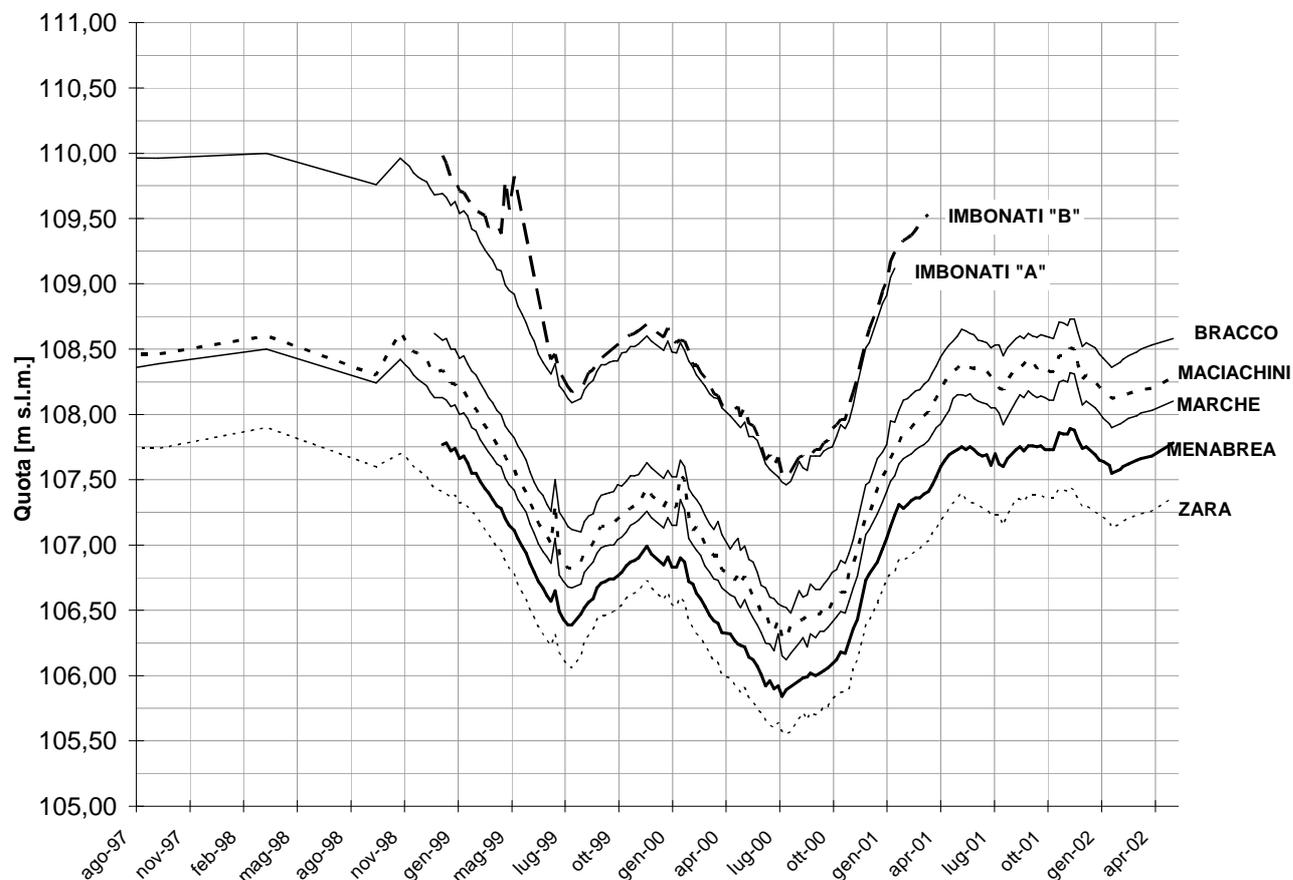


Figura 2. Livello della falda durante i lavori

I sondaggi hanno confermato la tipica composizione del terreno di Milano: alternanze di ghiaie e sabbie, con passaggi più marcatamente sabbiosi, e con presenza di ciottoli centimetrici. La frazione fine è sempre piuttosto scarsa, in generale di pochi punti percentuali in quasi tutti i campioni. I sondaggi non hanno evidenziato quelle inclusioni lenticolari limoso-argillose presenti talvolta nel sottosuolo di Milano, e che in passato hanno creato non pochi problemi in fase di scavo (Arini et al., 1988).

Alla profondità della galleria la percentuale sabbiosa è

sempre apparsa consistente, spesso prevalente (maggiore dell'80%).

Il controllo della falda è avvenuto mediante 7 piezometri, 4 dei quali già realizzati dalla stazione appaltante. In figura 2 è diagrammato il livello dell'acquifero dall'agosto 1997 ad oggi.

Il dislivello della falda tra inizio lotto (piezometri zona Menabrea) e fine lotto (piezometri Imbonati A e B) è di circa 2m, con una pendenza media circa dello 0,2%.

Dal grafico è possibile individuare l'oscillazione stagio-

nale tipica della falda milanese, con massimi alla fine dell'inverno e minimi a fine estate. Tuttavia nel periodo osservato si distinguono con evidenza due fasi di variabilità:

- una prima fase caratterizzata da un abbassamento del livello di circa 2-2,20 m, tra agosto 1998 e agosto 2000, coincidente con un paio di annate di scarse precipitazioni;
- una seconda fase a partire dall'autunno del 2000 e ancora in evoluzione, caratterizzata da un rialzo deciso, cominciato con la stagione 2000-2001 molto piovosa.

La quota di falda misurata nel piezometro Menabrea è variata all'incirca da un minimo di 105,80 m s.l.m. a un massimo di 107,80 m s.l.m.; lo scavo del tratto sotto le case è avvenuto sotto un battente in arco rovescio di circa 1,50 m; la falda era qui in fase di risalita senza tuttavia avere raggiunto il livello del 1997.

Dal pozzo Pasolini in avanti verso Nord il livello freatico si è mantenuto al di sotto del fondo scavo, ad eccezione degli ultimi metri a fine lotto, peraltro con un battente davvero modesto.

L'abbassamento del livello dell'acquifero durante la fase di progettazione ha spinto ad una revisione verso il basso della quota di progetto dell'aves e ad una riduzione parziale dei trattamenti in arco rovescio.

In pratica si è verificata una situazione analoga, ma di segno opposto, a quanto avvenuto nel decennio scorso durante la costruzione del Passante Ferroviario di Milano (A. Balossi Restelli et al., 1999).

Facciamo tuttavia notare che dal maggio 2001 fino ad oggi la falda è rimasta pressochè costante, senza fare registrare l'abituale abbassamento dei mesi estivi.

3. GLI INTERVENTI SPECIALISTICI DI PROTEZIONE DEGLI SCAVI

Gli interventi di consolidamento e impermeabilizzazione del terreno da scavare sono stati realizzati secondo le due metodologie seguenti:

- trattamenti radiali di iniezione in calotta e arco rovescio (figura 3a) realizzati in un'unica fase da un cunicolo di preavanzamento precedentemente realizzato. Lo scavo del cunicolo è stato protetto da 7 colonne di jet grouting suborizzontali eseguite in avanzamento dal fronte del cunicolo stesso

- trattamento conico in calotta realizzato mediante doppia coronella di colonne di jet grouting monofluido eseguite in avanzamento dal fronte di scavo; consolidamento del fronte con colonne orizzontali; scavo della mezza sezione; raggere di iniezione per il trattamento dei piedritti e dell'arco rovescio eseguito dalla mezza sezione (figura 3 b).

Il primo metodo è quello tradizionalmente seguito e ben sperimentato in passato in molti altri lotti della Metropolitana e del Passante di Milano; mentre il sistema con coronelle coniche di jet è stato sperimentato in passato a Milano per gallerie di diametro decisamente inferiore.

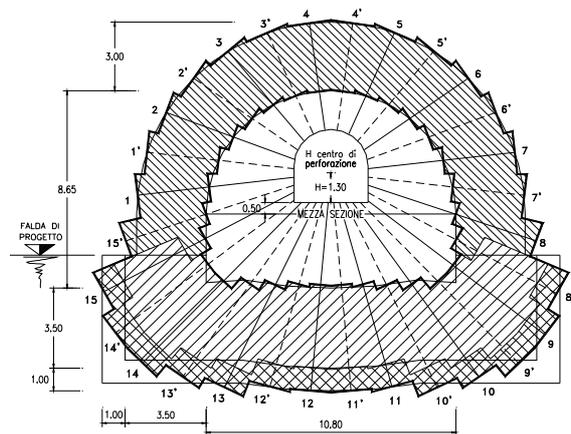


Figura 3a. Trattamenti radiali da cunicolo con iniezioni di miscela cementizie e silicatiche

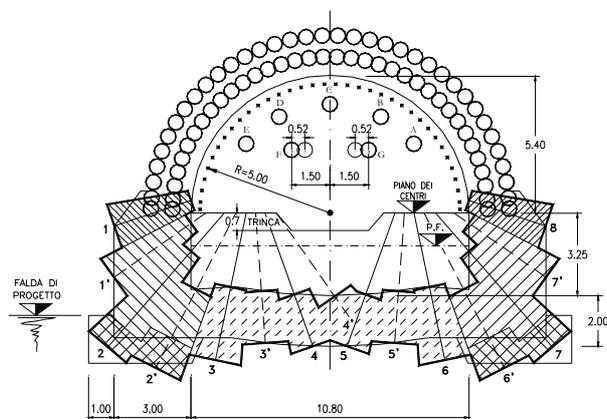


Figura 3b. Consolidamento della calotta con colonne jet grouting, dell'arco rovescio con iniezioni

4. IL MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA

Il monitoraggio ha comportato un attento e costante controllo dei movimenti dei fabbricati e del livello della falda.

Il controllo degli edifici è stato attuato tramite livellazioni topografiche di precisione. I punti di lettura, circa 500, sono stati disposti lungo tutto il percorso di scavo, sui marciapiedi alla base degli edifici e sui punti più significativi (pilastri, murature portanti) delle strutture interessate dallo scavo, in particolare nel tratto in cui la galleria passa sotto le case. Altri punti sono stati posizionati lungo l'asse delle strade che corrono sopra al tracciato.

È stato così possibile seguire l'evoluzione dei movimenti di tutti i punti a partire dall'inizio delle attività, fino al termine dei getti dei rivestimenti definitivi in c.a. e correlare sollevamenti e cedimenti in funzione delle successive attività svolte.

I diagrammi temporali rispecchiano fedelmente il susseguirsi delle operazioni (trattamenti e scavi). In corso d'opera questo tipo di controllo, aggiornato con le dovute frequenze in funzione della posizione delle operazioni in

corso in galleria, ha permesso di verificare il comportamento degli edifici, comunque sempre soggetti a movimenti durante questo tipo di lavori, e soprattutto di intervenire sollecitamente in caso di situazioni anomale.

La gestione delle iniezioni ed anche dei jet ha potuto essere condotta correttamente in tempo reale, nel senso di limitare al massimo l'entità dei movimenti delle sovrastrutture.

Per quanto riguarda la falda si rimanda al precedente paragrafo 2.

5. IL CONSOLIDAMENTO DELLA CALOTTA CON JET GROUTING

5.1 Lo schema tipo di intervento

Come già accennato questo sistema prevede l'esecuzione in avanzamento con una arcata composta da due file di colonne jet grouting monofluido $\varnothing 60$ cm realizzate a partire dal fronte mezza sezione.

La geometria è studiata in modo che in ogni punto della calotta lo scavo sia protetto da una doppia coronella di jet, pari ad uno spessore di terreno trattato come minimo di 1,20 m.

Ciascuna arcata di 37 colonne forma una "rigata" conica suborizzontale e viene eseguita a partire dal fronte di ogni tratta da scavare di 6 m di lunghezza. Le colonne di questa arcata si inseriscono al di sotto di quelle già esegui-

te a partire dal fronte della tratta precedente e con esse raggiungono in ogni punto lo spessore di terreno trattato di progetto (come detto minimo 1,20 m).

Per ottenere questo, con la sagoma di galleria in questione, la lunghezza delle perforazioni è di 15,50 m ed il getto di ciascuna colonna di 13,00 m. Così lo scavo di ciascuna tratta è protetto dalla corona appena realizzata, sormentata da quella parallela realizzata dal fronte della tratta precedente.

Il sostegno del fronte è assicurato da sette colonne orizzontali eseguite nel cuore della sezione (fig. 3b e 4).

Procedendo in questo modo non è più necessario realizzare il cunicolo di preavanzamento.

L'avanzamento del fronte di scavo procede per campi successivi di circa 6 m di lunghezza, alternando la fase di consolidamento a quella di scavo, limitato però alla mezza sezione.

Il sistema risulta ottimizzato quando vengono attivati due fronti di lavoro contemporanei, dove si alternano le due fasi.

Una volta a regime il sistema porta ad una riduzione dei tempi ed in qualche misura anche dei costi dello scavo.

La modalità operativa descritta è stata adottata in due segmenti di galleria posti non al di sotto degli edifici e non interessati dalla falda, dopo aver eseguito un campo prova preliminare nei pressi del pozzo Pasolini.

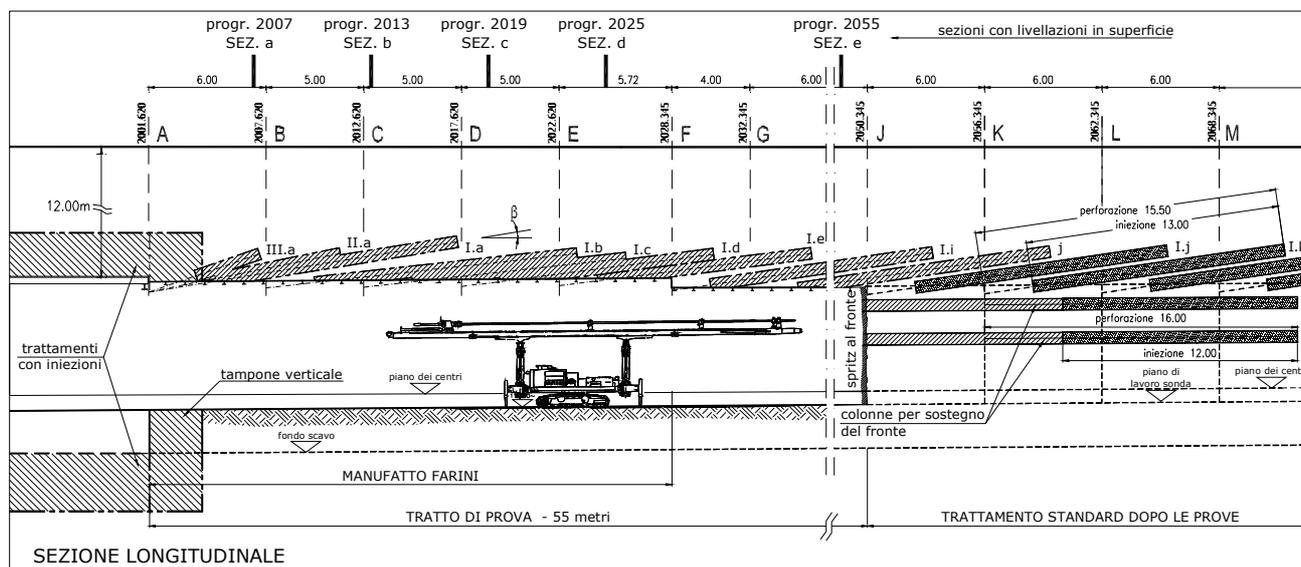


Figura 4. Consolidamento in avanzamento con colonne di jet grouting monofluido eseguite dal fronte di scavo

5.2. Il campo prova

Il tratto di prova (vedere figura 4) è stato eseguito in corrispondenza del manufatto speciale Farini, di larghezza 11,00 m (campi A÷E); la prova è poi proseguita lungo la

galleria standard con sezione da 10,80 m (F-J). La sperimentazione ha quindi interessato una decina di campi per un totale di circa 55 metri.

Il consolidamento conico è stato ottenuto realizzando 37 colonne jet $\varnothing 60$ cm per ogni avanzamento.

Il sostegno del fronte è stato assicurato con l'esecuzione di 7 colonne orizzontali dello stesso diametro, ciascuna da 12 m di lunghezza (più 4m di perforazione a vuoto).

Per lo scavo del primo campo A è stato necessario eseguire due corone di colonne integrative con maggior inclinazione verso l'esterno ($\beta=12^\circ$ e $\beta=19^\circ$ - figura 4), per assicurare lo spessore minimo di trattamento di 1,20 m.

La tabella 1 riporta le caratteristiche geometriche delle colonne e delle tratte di scavo, fatte variare volutamente nell'ambito del campo prova.

Tabella 1. Caratteristiche geometriche delle successive tratte del campo prova

	L perf. [m]	L colonna [m]	Angolazione jet	Scavo [m]
A	16,00	13,50	9°	6,00
B	16,00	13,50	6°	5,00
C	13,50	11,00	6°	5,00
D	13,00	11,00	7°	5,00
E(*)	13,00	11,00	7°	5,80
F(*)	13,50	11,50	8°	4,00
G-J	15,50	13,00	8°	6,00

(*) Campi in corrispondenza del cambio di sezione.

Il monitoraggio livellometrico di superficie è stato realizzato mediante 5 sezioni topografiche costituite ognuna da 5 caposaldi posti in strada rispettivamente in asse galleria, 2 in corrispondenza dei piedritti e 2 più esterni.

Sono state inoltre installate, ad integrazione delle letture topografiche, 4 sezioni di convergenza in galleria.

I parametri operativi del jet grouting per la prova sono stati fatti variare nell'ambito sotto riportato:

- pressione: 35÷40 MPa
- volume specifico di miscela: 0,30 m³/m di colonna
- portata di iniezione: 90-120 lt/sec
- velocità di risalita: 18÷24 m/h
- velocità di rotazione 12÷15 giri/min

Come fluido di iniezione è stata utilizzata una miscela cementizia con cemento Portland 32,5 e rapporto acqua/cemento=1.

Sono stati effettuati controlli in cantiere e prove di laboratorio su campioni di miscela fresca e indurita, di materiale rifluito in fase di esecuzione delle colonne, su campioni provenienti da sondaggi eseguiti carotando il trattamento, sia in direzione radiale, che lungo l'asse di una colonna di brandaggio del fronte.

In particolare si è verificato quanto sotto descritto:

- in alcune tratte iniziali è stata riscontrata la presenza, piuttosto anomala nel terreno milanese, di ciottoli di dimensioni fino a 20 cm, che ha richiesto modifiche ed affi-

namenti nelle modalità di perforazione e di "jettiniezione" durante la risalita dell'utensile, per evitare effetti di ombra;

- l'ordine temporale di esecuzione delle colonne è risultato strettamente connesso con i movimenti in superficie; si è notato che procedendo dalla chiave verso i piedritti i sollevamenti risultavano più contenuti;

- alcune configurazioni di lunghezza e di inclinazione dell'asse delle colonne (angolo β , figura 4) hanno provocato sollevamenti anomali.

In particolare è apparsa importante l'inclinazione (β) data alle colonne. Nei primi campi, dove β era $\leq 7^\circ$, le colonne di due corone successive risultavano graficamente tangenti o leggermente compenstrate; si veniva a creare allora una interferenza tra quelle in esecuzione e quelle del campo precedente ormai mature; il guscio rigido delle colonne precedenti, sollecitato dall'esecuzione delle nuove colonne, è stato oggetto di sollevamento che si è ripercosso fino in superficie. Per questo motivo nei campi successivi l'angolazione delle colonne è stata incrementata fino a 8° . Tutto questo è evidenziato nelle figure sotto commentate.

La figura 5a riporta i movimenti dei punti topografici relativi alla sezione strumentata a progr. 2025 (vedere anche la figura 4). L'innalzamento, misurato sopra la chiave calotta e sulle reni (CAP n. 1-2-3, vedere fig. 5d) varia da 12 a 20 mm.

Per angoli β superiori la presenza di uno strato di terreno non trattato tra le due corone di jet smorza l'effetto di spinta, riducendo i sollevamenti per oltre il 50%, come mostrato nelle figure 5 b) e 5c).

In galleria le sezioni di convergenza hanno evidenziato, nelle prime settimane successive allo scavo, una leggera tendenza all'allargamento del cavo, di entità inferiore ai 4 mm in corrispondenza della corda di base.

Come detto sono stati eseguiti due sondaggi radiali di controllo sul trattamento di calotta ed uno longitudinale in una colonna di sostegno del fronte.

Le carote ottenute hanno confermato la presenza di ciottoli di dimensioni variabili da pochi centimetri fino ad oltre 10 cm, in matrice sabbiosa.

Sui campioni prelevati sono state eseguite in laboratorio prove di rottura ad espansione laterale libera con determinazione del modulo elastico e del peso di volume. I valori ottenuti sono piuttosto dispersi, influenzati sia dal differente grado di maturazione raggiunto dai campioni, sia dalla inclusione negli stessi di ciottoli centimetrici.

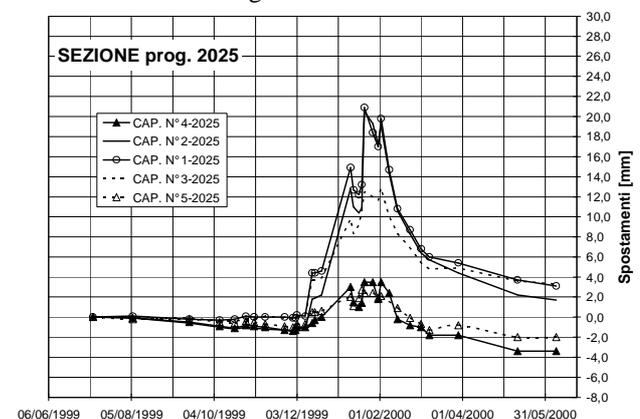


Figura 5a. Campo prova - Livellazioni sezione a prog. 2025

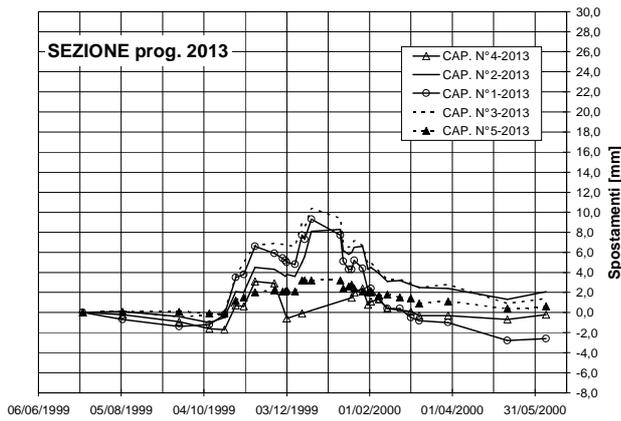


Figura 5b. Campo prova - Livellazioni sezione a prog. 2013

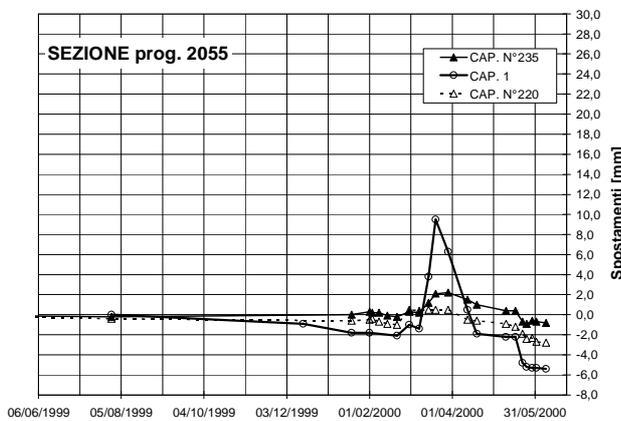


Figura 5c. Campo prova - Livellazioni sezione a prog. 2055

Nel trattamento di calotta ed ovviamente sulle carote migliori (maturazione 30 giorni circa) sono stati ottenuti i seguenti valori:

peso di volume:	2,10 t/m ³
resistenza a rottura a compressione:	7,93 N/mm ²
modulo elastico secante:	4.500 N/mm ²

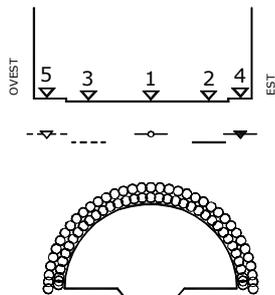


Figura 5d. Campo prova - Sezione tipo - Ubicazione dei punti in superficie per le livellazioni

I controlli in corso d'opera sulla miscela di jet hanno fornito i seguenti valori medi:

peso di volume:	1,50 g/cm ³
decantazione a 1 ora:	12,5%
finale:	23,0%
Viscosità Marsh:	31"

La resistenza a compressione su alcuni campioni maturati a 3 giorni è stata mediamente pari a 11 MPa.

I dati relativi al refluo sono stati i seguenti:	
peso di volume medio:	1,50 g/cm ³
decantazione finale:	< 3,0%
Viscosità Marsh:	1'31"

La portata media del refluo misurata è stata di 3,67 m³/h, cioè mediamente attorno al 50% del volume di miscela iniettato. Questo valore è congruente con l'elaborazione dei dati riguardanti la composizione della miscela, del refluo e del terreno trattato (Tornaghi, 1993).

5.3. Gli avanzamenti standard con il jet grouting

A seguito dell'esperienza positiva maturata nel campo prova, la metodologia del jet grouting ha potuto essere ottimizzata ed è stata adottata in due porzioni della galleria (vedere planimetria fig. 1).

Le caratteristiche dell'intervento standard sono state così fissate:

Trattamento di calotta:

Lunghezza di perforazione:	15,50 m/colonna
Lunghezza colonne jettiniettate:	13,00 m/colonna
Angolazione β verso l'esterno:	8°
Lunghezza delle tratte di scavo:	6,00 m
Numero di colonne Ø60 cm	
galleria da 10,80 m:	36 colonne/tratta
galleria da 11,20 m:	37 colonne/tratta

Colonne Ø60 per il brandaggio del fronte

	7 colonne/ogni 2 tratte
Lunghezza perforazione:	16,00 m
Lunghezza colonne jettiniettate:	12,00 m

Parametri operativi del jet grouting

Pressione:	≥ 35 MPa
Volume specifico di miscela:	0,30 m ³ /m di colonna
Portata di iniezione:	100 lt/min
Velocità di risalita:	20 m/h
Velocità di rotazione:	12÷15 giri/min
Miscela cementizia realizzata con cemento Portland 32,5 e con rapporto acqua/cemento=1.	

I tratti iniziali delle due porzioni sono stati eseguiti a partire dal tampone verticale di terreno trattato in precedenza con iniezioni e hanno richiesto, come già detto, corone integrative di colonne più inclinate per garantire il consolidamento in calotta appena oltre i tamponi stessi (fig. 4, colonne II.a e III.a).

Anche in corrispondenza degli allarghi di sezione (cambio di larghezza, nicchie laterali, manufatti speciali) sono state realizzate alcune colonne integrative con angolazioni superiori a 8°.

Per una disamina degli effetti indotti in superficie da questa metodologia di trattamento e scavo facciamo notare che quello che più interessa è certamente il comportamento deformativo dei manufatti (soprattutto edifici) che sovrastano la calotta in fase di esecuzione. Per questo motivo prendiamo in attenta considerazione l'andamento nel tempo dei movimenti del punto 223 (vedere figura 6), posto in corrispondenza di un edificio in fregio alla galleria, a circa 8,70 m dall'asse della stessa, a metà circa del campo M.

Sono stati indicati gli intervalli corrispondenti alle principali lavorazioni che hanno interessato la galleria al di sotto di questo caposaldo:

A) l'effetto di sollevamento provocato dal jetgrouting comincia a mostrarsi quando il fronte si trova a 2,5 diametri di distanza (27 metri) dal caposaldo; il valore massimo è raggiunto dopo il trattamento del campo L, immediatamente precedente (4,5 mm);

B) nel corso dello scavo della mezza sezione relativo al campo L e a quelli successivi si sviluppa un abbassamento limitato (circa 3 mm in poco più di un mese). Quando il fronte si trova oltre una distanza di circa 1,5-2 volte il

diametro di galleria dal punto in questione, l'abbassamento prosegue con una "coda" piuttosto regolare (circa 1,5 mm in 4 mesi); un gradino di cedimento leggermente più accentuato si verifica al momento dello scavo di una nicchia laterale posta a circa 25 m dal punto 223.

La "coda" di abbassamento deriva probabilmente dal fatto che il punto di appoggio delle centine, cioè dove si ha la maggiore concentrazione degli sforzi, è poco consolidato; al di sotto di esso si sviluppano nel tempo i cedimenti continuativi;

C) le perforazioni per la posa dei tubi a "manchettes" per le iniezioni dei piedritti interessano la base dell'arco di jet vicino all'imposta (vedere fig. 3b); questo provoca ulteriori cedimenti in superficie;

D) in questa fase avvengono le iniezioni di consolidamento di piedritti ed arco rovescio; il masso di terreno su cui appoggia l'arco di jet viene trattato con iniezioni cementizie e silicatiche in modo intensivo, per conferire al terreno stesso un modulo elastico pari a 3 volte quello del terreno naturale. In questa fase si osserva un sostanziale arresto dei cedimenti, che complessivamente ammontano, per lo scavo di mezza sezione, a circa 5-5,5 mm.

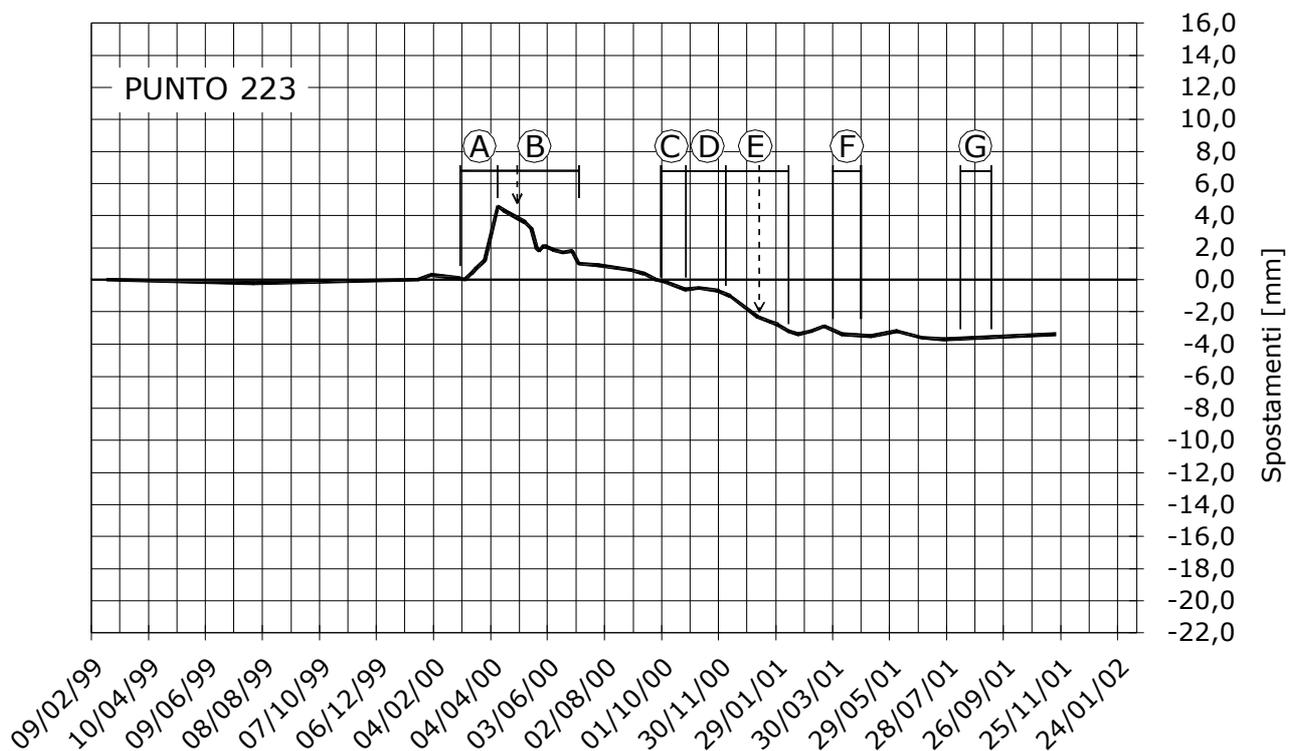


Figura 6. Movimenti del punto 223 posto su un fabbricato (Trattamenti jet - Zona Menabrea)

E) si completa lo scavo di ribasso lungo tutto il tratto interessato dal consolidamento col jet, seguito subito dal getto del magrone. In questa fase si sviluppa un ulteriore abbassamento del caposaldo di circa 3,5 mm seguito da una rapida stabilizzazione;

F) Getto dell'arco rovescio: la situazione è ormai stabilizzata;

G) Getto della calotta: situazione sempre stabile.

Le livellazioni di precisione hanno permesso di seguire con accuratezza la "storia" di ogni caposaldo, come nel caso appena mostrato.

Dall'analisi delle livellazioni topografiche relative a questo sistema di scavo si osserva che:

- i sollevamenti in generale, dopo la fase di prova, sono stati contenuti, raggiungendo in asse galleria i 10 mm (punti situati in strada) e sugli edifici in fregio massima punta di 4,5 mm;

- i cedimenti indotti sugli edifici, sempre ad almeno 7 m dall'asse galleria, durante lo scavo di mezza sezione sono condizionati dalla rapidità con cui le iniezioni sotto l'impulso dell'arco di jet seguono lo scavo stesso; infatti si verifica, come mostrato, una "coda" di abbassamenti nel tempo. In generale in questo cantiere non si sono superati i 6 mm di cedimento in questa fase di scavo

- lo scavo di ribasso ha comportato cedimenti sensibili, compresi tra 5 e 8 mm. E' interessante tuttavia evidenziare come al termine di questi scavi la situazione si sia stabilizzata nel giro di poche settimane, prima del getto della platea di fondo. Questo fatto è da ascrivere probabilmente alla rigidità dell'arco consolidato sopra la calotta, che una volta scontati gli effetti legati agli scavi si assesta più rapidamente di quanto non avvenga per il consolidamento con iniezioni.

6. CALCOLI DI VERIFICA E LORO RISPONDEZZA CON IL COMPORTAMENTO EFFETTIVO RICONTRATO

Per completezza dobbiamo dire che nel corso della progettazione sono state anche eseguite delle verifiche di stabilità del cavo con sistema ad elementi finiti.

Sono state introdotte le varie fasi lavorative di trattamenti e scavi in successione, nel loro ordine cronologico di esecuzione. In corrispondenza di ogni fase è stato evidenziato il quadro deformativo di tutto l'intorno del cavo.

La sezione studiata è stata localizzata in un punto dove la galleria sottopassa il piano stradale e non interferisce con i fabbricati. I carichi considerati sono dunque omogenei ed equivalenti al peso del terreno e addizionato dei sovraccarichi stradali.

I parametri geotecnici del terreno vergine sono identici a quelli utilizzati normalmente per calcoli simili a Milano. E' stato considerato uno spessore di terreno trattato con jet pari ad 1,20 m ed un modulo della porzione jettiniettata pari a 5.000 MPa.

Da campioni estratti dopo la prova sono stati evidenziati un peso del terreno trattato un poco inferiore ($2,1 \text{ t/m}^3$) a quello preso in considerazione nei calcoli ($2,2 \text{ t/m}^3$) ed un modulo di 4.500 MPa, anch'esso inferiore al valore di 5.000 MPa sopra riferito.

Come situazione deformativa di superficie dopo lo scavo di calotta, e cioè nella zona del cavo protetta dalle arcate di jet, si è verificato

- in asse galleria, un cedimento reale di 10 mm, contro un valore calcolato di 8,43 mm;

- ad una distanza di 7,20 m dall'asse, un cedimento reale di 6,0 mm contro un valore calcolato di 6,40 mm.

Questi valori dunque sono abbastanza congruenti fra loro.

7. I CONSOLIDAMENTI ESEGUITI CON INIEZIONI

Il resto della galleria, come già detto, è stato trattato con iniezioni di miscela cementizia e silicatica eseguite in passate successive, generalmente tramite tubi a valvole a raggera a partire dal cunicolo di preavanzamento.

I quantitativi di miscele necessari sono risultati nella loro globalità (calotta, piedritti ed arco rovescio) un poco inferiori a quelli utilizzati in passato, per effetto della presenza di una falda meno incombente.

Le situazioni più delicate si sono verificate nelle zone in cui era presente una certa componente sabbiosa in calotta. In questo caso i quantitativi di miscela da immettere nel terreno per ogni passata, in particolare quelli di miscela silicatica, sono stati regolati, verificandone gli effetti sugli edifici vicini mediante le letture topografiche frequenti.

In figura 7 si riporta, come esempio, il diagramma dei movimenti del punto 27, posto sul pilastro di un edificio sottopassato dalla galleria.

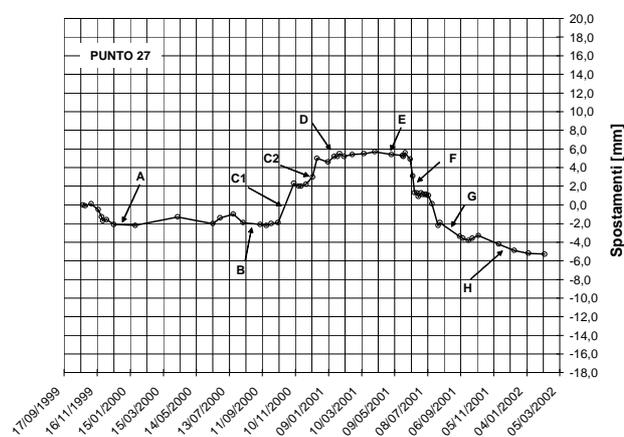


Figura 7. Movimento del punto 27 posto su un fabbricato (Trattamenti con iniezioni sotto ai fabbricati)

La realizzazione del cunicolo di preavanzamento (A) e le successive perforazioni (B), per porre in opera i tubi valvolati per le iniezioni, hanno provocato un abbassamento iniziale di circa 2mm.

Successivamente si sono verificati sollevamenti indotti in più riprese dalle passate di iniezioni (C1 e C2). Una ulteriore passata conclusiva in arco rovescio, eseguita limitando il numero di iniettori in funzione contemporaneamente e distanziando i punti di iniezione, non ha provocato movimenti apprezzabili (D). Successivamente sono state eseguite iniezioni di chiusura in arco rovescio, limitando al massimo il numero di iniettori e distanziando i punti di iniezione. I sollevamenti sono risultati trascurabili.

In figura 7 sono anche evidenziati gli scavi della mezza sezione (F) e dell'arco rovescio (G), cui è seguito immediatamente il getto della platea. Si osserva come permanga poi un cedimento residuo (poco più di 3 mm) che si esaurisce lentamente, arrestandosi totalmente a circa 6 mesi di distanza dal termine degli scavi e oltre 3 mesi dalla fine dei getti.

La figura 8 è invece relativa al punto 354, situato in una

posizione in cui la galleria corre in fregio ai fabbricati, similmente a dove è stato fatto il jet. Il caposaldo si trova su un edificio a circa 8 m dall'asse galleria. I sollevamenti ed i cedimenti sono ovviamente di entità inferiore rispetto al caso precedente. Anche qui si osserva però una deriva degli abbassamenti, di circa 2 mm, che tende ad esaurirsi a 6-7 mesi di distanza dal termine degli scavi.

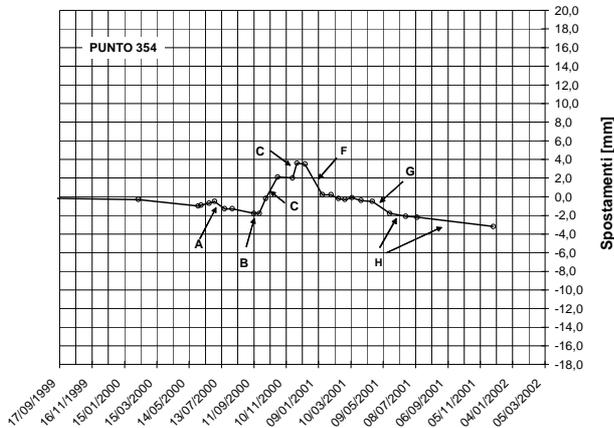


Figura 8. Movimenti del punto 354 su un fabbricato (Trattamenti con iniezioni in fregio ai fabbricati)

Il comportamento deformativo è simile al caso del jet: più in dettaglio sembra che le iniezioni provochino un sollevamento leggermente superiore (6 mm, anziché i 4,5 mm del jet) e un cedimento durante gli scavi un poco inferiore (7 mm, anziché i 9 del jet).

8. CONCLUSIONI

Lo scavo della nuova tratta Zara-Maciachini della metropolitana di Milano è stato affrontato con due diverse metodologie di trattamento.

Nei tratti in falda e in quelli sotto i fabbricati sono stati eseguiti trattamenti mediante iniezioni cementizie e silicatiche secondo modalità ben collaudate in passato in questo specifico ambito.

Per una certa parte del percorso è stato eseguito in alternativa un trattamento conico di consolidamento di calotta, composto da una doppia arcata di colonne di jet monofluido eseguite in avanzamento; completato poi da iniezioni di consolidamento sui piedritti ed arco rovescio.

Questo sistema misto jet grouting ed iniezioni, nel terreno di Milano, ha evidenziato alcuni aspetti significativi:

- non è necessaria la realizzazione del cunicolo di preavanzamento;
- durante la jettinazione i sollevamenti in superficie sono abbastanza contenuti;
- con lavorazioni ben organizzate ed attive contemporaneamente su due fronti, il sistema può comportare vantaggi in termini di tempo.

Per quanto osservato, si possono evidenziare alcuni a-

spetti che richiedono maggiori approfondimenti ed ottimizzazioni nel caso si volesse passare con questo sistema direttamente sotto i fabbricati (non in fregio ad essi, come nel caso qui sperimentato):

- difficoltà a realizzare un adeguato appoggio di terreno consolidato per le centine alle reni di calotta; in assenza di questo nel corso del trattamento dei piedritti tendono a verificarsi cedimenti non trascurabili continuativi nel tempo;
- il sistema dimostra di essere sensibile ai cambi di geometria di trattamento;
- inoltre non appare applicabile nei casi in cui il livello di falda sia sopra al piano della mezza sezione.

Pertanto si può concludere che lo scavo di calotta protetto da arcate di jet grouting, di spessore minimo di 1,20 m, è adatto al momento per i tratti di galleria sottopassanti le strade ed in fregio agli edifici, in condizioni di falda normali.

Le iniezioni tradizionali assicurano maggiormente la realizzazione di cavi da eseguirsi direttamente sotto fabbricati o manufatti di grande importanza (che non sopporterebbero cedimenti di grossa entità).

Le livellazioni di precisione, oltre ad aver assicurato durante i lavori il monitoraggio dei movimenti in superficie, hanno permesso a posteriori di ricostruire in modo dettagliato le fasi lavorative, evidenziando le differenze tra le due modalità esecutive.

Dobbiamo infine sottolineare la necessità inderogabile di sapere eseguire il jet in modo molto accurato, utilizzando mezzi e tecnologie adeguate ed adottando tutti gli accorgimenti per superare situazioni anomale: tutto ciò può essere garantito solo da una Impresa altamente specializzata in questo particolare campo di trattamento.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Metropolitana Milanese S.p.A. per averci consentito di pubblicare i dati relativi al cantiere in oggetto.

Si ringrazia inoltre l'Impresa Astaldi per la gentile e fattiva collaborazione in generale e per averci fornito tutti i dati relativi alle fasi di avanzamento dei lavori e alle livellazioni topografiche.

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. Cong.r. On Tunnels and Water, Madrid.
- 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 terrain meuble, Paris, pp.295-306.
- Balossi Restelli A., Rovetto E., Sesini A., 1999, L'imprevedibilità dell'innalzamento della falda nell'ambito della progettazione di una galleria metropolitana a Milano, Atti del XX Convegno Nazionale di Geotecnica, Parma, pp.317-325.
- Balossi Restelli A., 1995, Il miglioramento ed il rinforzo dei terreni e delle rocce. Controlli sulla validità degli interventi, Atti del XIX Convegno Nazionale di Geotecnica, Pavia, Vol. II, pp.447-470.
- Balossi Restelli A., Colombo A., Gervaso F., Lunardi P., Tecnologie speciali per il sostegno di scavi nelle alluvioni di Milano in occasione della costruzione della linea 3 della Metropolitana Milanese, Atti del Cong. Int. Grandi Opere Sotterranee - vol I, Firenze, pp. 612-618.
- Tornaghi R., 1989, Trattamento colonnare dei terreni mediante gettiniezione (jet grouting). Atti del XVII Convegno Nazionale di Geotecnica, Taormina, pp.193-203.
- Tornaghi R., 1993, Controlli e bilanci analitici dei trattamenti colonnari mediante jet grouting, Rivista Italiana di Geotecnica, pp.217-234.
- Lunardi P., Mongilardi E., Tornaghi R., 1986, Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo, Atti del Cong. Int. Grandi Opere Sotterranee - vol II, Firenze, pp. 601-612.
- Mongilardi E., Tornaghi R., 1986, Construction of large underground openings and use of grouts, Int. Conf. on Deep Foundations, Beijing.

ABSTRACT

The tunnel of the Zara-Maciachini Northern extension of line 3 of Milan Underground runs for a good part right under the buildings, then continues under the streets Menabrea and Imbonati close to the foundations of the buildings of the above mentioned streets.

Two different methods of consolidation and support of the excavation have been adopted.

The first one, carried out right under the buildings and in presence of water table, consists of conventional grouting executed from a previously excavated small drift.

The second one, new as far as Milan area is concerned, was used in the central part of the tunnel, where there were no water table and imposing buildings.

Here the consolidation of the crown has been executed by means of a double arch of monofluid jet grouting columns performed from the upper part half section heading of the tunnel.

Investigation tests of this method have been previously carried out in the tunnel itself. These field tests allowed to

control and set up the details of the method.

The wallsides and the invert arch were subsequently treated with conventional grouting, followed by the excavation of the bottom part.

The movements caused by the treatments on the surface soil and on the buildings situated above the tunnel were monitored by means of precise topographic leveling of datum points, placed on the structures and right in the streets.

The results of such monitoring proved very interesting for the comparison of the two methods of consolidation adopted.

Namely the new system associating jet grouting for the crown and conventional grouting for the wallsides and the invert arch proved to be suitable for excavation, both under the streets and in proximity of building foundations, with a small water table head.

In any case treatments of this kind with jet grouting supporting columns must be carried out very accurately by skilled and highly specialized firms.