



Proseguono i lavori sulla Linea 1  
sulla tratta Centro Direzionale Nord-Dante

## LA METROPOLITANA DI NAPOLI

Pietro Lunardi\*  
Giovanna Cassani\*\*  
Claudio De Giudici\*\*

Ferrovie & Metropolitane



Il progetto della Linea 1 della metropolitana di Napoli nasce alla fine degli anni Settanta quando si è valutata la possibilità di collegare la zona collinare periferica con il centro della città. Nel 1997 la Linea 1 entra a far parte di una rete integrata di trasporto su ferro che andrà a collegare, con un percorso ad anello, l'aeroporto e i quartieri periferici di nuova urbanizzazione, il centro città e la zona del porto con la stazione ferroviaria principale.

### L'opera

Attualmente è in esercizio la tratta tra la zona di urbanizzazione in espansione a Nord della città e Piazza Dante in pieno centro storico.

La tratta bassa (Dante-Centro Direzionale Nord) è al momento in fase di realizzazione e andrà a collegare la collina del Vomero e il centro antico della città, caratterizzato dall'impianto Greco-Romano di Neapolis e della cinta muraria del V secolo a.C., a Piazza Municipio passando per Via Toledo, e lambendo la cinta muraria del Maschio Angioino, alla sta-

Lunghezza di scavo (per ciascuna canna)	3.770 m
Diametro di scavo	6,75 m
Diametro esterno dei conci	6,45 m
Diametro interno dei conci	5,85 m
Spessore dei conci	0,30 m
Raggio minimo di curvatura	180 m
Raggio di progetto	150 m
Lunghezza dell'anello	1,20 m
Numero di conci per anello	sei + chiave

Tabella 1 - L'opera in sintesi: le caratteristiche principali delle gallerie di linea con scavo meccanizzato (due canne parallele tratta CDN-Pozzo Piazza VII Settembre)

zione Centrale attraverso Corso Umberto e, quindi, all'aeroporto di Capodichino (Figure 1 e 2) una volta completato il progetto.

Lo schema ferroviario prevede due gallerie di linea affiancate di 5,85 m di diametro interno, a circa 11 m di interasse e cinque stazioni (Toledo, Municipio, Università, Duomo e Garibaldi).

Lunghezza di scavo complessiva	900 m
Diametro di scavo	11 m
Spessore di rivestimento	0,80 m

Tabella 2 - Caratteristiche principali delle gallerie di banchina con scavo tradizionale (quattro gallerie per ogni stazione)

Lunghezza di scavo complessiva	200 m
Diametro di scavo	6,8 m
Spessore di rivestimento	0,80 m

Tabella 3 - Caratteristiche principali delle gallerie di linea con scavo in tradizionale (due canne parallele da Piazza VII Settembre a Piazza Dante)

Lunghezza di scavo complessiva	600 m
Diametro di scavo	6,8 m
Spessore di rivestimento	0,60 m

Tabella 4 - Caratteristiche principali delle gallerie di discenderia con scavo in tradizionale (quattro gallerie per ogni stazione)

Le stazioni sono costituite da un pozzo centrale di sezione mediamente pari a 45 x 20 m, realizzato a cielo aperto tra paratie costituite da diaframmi in calcestruzzo armato realizzati mediante idrofresce.

Dal pozzo si dipartono le quattro gallerie di stazione e le quattro discenderie realizzate a foro cieco.

Il progetto delle opere in sotterraneo ha dovuto affrontare e risolvere, in funzione della specificità del sottosuolo napoletano, le problematiche tipiche del tunnelling in area urbana quali la limitazione dei cedimenti in superficie e la sicurezza degli scavi in condizioni di ridotta copertura e di elevati battenti idrici. Esse, come di seguito illustrato, sono state risolte facendo ricorso a tecnologie costruttive tra le più avanzate e affidabili.



Figura 22 - La galleria di banchina di stazione Garibaldi: lo scavo in tradizionale sotto congelamento

## Lo stato d'avanzamento dei lavori

### Pozzi

A fine 2007 sono stati realizzati i pozzi Garibaldi, Università, Municipio e Toledo.

### Gallerie di stazione

- ◆ Stazioni Garibaldi e Università: sono state realizzate tutte e quattro le gallerie di banchina;
- ◆ stazione Municipio: sono state realizzate tre delle quattro le gallerie di banchina. La galleria lato stazione Toledo posta sul binario pari è al momento in fase di scavo;
- ◆ stazione Toledo: devono essere realizzate tutte e quattro le gallerie di banchina a partire dal camerone di scavalco già realizzato.

### Gallerie di discenderia

- ◆ Stazione Garibaldi: sono state realizzate entrambe le discenderie lato binario pari;
- ◆ stazione Università: sono state realizzate entrambe le discenderie lato binario pari;
- ◆ stazione Municipio: sono state realizzate entrambe le discenderie lato binario dispari;
- ◆ stazione Toledo: sono state realizzate entrambe le discenderie lato binario pari.

### Gallerie di linea

Le due gallerie di linea, partite dal pozzo Brin (Figura 2), hanno raggiunto la pk 4+300 (lato binario dispari - tratta Municipio-Toledo) e pk 1+800 (lato binario pari - tratta Garibaldi-Duomo).

### Altre opere

In corrispondenza di Piazza VII Settembre si sta realizzando un pozzo per l'individuazione, la bonifica e il trattamento delle eventuali cavità presenti tra la piazza stessa e la stazione Dante. Tale pozzo consentirà l'estrazione di entrambe le frese senza interferenze con la stazione Dante già in esercizio e le lavorazioni in corso nelle stazioni già attraversate dagli scavi.

\* Professore Ingegnere di Rocksoil SpA

\*\* Dottore Ingegnere di Rocksoil SpA

### Dati tecnici

Concedente: Comune di Napoli

Concessionario: Metropolitana di Napoli SpA

Progettazione e direzione lavori: Metropolitana Milanese SpA

Progettazione opere in sottoterraneo: Rocksoil SpA (Milano)

Inizio lavori: 2002

Fine lavori prevista: 2011



2) l'esecuzione di un trattamento di consolidamento e di impermeabilizzazione attraverso un guscio di terreno di adeguato spessore al contorno dei futuri cavi, ottenuto utilizzando la tecnica di congelamento mista azoto-salamoia con la circolazione del fluido refrigerante in sonde opportunamente posizionate nel terreno (Figure 19 e 20) a bassissime temperature ( $-195^{\circ}\text{C}$  per l'azoto e  $-35^{\circ}\text{C}$  per la salamoia). Il sistema misto prevede l'attivazione del congela-

## METROPOLITANA DI NAPOLI LINEA 1 GALLERIE DI BANCHINA

### ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE AL CONTOURNO DELLA GALLERIA

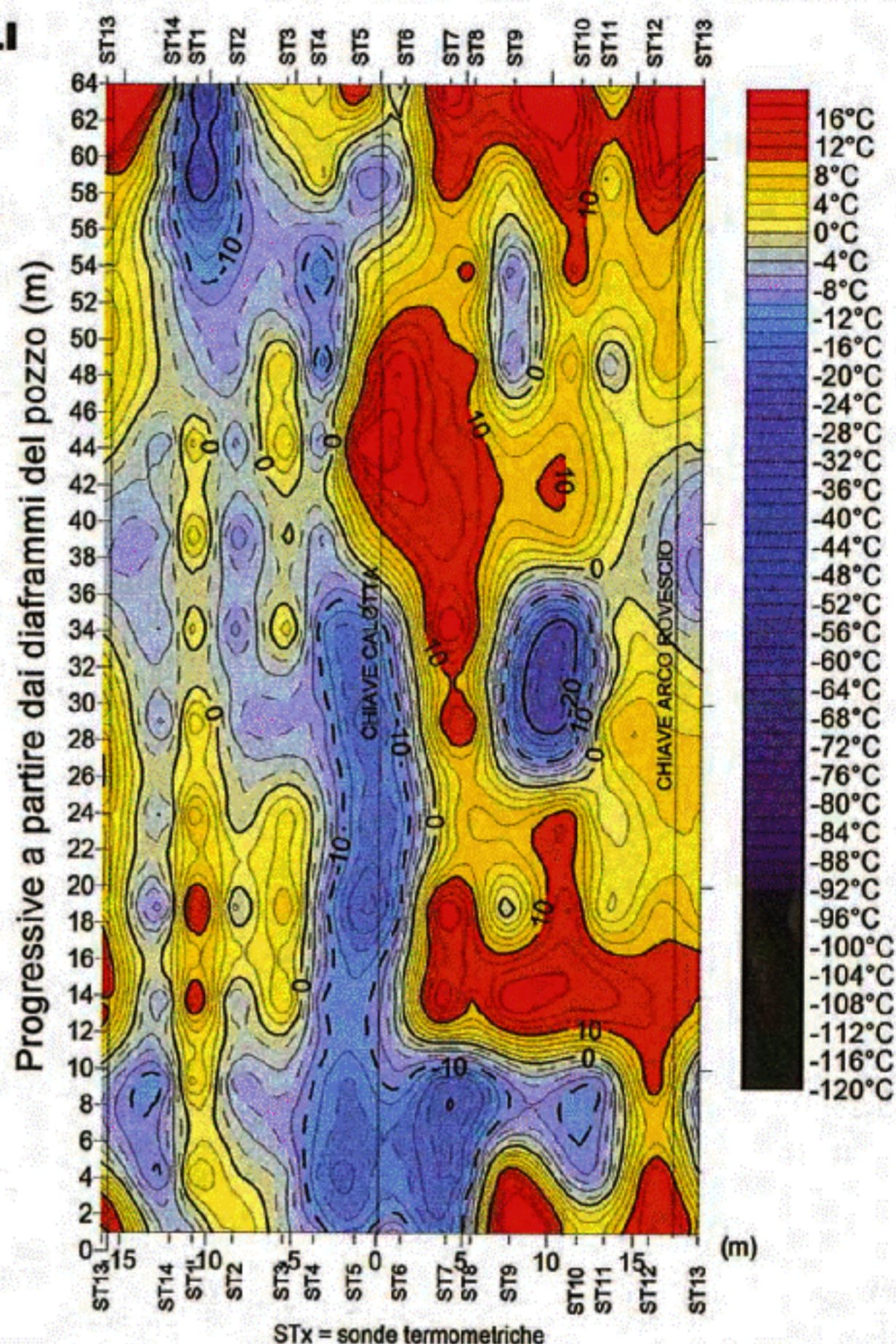
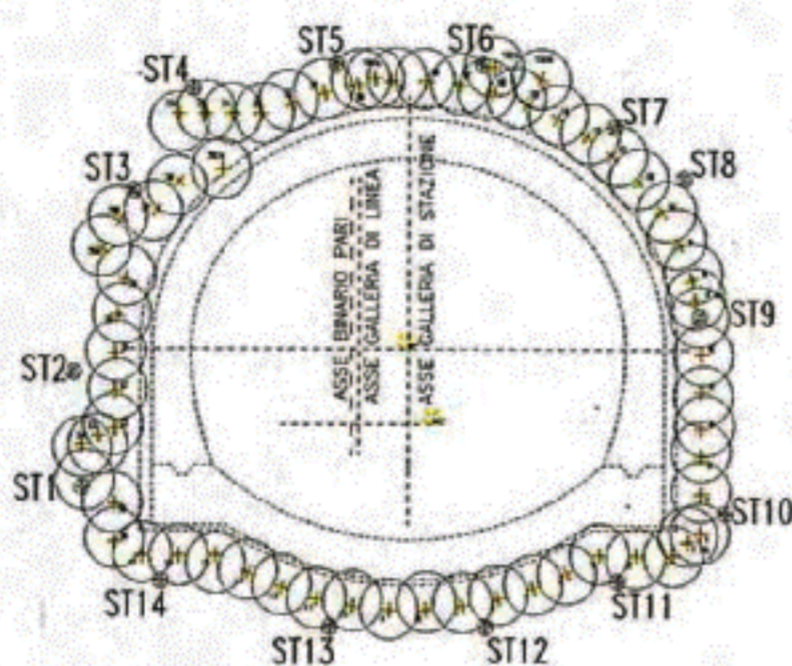


Figura 21 - Le rappresentazioni termometriche bidimensionali

mento attraverso azoto liquido e successivamente, in fase di mantenimento, il passaggio a salamoia una volta ottenuta la chiusura del congelamento su tutto l'intorno della galleria.

La necessità di raggiungere in ogni punto la temperatura richiesta di  $-10^{\circ}\text{C}$  a 0,50 m dalle sonde congelatrici ha di fatto portato ad avere spessori di terreno congelato ben superiori ad 1 m. In fase di realizzazione dell'intervento di congelamento è stato possibile misurare le effettive temperature raggiunte nella zona interessata, attraverso l'introduzione di catene termometriche disposte parallelamente alle sonde congelatrici.

Modellazioni matematiche basate su concetti relativi alle teorie riguardanti la trasmissione del calore hanno reso possibile realizzare (Figura 21) delle rappresentazioni termometriche piane in grado di visualizzare, in corso d'opera, l'andamento e le variazioni di temperatura alla distanza di progetto precedentemente indicata (0,50 m dalle sonde congelatrici).

L'intervento ipotizzato è risultato pertanto complessivamente in grado di garantire la sicurezza delle lavorazioni, impedendo manifestazioni di venute d'acqua in sotterraneo.

Lo scavo delle gallerie di stazione e delle discenderie è avvenuto, infine, a piena sezione con l'ausilio di una fresa puntuale ed è stato seguito dalla posa del priverivestimento, dell'impermeabilizzazione e del rivestimento finale di calcestruzzo, chiuso con l'arco rovescio (Figura 22). Solo una volta terminata tale fase, quindi dopo aver assicurato un adeguato contenimento a tutte le pareti di contorno degli scavi, il congelamento è stato disattivato.

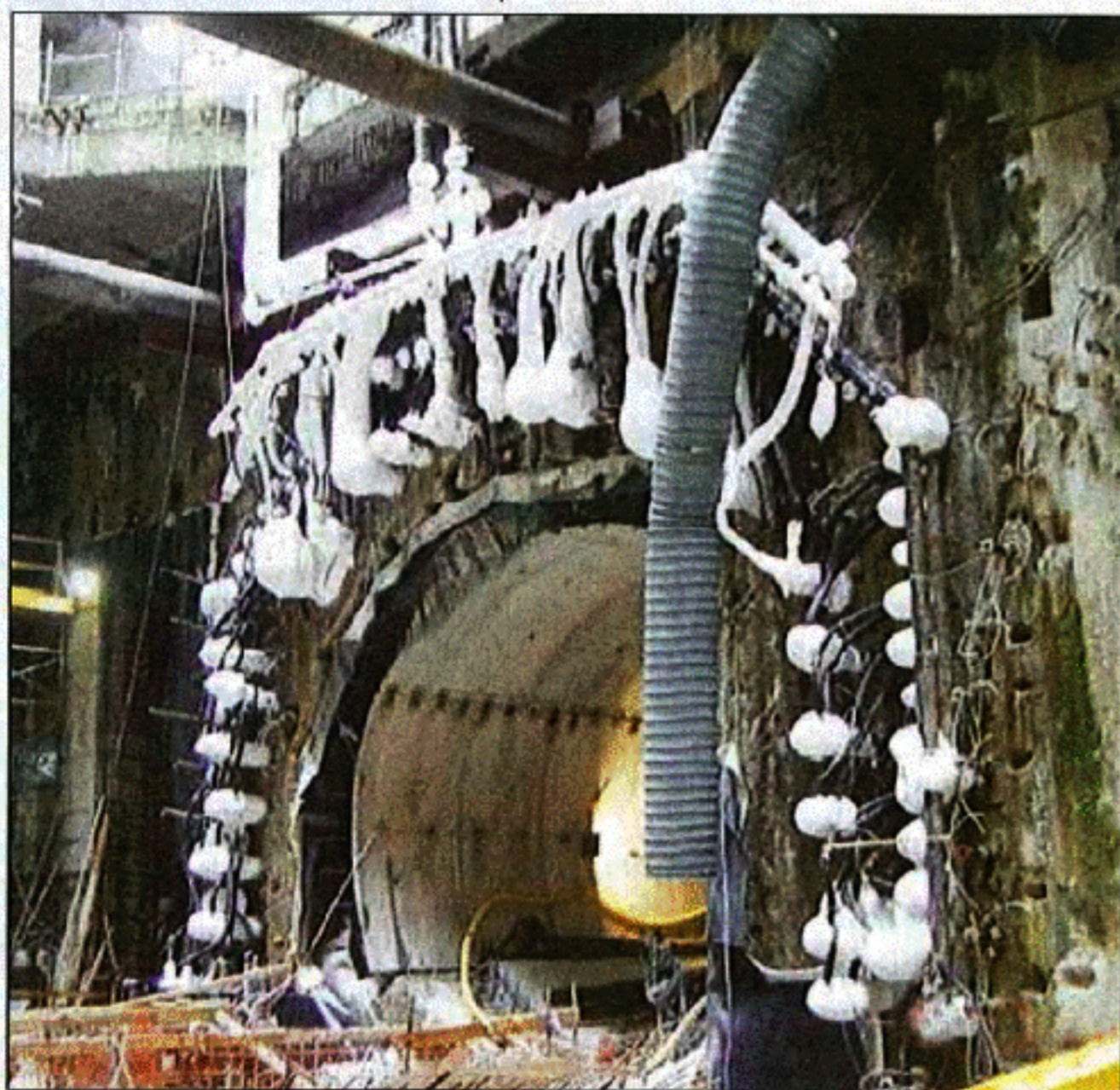


Figura 19 - Il congelamento mediante azoto



Figura 20 - Lo scavo delle gallerie di banchina sotto congelamento

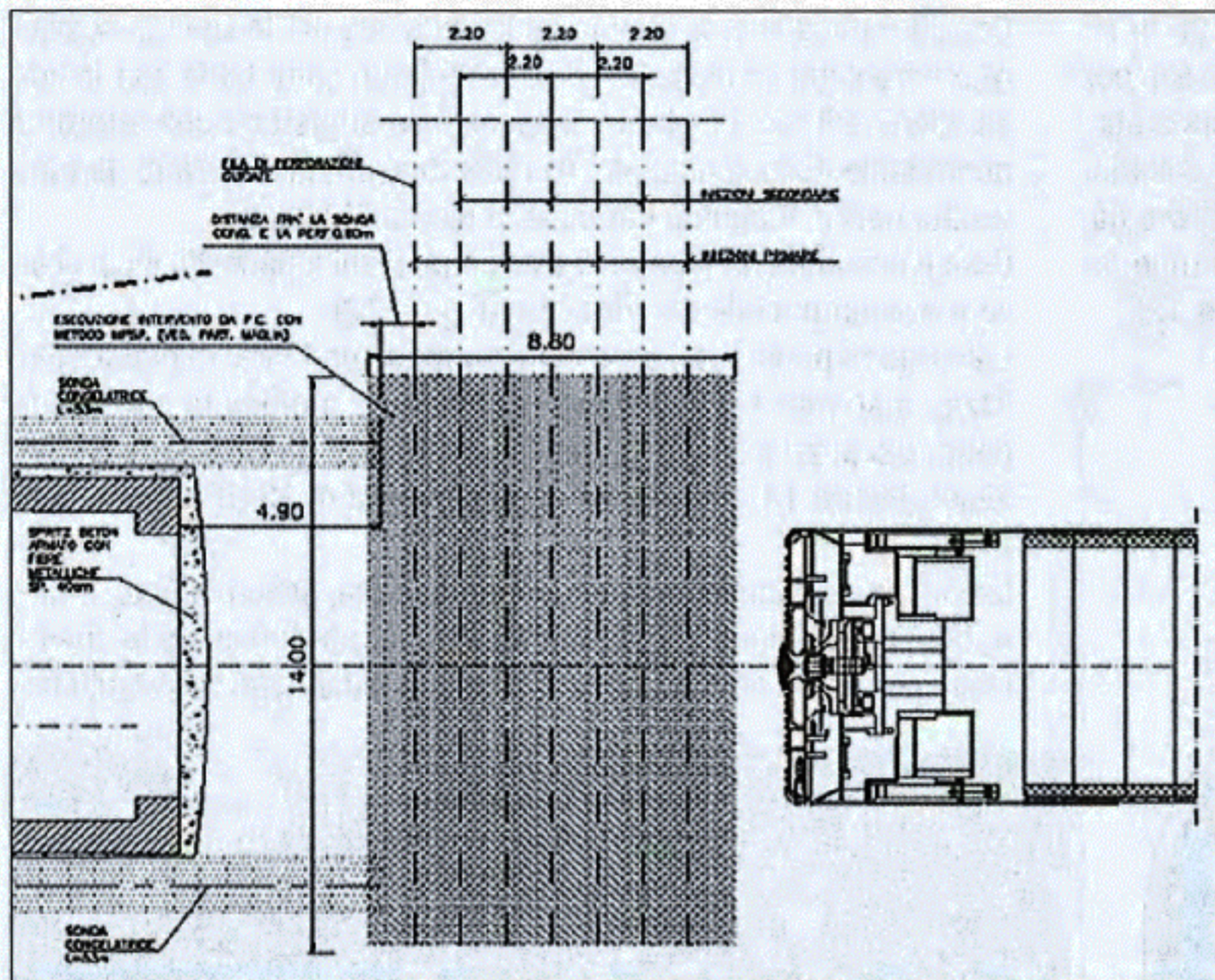


Figura 15 - Il tampone di fondo eseguito dal piano campagna: la sezione longitudinale

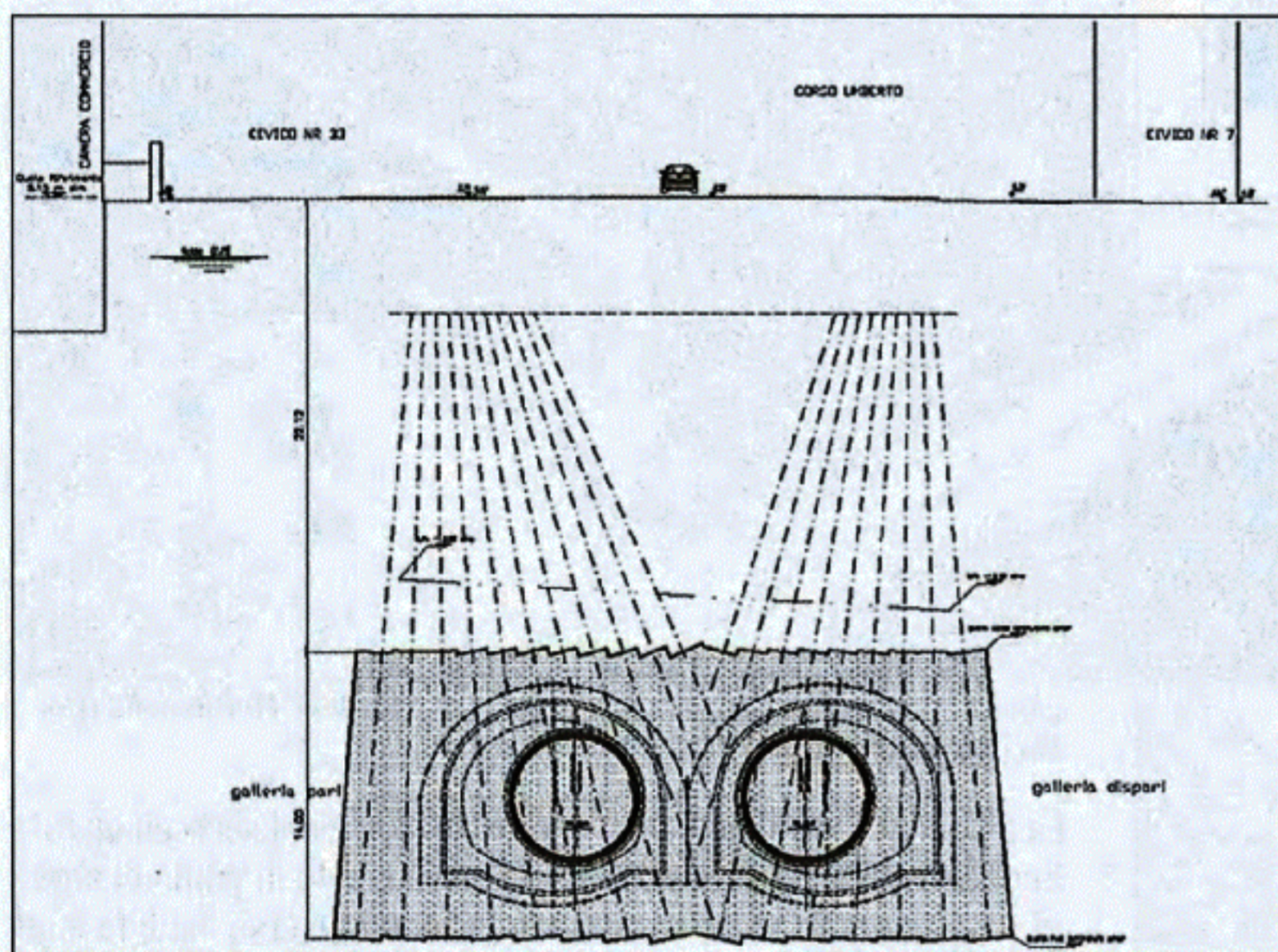


Figura 16 - Il tampone di fondo eseguito dal piano campagna: la sezione trasversale

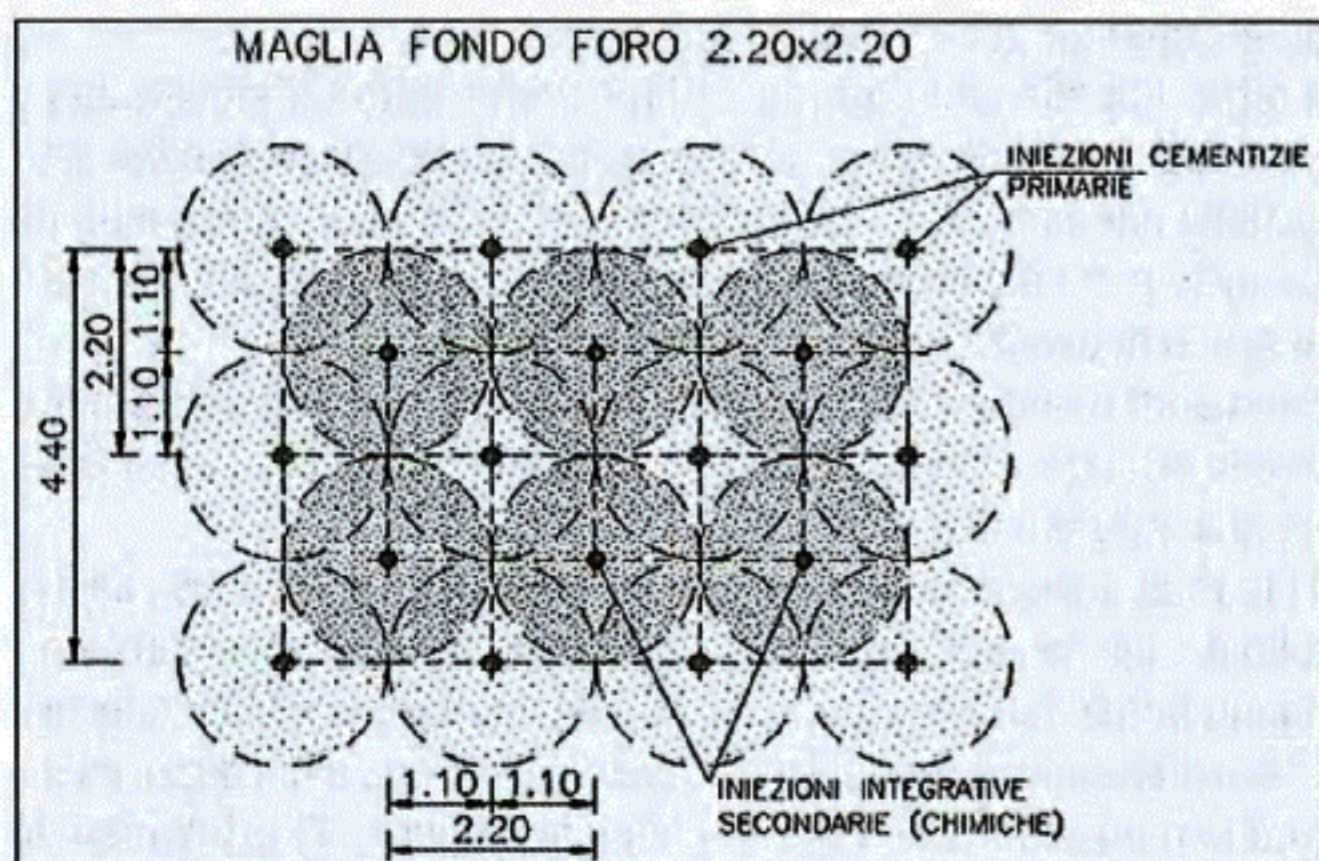


Figura 17 - Il sistema MPSP: la maglia

Tale tecnologia, tipica da roccia fratturata, prevede l'isolamento delle valvole attive attraverso un sistema a doppio sacco otturatore.

In questo modo, ciascun tratto di perforazione è confinato a monte e a valle da due sacchi otturatori distanziati di circa 2,5 m (Figura 18). Rispetto alle altre tecnologie, questa presenta il vantaggio di non richiedere onerose riperforazioni dei tratti iniettati e di operare comunque un controllo sulla diffusione delle miscele all'interno dell'ammasso.

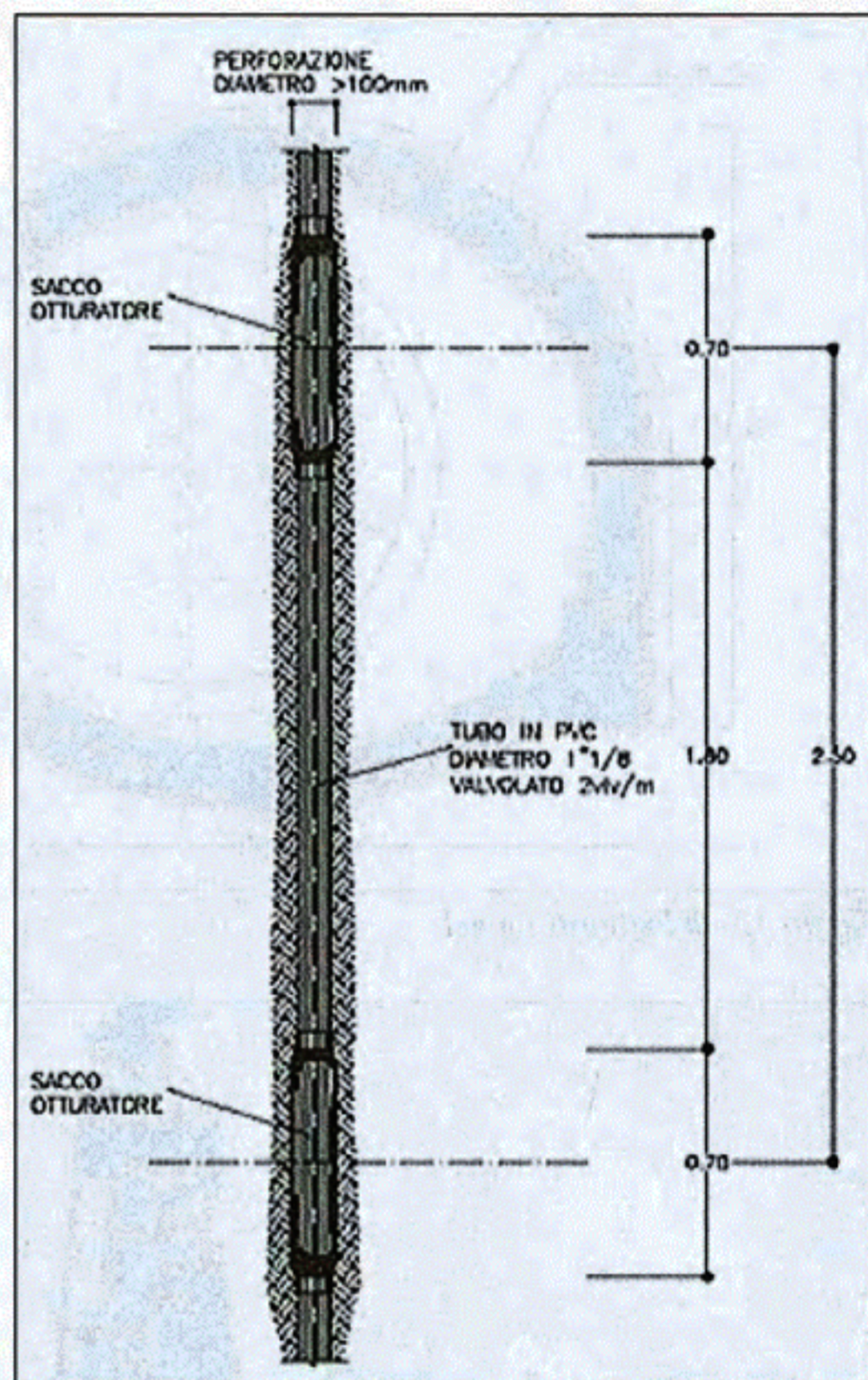


Figura 18 - Il sistema MPSP

Infatti, senza la presenza di un tampone di chiusura trasversale del cilindro di terreno congelato si sarebbe potuto innescare un moto di filtrazione coassiale alla galleria stessa verso il pozzo di stazione. Tale pericoloso evento avrebbe potuto produrre:

- il trasporto del materiale fine e/o fenomeni di consolidazione, relativamente agli strati superiori costituiti da sabbie e pozzolane;
- lo scioglimento del terreno congelato sul perimetro della galleria;
- un rallentamento delle operazioni di scavo e di messa in opera dei rivestimenti previsti per le gallerie di stazione.

Lo scavo delle gallerie di banchina ha evidenziato come questo possa avvenire senza particolari fenomeni tenso-deformativi tali da costringere all'interruzione dell'avanzamento per eseguire i getti di arco rovescio, murette e calotta a distanze restrittive dal fronte. E' stato invece necessario in due casi sospendere l'avanzamento per eseguire i getti di rivestimento definitivo in modo da proteggere il muro di ghiaccio al contorno e contenere i progressivi fenomeni di decongelamento;



Le gallerie di banchina, aventi coperture comprese fra i 25 m e i 30 m, sono collegate ai pozzi attraverso gallerie di discenderia per il transito dei passeggeri (in numero di quattro per ciascuna stazione) che corrono parallelamente a quelle di linea. Dette gallerie, per una cinquantina di metri in entrambe le direzioni a partire dai pozzi, sono costruite con sezione maggiorata (superficie utile 55 m<sup>2</sup>) onde potervi alloggiare le banchine di stazione (Figura 12).

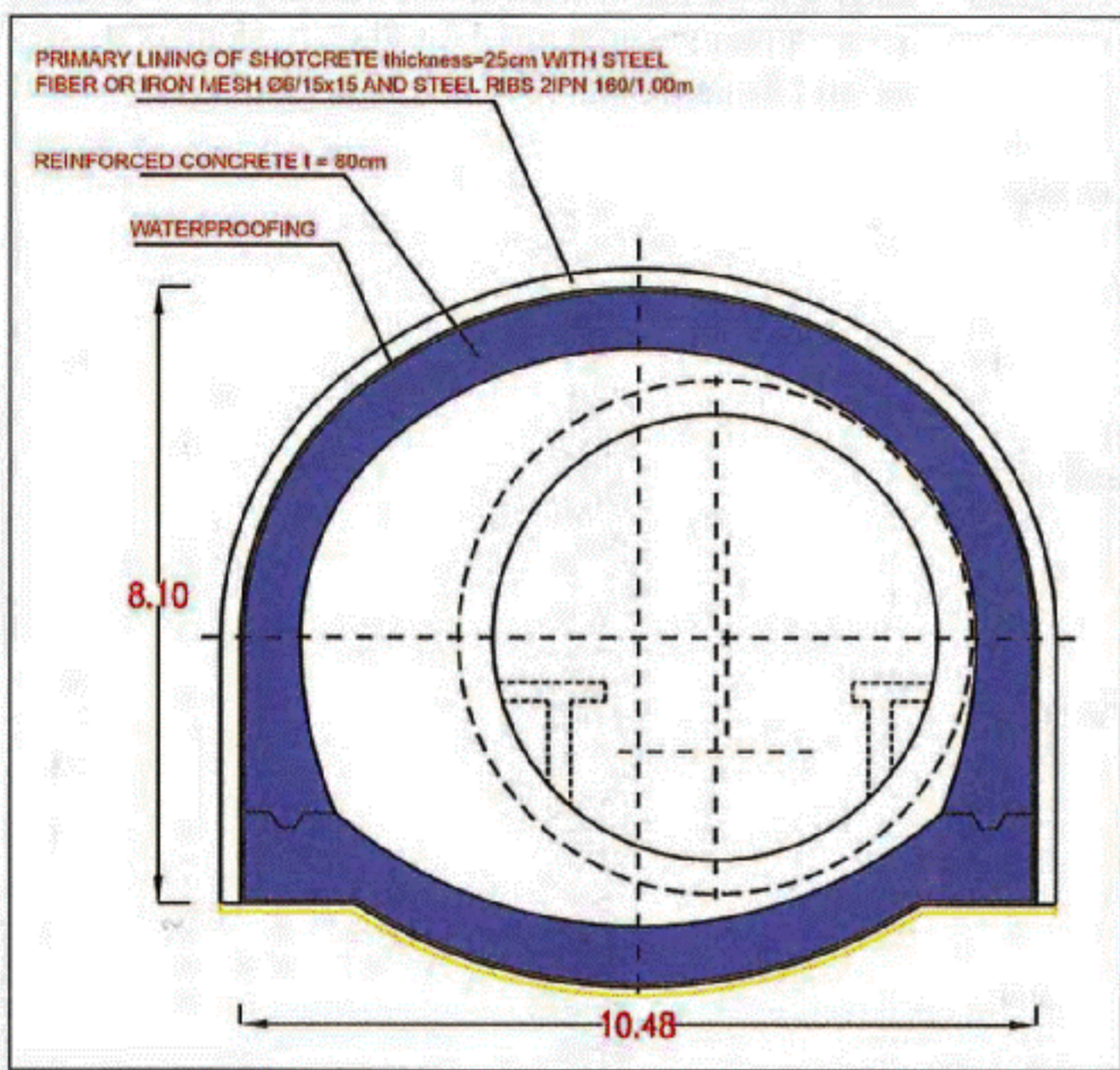


Figura 12 - Il Platform Tunnel



Figura 13 - L'idrofresa

Considerata la scarsa qualità geomeccanica dei terreni da scavare e i problemi connessi con l'avanzamento sotto falda, per la costruzione dei pozzi è stato indispensabile progettare una struttura perimetrale di contenimento, da realizzarsi prima di iniziare gli scavi, che desse adeguate garanzie di tenuta idraulica.

Essa è costituita da paratie di diaframmi piani a pannelli, il cui scavo è avvenuto mediante idrofresa (Figura 13).

I diaframmi perimetrali sono controventati con i solai di piano, realizzati man mano che lo scavo raggiunge le profondità corrispondenti. Dai pozzi avviene, infine, la costruzione delle gallerie di stazione (Figura 14) e di quelle di discenderia di 33 m<sup>2</sup> circa di sezione.

La calotta delle gallerie di banchina interessa, generalmente, i materiali di transizione al contatto tra il substrato tufaceo e le sovrastanti pozzolane e/o sabbie, quando non direttamente queste ultime.

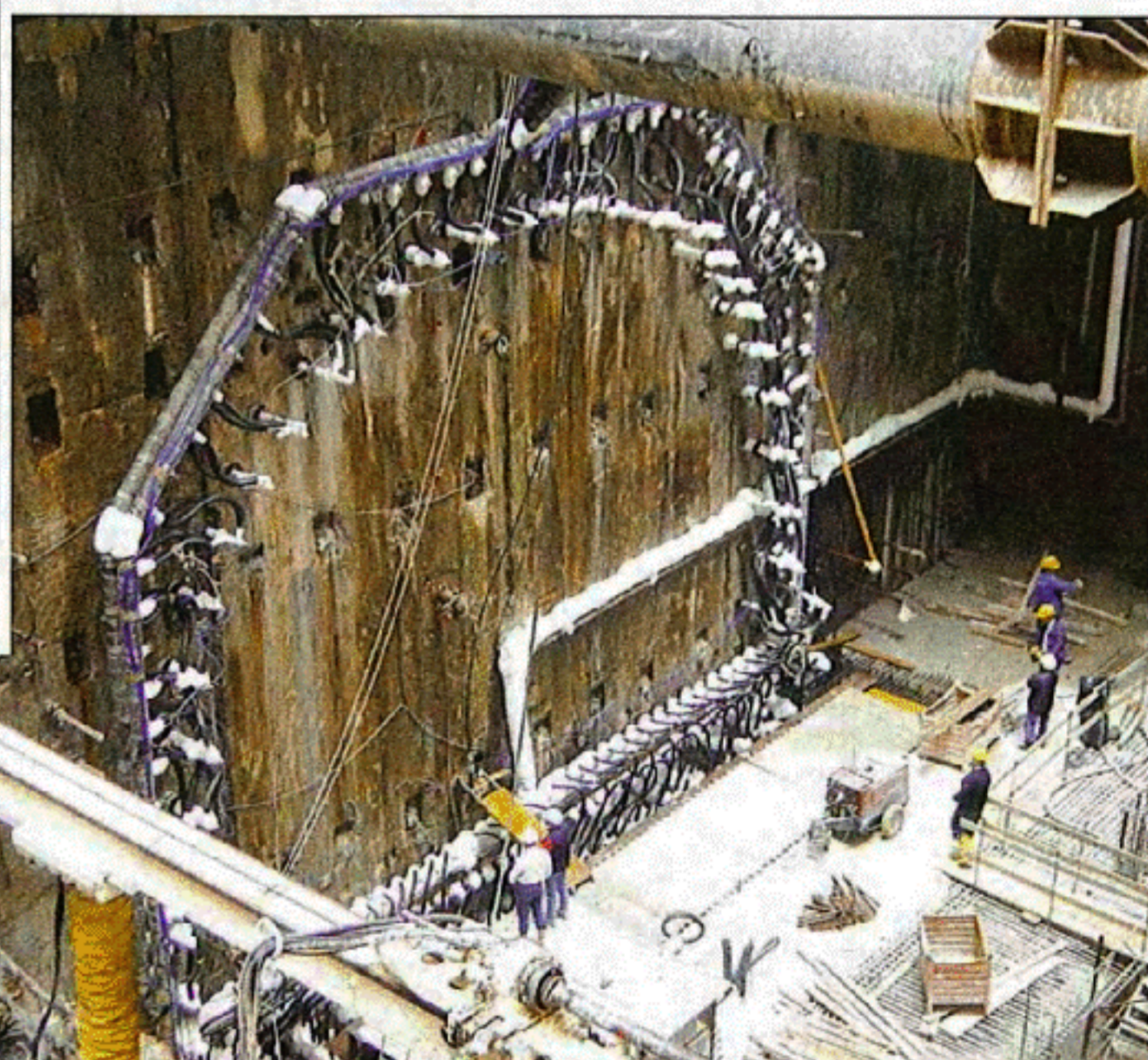


Figura 14 - La realizzazione delle gallerie di banchina: l'inizio della fase di congelamento

La presenza individuata di famiglie di fratturazioni verticali da raffreddamento nello strato litoide, potenzialmente in grado di creare una connessione idraulica tra le gallerie immerse nel tufo e gli strati più superficiali costituiti di materiali sciolti, ha posto il problema del contenimento dell'acqua e dell'eventuale trasporto solido al contorno delle opere da realizzare.

Inoltre, l'analisi dei dati raccolti ha evidenziato un'elevata permeabilità in grande dell'ammasso, quindi un'elevata sensibilità della falda alle operazioni potenzialmente in grado di creare moti di filtrazione e il disturbo del congelamento al contorno operato dallo scavo di avanzamento.

Sono stati quindi individuati interventi da attuarsi preventivamente alla realizzazione degli scavi in modo da garantirne l'esecuzione in condizioni di sicurezza quali:

1) la realizzazione di un tampone di fondo (Figure 15 e 16), costituito da una serie di perforazioni eseguite in generale da piano campagna prima dell'attivazione del congelamento, svincolandone così le lavorazioni da quelle dello scavo delle gallerie e dei pozzi, iniettate con miscele cementizie e chimiche (Figura 17) attraverso la tecnologia denominata MPSP (Multi Packer Sleeved Pipe).





- ◆ al contorno del cavo, mediante l'installazione di un rivestimento impermeabile di conci prefabbricati reso immediatamente attivo intasando, con calcestruzzo estruso, lo spazio che inevitabilmente rimane tra il terreno e lo stesso;

Anche dal punto di vista ambientale i vantaggi conseguiti sono importanti. Infatti:

- ◆ la falda non viene assolutamente interessata, in quanto la pressione dell'acqua al fronte è costantemente controbilanciata dal sistema di confinamento idraulico operato dalla macchina;
- ◆ i materiali impiegati non sono inquinanti; il terreno scavato, mescolato con acqua e opportuni additivi, è portato all'esterno, dove, una volta separato dagli altri elementi, è impiegato, in funzione della qualità intrinseca, per la realizzazione di altre opere civili (rilevati, argini, ecc.).

## Il rivestimento definitivo in conci prefabbricati: l'anello universale

Il rivestimento definitivo delle gallerie di linea è posto in opera direttamente dalla TBM, mediante l'erettore, già all'interno dello scudo. Tale rivestimento, costituito dall'assemblaggio di conci prefabbricati fuori opera svolge le seguenti funzioni: contenimento dei carichi a lungo termine durante la vita utile dell'opera, contrasto delle azioni transitorie in fase di spinta della macchina, tenuta idraulica, rispetto dell'andamento teorico del tracciato.

Per quanto riguarda la geometria, si è optato per la tipologia così detta ad "anello universale", caratterizzato, dalla caratteristica forma troncata obliquamente (Figure 5, 6 e 7) che, non prevedendo pezzi speciali con posizioni prefissate, consente una notevole flessibilità nell'adattamento alle differenti condizioni plano-altimetriche del tracciato. Il concetto base è infatti quello che la "conicità" del singolo anello (costituito da più conci) consente, con la scelta di una opportuna rotazione rispetto al precedente già installato, di seguire l'andamento del tracciato per successive approssimazioni semplicemente assemblando i diversi anelli nella sequenza di volta in volta più opportuna. La tenuta idraulica è garantita da guarnizioni alloggiati in sede continua lungo tutto il perimetro dei conci.

Le caratteristiche salienti del rivestimento adottato sono riportate graficamente in questa pagina:

Figura 5

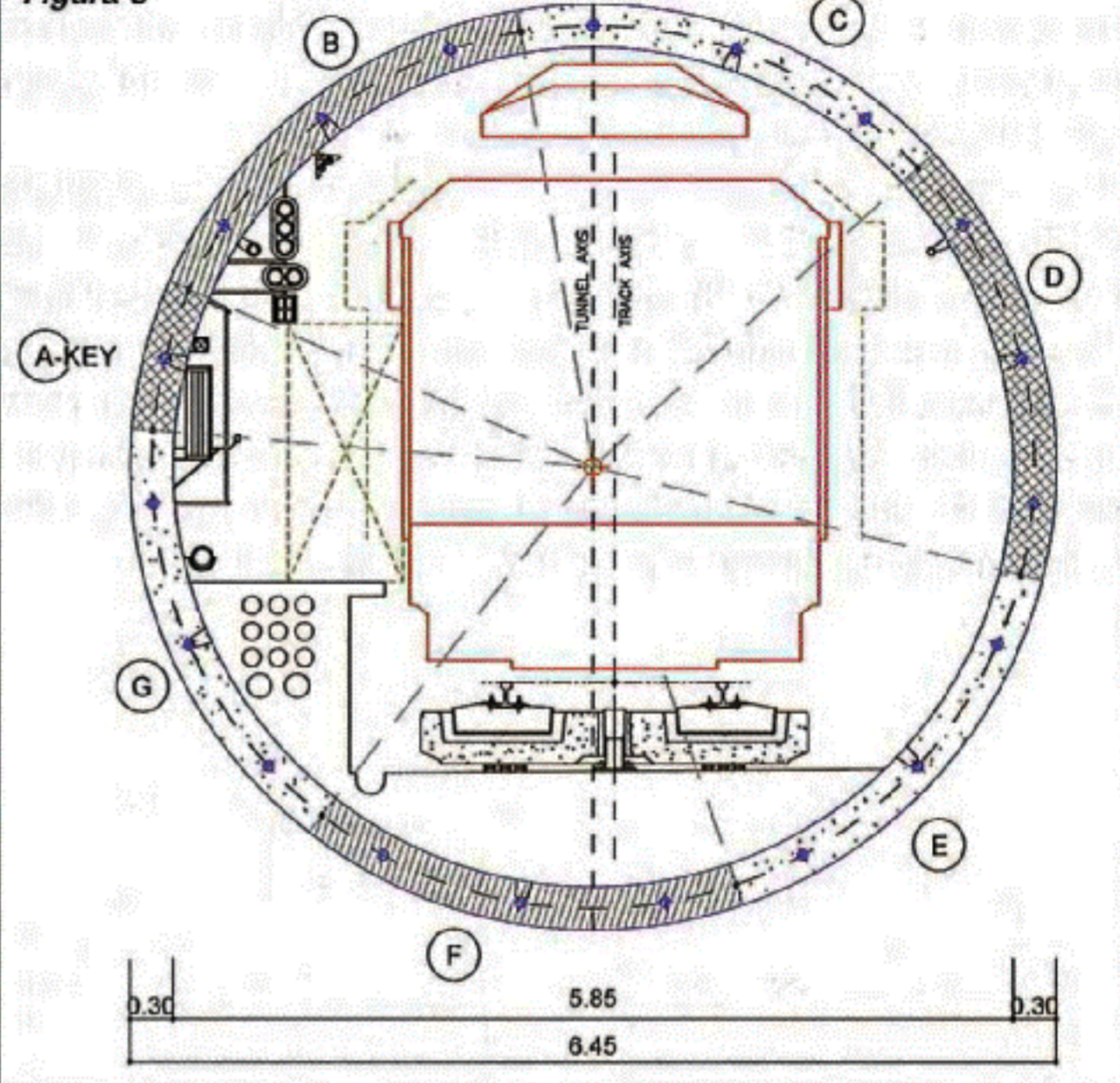


Figura 6 - Universal Ring

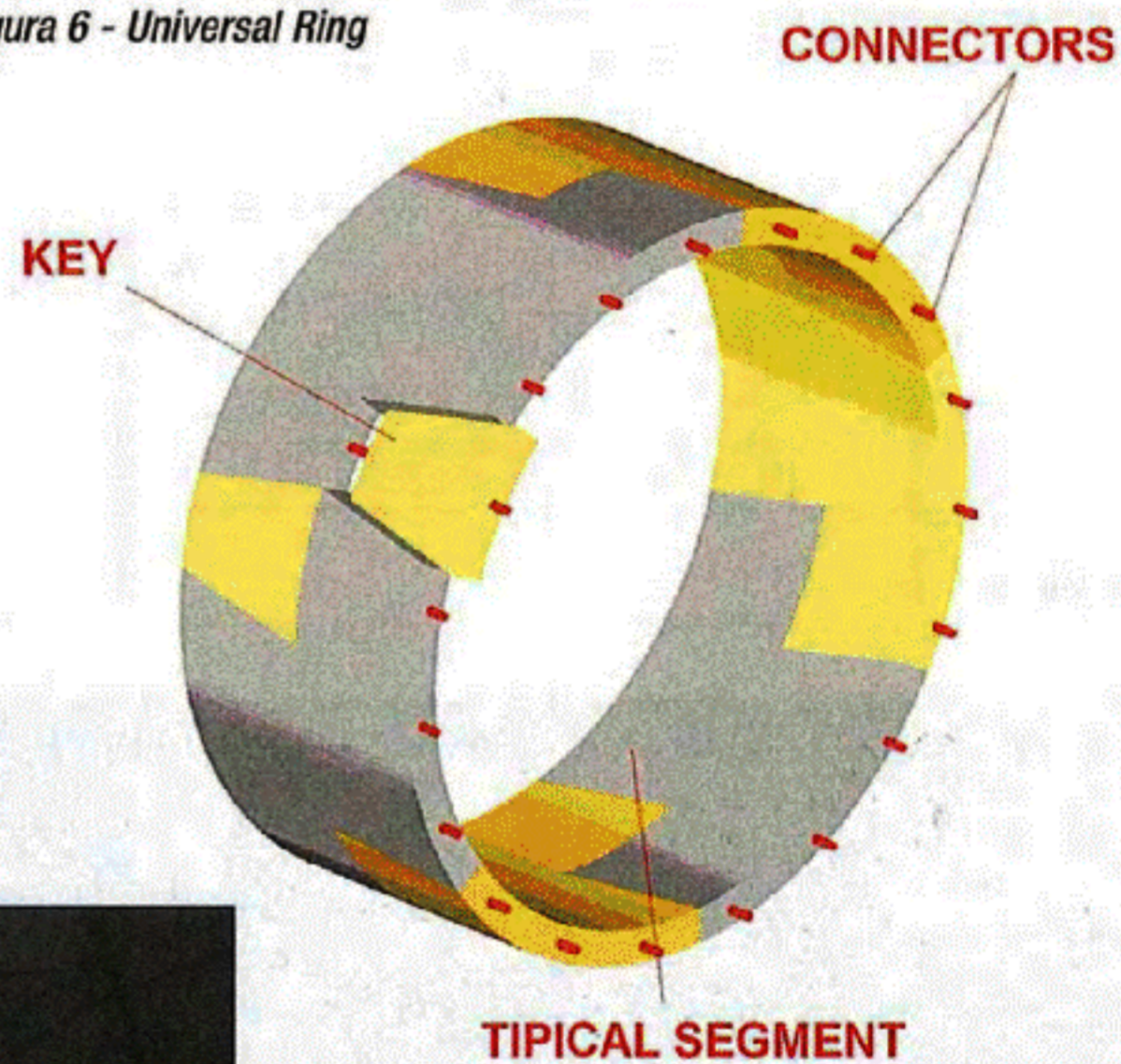


Figura 7 - La galleria di linea realizzata con scavo meccanizzato

Diametro esterno dei conci	6.450 mm
Diametro interno dei conci	5.850 mm
Spessore dei conci	300 mm
Raggio minimo di curvatura	180 m
Raggio di progetto	150 m
Lunghezza media dell'anello	1.200 m
Lunghezza minima dell'anello	1.174 m
Lunghezza massima dell'anello	1.226 m
Numero di conci per anello	sei + chiave
Peso medio dell'anello	18 t
Peso medio del coniglio	3 t
Calcestruzzo	Rck 45 Mpa
Armatura	acciaio FeB44k, circa 100 kg/m <sup>3</sup>

Tabella 6



Il tufo, infatti, si è rivelato essere un materiale estremamente difficile da iniettare per la sua bassa permeabilità intrinseca e per la presenza, non rilevabile a priori, di discontinuità a permeabilità fino a due ordini di grandezza superiori in grado elevare drasticamente la permeabilità in grande. La soluzione del problema è stata individuata congelando l'acqua nell'ammasso al contorno delle gallerie da realizzare attraverso un sistema di sonde congelatrici longitudinali disposte all'esterno del profilo di scavo.

L'inerzia termica dei terreni trattati, unita ad una seppur debole circolazione idrica, hanno portato alla necessità - riscontrata in corso d'opera - di "attivare" l'intervento mediante azoto liquido fino all'ottenimento di un muro di ghiaccio, attorno al profilo di scavo, di almeno 1 m, con temperature attorno ai  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Quindi, le fasi di scavo e di getto dei rivestimenti definitivi sono state condotte durante il "mantenimento", garantito in maniera indiretta attraverso la circolazione di salamoia, costituita da acqua e cloruro di calcio a temperature attorno ai  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Le perforazioni per gli alloggiamenti delle sonde congelatrici, eseguite dai pozzi di stazione e di lunghezze anche superiori ai 60 m, sono avvenute mediante sistemi di controllo della direzione e attraverso l'utilizzo di preventer meccanici ad evitare pericolosi ingressi di acqua in pozzo.

## Le gallerie di linea

Dal punto di vista progettuale, l'andamento altimetrico delle gallerie di linea è stato definito in modo che, per quasi tutta la loro lunghezza, le stesse giacessero entro la formazione litoide del tufo giallo, caratterizzata da buoni parametri meccanici.

La necessità di limitare i risentimenti in superficie, minimizzare l'impatto sul tessuto urbano ed evitare il disturbo sul moto di filtrazione monte-valle precedentemente descritto ha portato a scartare da subito soluzioni tipo "Cut & Cover" a bassa copertura dato l'andamento, per buona parte del tracciato, parallelo a quello della linea di costa, al di sotto di zone ad alta densità di traffico veicolare e caratterizzate dalla presenza di grandi edifici in muratura a fondazioni superficiali; peraltro, salvo che per un tratto iniziale, ubicato immediatamente a valle di Piazza Dante, le gallerie sono completamente sotto falda. Il battente idraulico massimo (circa 30 m sul piano ferro come detto) è in corrispondenza di Piazza Garibaldi.

Anche se la permeabilità del tufo è ridotta ( $10^{-4}$ - $10^{-5}$  cm/s), nei tratti in cui la copertura litoide è minore o dove sono presenti fratture subverticali nella roccia, è reale il pericolo che possano verificarsi, attraverso i terreni sciolti di copertura, venute d'acqua concentrate importanti con trasporto solido e conseguente grave subsidenza superficiale. È un fenomeno tristemente noto nella città di Napoli, legato alla presenza di cavità disperse nel sottosuolo e alla marcata erodibilità dei materiali piroclastici sciolti.

Considerazioni quali caratteristiche geometriche del tracciato e della sezione tipo, condizioni al contorno (soggezioni ambientali), condizioni geotecniche e idrogeologiche, unite all'obiettivo di realizzare in sicurezza una galleria in condizioni difficili riducendo al minimo il rischio di possibili interferenze dirette e/o indirette con le preesistenze hanno portato alla decisione di adottare due scudi chiusi (uno per canna) da 6,75 m di diametro (Figura 4) in grado di esercitare un'adeguata contro pressione al fronte, contenere l'estrusione e contrastare l'ingresso d'acqua. L'immediato rivestimento delle pareti dello scavo avviene mediante l'installazione di un rivestimento impermeabile di conci prefabbricati, montati all'interno dello scudo e intasati a tergo dello stesso con calcestruzzo estruso.

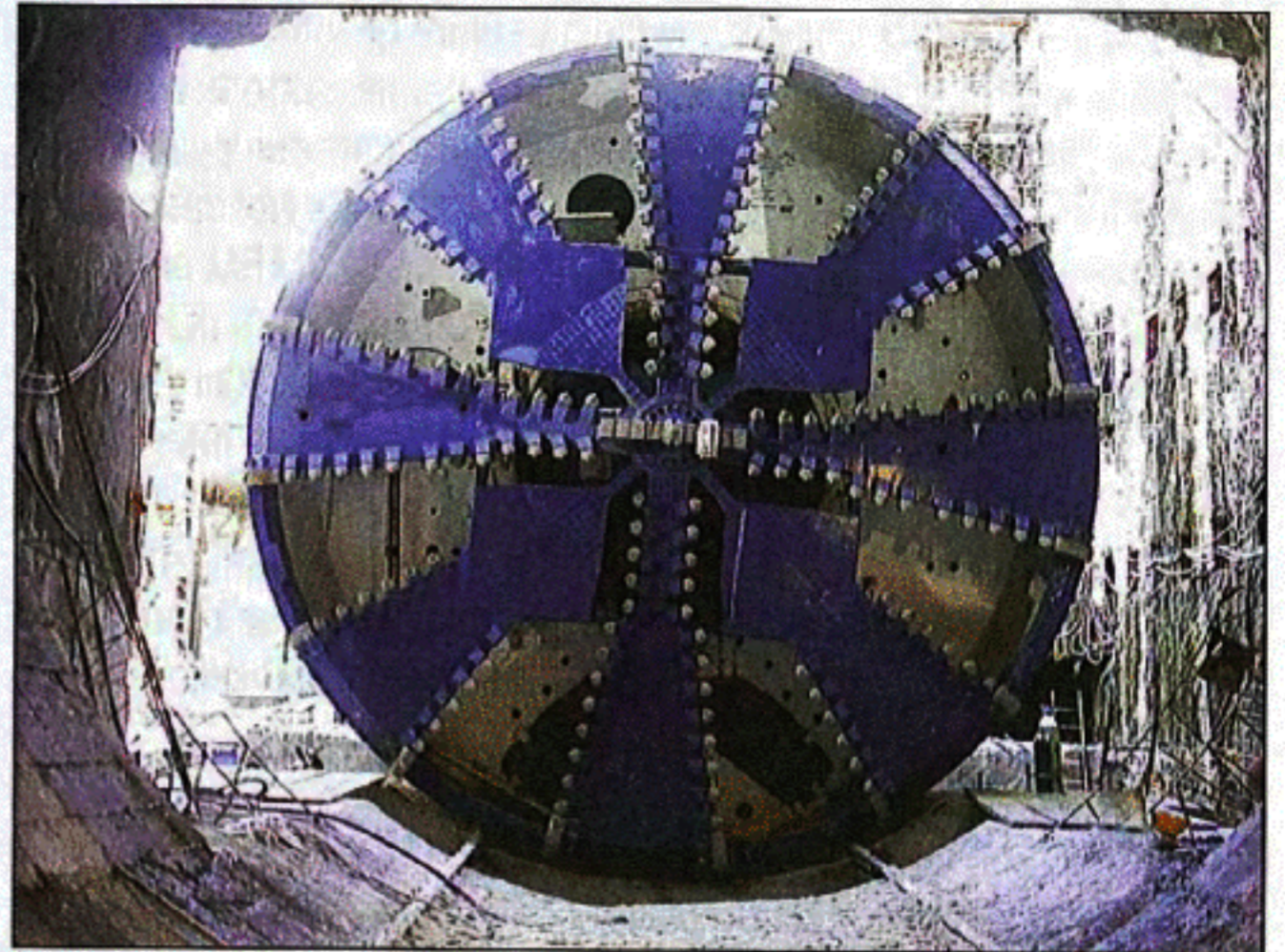


Figura 4 - Uno scudo chiuso del diametro di 6,75 m

Tra le diverse tipologie, è stata scelta la tecnologia EPB (Earth Pressure Balance Shield) piuttosto che quella Hydroshield, in funzione della maggiore flessibilità del sistema EPB in termini di logistica e di gestione dello scavo, alla luce delle potenzialità offerte oggi dai sistemi di condizionamento del materiale da scavare sistemi, questi, che hanno ampliato notevolmente il range di lavoro della tipologia EPB in funzione del terreno o roccia tenera da scavare. Dal punto di vista strettamente progettuale, le condizioni di lavoro critiche, significative per una corretta progettazione della TBM, sono esplicitabili in termini di pressione massima che deve essere in grado di esercitare al fronte di scavo. Valutazioni in merito al comportamento deformativo dell'ammasso e del livello di falda al di sopra della galleria da realizzare, hanno portato ad indicare per la ipotizzabile pressione massima di lavoro un valore di 4,5 bar (comprensivo di opportuno coefficiente di sicurezza). La progettazione propria della TBM, di competenza della casa costruttrice (Herrenknecht), ha quindi portato alla realizzazione di un'attrezzatura di scavo che ha le caratteristiche di massima riportate in Tabella 5.

Diametro di scavo	6,75 m
Coppia massima	7.300 kNm
Velocità di rotazione massima	3,5 rpm
Potenza installata	1.200 rpm
Spinta massima	41.000 kN (19 cilindri suddivisi in 6 gruppi)
Erettore con sistema vacuum	
Condizionamento attraverso nove punti di iniezione (cinque sulla ruota e quattro in camera di scavo) backfilling attraverso quattro linee di iniezione indipendenti, con sistema a bicomponente (malta + accelerante) e controllo pressioni e volume in modalità automatica	

Tabella 5

Questo modo di operare, ha permesso di minimizzare le "perdite di volume" in fase di avanzamento, di annullare completamente l'insidia rappresentata dalle eventuali venute d'acqua e di ottenere il controllo dei cedimenti in superficie, garantendo un efficace e immediato contenimento di tutte le superfici di scavo della galleria in fase di realizzazione:

- ♦ al fronte, attraverso il controbilanciamento della pressione idrostatica e della spinta del terreno in corrispondenza della testa dello scudo;





Con la fase di terapia si arriva invece a definire gli interventi di stabilizzazione e le modalità di avanzamento idonei per affrontare in maniera corretta lo scavo e prevenire i moti di filtrazione che possono generarsi tra la superficie e le gallerie in avanzamento. Nel caso specifico ciò come detto, si è tradotto nella scelta del tipo di TBM per le gallerie di linea e degli specifici interventi volti al confinamento dell'acqua negli scavi in tradizionale, nella definizione delle procedure di avanzamento, nell'individuazione e nel dimensionamento di interventi di precontenimento, di preconsolidamento e di impermeabilizzazione, nel dimensionamento dei rivestimenti di prima fase e definitivi, nell'individuazione di soluzioni puntuali per situazioni specifiche relative alla possibile interferenza con le pre-esistenze (opere di presidio).

## Il metodo ADECO-RS: valutazioni e considerazioni di base

Il progetto delle gallerie a foro cieco è stato condotto secondo i principi del metodo ADECO-RS (P. Lunardi, 1994-1996), che ha come obiettivo il controllo della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo della galleria. Per una descrizione di tale metodo - ormai di uso comune e inserito nei Capitolati di tutte le Amministrazioni Pubbliche e le stazioni appaltanti - si rimanda alla vasta bibliografia disponibile.

Si vuole però sottolineare la sua peculiarità nel fornire supporto non solo durante la fase di progettazione vera e propria (design stage), ma anche durante la fase di realizzazione dei lavori (construction stage). L'interpretazione dei riscontri registrati dal sistema di monitoraggio e di controllo installato (relativamente alla risposta deformativa) riveste infatti un ruolo fondamentale per poter operare un adeguamento e un bilanciamento dei sistemi di stabilizzazione e di avanzamento previsti, al fine di garantire la realizzazione dell'opera nel rispetto delle previsioni di progetto. Nel caso specifico, le analisi condotte nella fase di diagnosi hanno portato a definire due distinte situazioni, a seconda che ci si trovi all'interno della formazione tufacea o dei depositi sabbiosi.

Nel caso di quest'ultimi la natura del terreno e le condizioni al contorno hanno portato a prevedere un comportamento del fronte di tipo "instabile" (categoria C): i fenomeni deformativi al fronte, in assenza di interventi di contenimento, evolvono rapidamente in campo elasto-plastico fino a raggiungere condizioni di rottura, con collasso al fronte, senza che si possa creare naturalmente un effetto arco al contorno dello scavo, con conseguente instabilità anche del cavo.

Al fine di garantire condizioni di stabilità occorre quindi prevedere la messa in opera di interventi di "confinamento" del fronte e del cavo, in grado di esercitare pressioni di entità tale da mantenere il terreno in condizioni pressoché indisturbate, in termini tensionali e deformativi. In tale modo si riescono a controllare le "perdite di volume" in fase di scavo, così da evitare allentamenti nel terreno al contorno del cavo e risentimenti in superficie.

Nell'attraversamento della formazione tufacea, pur non avendo problematiche particolari legate a fenomeni deformativi significativi, si deve analogamente operare un'azione di confinamento al fronte e al contorno del cavo per limitare i rischi connessi al richiamo esercitato dalla decompressione indotta dallo scavo nei confronti dell'acqua di falda.

Per le gallerie di linea la fase di terapia si è tradotta nella scelta della tipologia di TBM più adatta a esercitare tali azioni, cioè in grado di operare con bilanciamento del fronte mediante pressione di terra. Tali azioni di confinamento devono essere operate:

- ♦ al fronte, mediante il mantenimento di un prefissato valore di pressione di confinamento. Il terreno entrato nella macchina attraverso le aperture previste sulla testa di scavo viene infatti tenuto in pres-

sione nella camera di scavo. Allo scopo di essere impiegato quale fluido di supporto deve presentare idonee caratteristiche di plasticità, liquidità, basso valore di permeabilità. Per questa ragione deve essere opportunamente condizionato mediante additivi, quali schiume poliuretatiche e/o bentonite. La spinta della macchina, esercitata sul fronte dai martinetti che contrastano sul rivestimento in conci prefabbricati, permette di compattare il materiale in camera di scavo (pressione interna), bilanciando le pressioni del terreno e dell'acqua (pressione esterna); la condizione "bilanciata" si ha quando il materiale in camera di scavo non può più essere ulteriormente compattato dalla pressione esterna. In questo caso, aumentando la pressione interna in camera di scavo, si producono sovrappressioni al fronte che potrebbero determinare, in funzione delle caratteristiche di copertura, innalzamenti al piano campagna. Diminuendo invece la pressione interna si producono perdite di volume, potenziali fonti di cedimenti a piano campagna. Operativamente, la pressione interna alla camera di scavo viene determinata controllando in primo luogo la velocità di avanzamento della macchina e la quantità di materiale scavato estratto dalla camera di scavo attraverso la coclea, in secondo luogo le caratteristiche di plasticità e fluidità del materiale scavato (tipologia del condizionamento). Quando il materiale viene estratto in quantità superiore al volume in ingresso (velocità della macchina) la pressione in camera di scavo decresce; diversamente quanto viene estratto in misura minore la pressione aumenta. Il controllo della pressione in camera di scavo viene effettuato mediante sensori installati a diverse quote nella camera e remotizzati nella cabina di controllo;

- ♦ al contorno, il confinamento del cavo deve essere effettuato dapprima dallo scudo metallico e successivamente dall'anello di rivestimento in conci prefabbricati reso solidale al terreno mediante il riempimento dello spazio anulare tra estradosso anello e profilo di scavo con malta cementizia, iniettata in pressione dalla coda dello scudo. Nel lungo termine è l'anello di rivestimento in c.a. che supporta con adeguati fattori di sicurezza le pressioni del terreno e dell'acqua. Il diametro dello scudo frontale è leggermente superiore rispetto al terminale ("conicità") in modo di ridurre il rischio che questo possa rimanere bloccato in fase di avanzamento. Non essendo il terreno, con ogni probabilità, in grado di mantenere l'originario profilo di scavo, una quota parte di tale valore di convergenza si trasforma in perdita di volume al contorno della cavità che dovrà essere tenuta in conto al momento della stima dei cedimenti attesi in superficie. Il riempimento a tergo dell'anello in conci avviene in coda alla macchina, immediatamente a seguito della posa dei conci (anelli di spazzole metalliche continuamente iniettati da grasso ad alta densità impediscono che la malta iniettata fluisca all'interno dello scudo), senza consentire incrementi di convergenza del cavo e ulteriori perdite di volume. Al contrario, l'immissione in pressione delle malte di riempimento permette di bilanciare le pressioni esercitate dal terreno e dall'acqua e, se opportunamente sovradimensionata, di fornire un'azione di contenimento del cavo stesso. In ogni caso, data la delicatezza dell'operazione, in corso d'opera devono essere condotti controlli sistematici allo scopo di verificare che si raggiunga un bilanciamento fra volume da riempire e quantità di malta cementizia iniettata.

Per le gallerie di banchina e le discenderie, fra le tecnologie disponibili atte a garantire la massima impermeabilità al contorno dello scavo sono state individuate quelle più adatte a trattare un ammasso eterogeneo e complesso come quello costituente il sottosuolo napoletano.

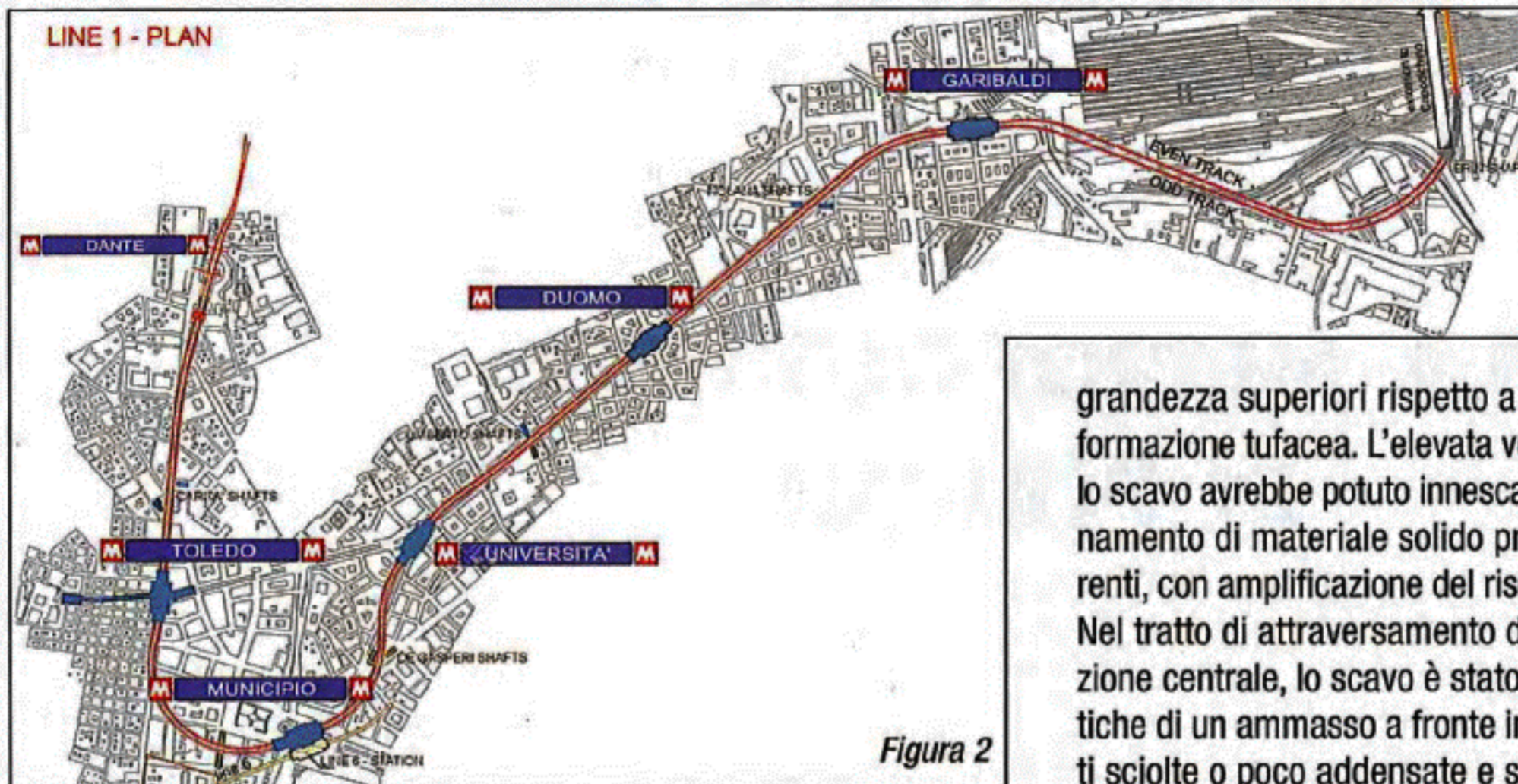


Figura 2

## L'inquadramento geologico-geotecnico

La città di Napoli è caratterizzata da un territorio frutto di intense attività endogene ed esogene e spesso modificato da azioni antropiche. La stratigrafie del sottosuolo, nel tratto compreso tra Piazza Dante e la stazione Garibaldi, evidenziano infatti, al di sotto di un primo livello di depositi di origine antropica ricchi di reperti archeologici a spessore variabile fino ad un massimo di 8÷10 m, materiali sciolti quali sabbie e pozzolane per una potenza di 10÷15 m soprastanti il bedrock costituito dal Tufo Giallo Napoletano, una roccia vulcanica tenera e porosa. A valle della stazione Garibaldi il tracciato interessa prevalentemente depositi sabbioso-limosi (Figura 3).

Le pozzolane e i tufi presentano una struttura caotica a matrice cineritica e sono spesso separati da uno strato di transizione, generalmente più poroso, denominato "cappellaccio". La parte tufacea più lapidea è interessata da fratture ad andamento subverticale, dette "scarpine", formatesi a seguito del lento raffreddamento della massa piroclastica in corrispondenza delle vie preferenziali di fuoriuscita del gas di cui era inizialmente impregnata. La superficie libera della falda, presso Via Toledo, corre mediamente a quota 4,5 m s.l.m. e tende gradatamente a ridursi approssimandosi alle zone litoranee (2,5 m s.l.m. presso Piazza Garibaldi). L'intero tracciato, abbondantemente al di sotto del livello del mare, risulta quindi sostanzialmente sotto falda con ricoprimenti superiori ai 20 m.

Tale situazione, unita alla presenza di fratture da raffreddamento all'interno dei tufi disposte in maniera casuale, avrebbe potuto rivelarsi potenzialmente pericolosa, in quanto le fratture avrebbero potuto co-

stituire vie preferenziali per flussi d'acqua verso le gallerie in costruzione e mettere in collegamento gli scavi con i superiori orizzonti incoerenti. In funzione della loro apertura e dell'eventuale riempimento possono infatti presentare valori di permeabilità di uno o due ordini di

grandezza superiori rispetto a quelli caratteristici di ammasso della formazione tufacea. L'elevata velocità di eventuali flussi innescati dallo scavo avrebbe potuto innescare fenomeni di trascinalimento e di sifonamento di materiale solido proveniente dagli strati superiori incoerenti, con amplificazione del rischio di risentimenti a piano campagna. Nel tratto di attraversamento dei depositi sciolti alle spalle della stazione centrale, lo scavo è stato caratterizzato dalle tipiche problematiche di un ammasso a fronte instabile. Le sabbie si presentano infatti sciolte o poco addensate e sotto elevati battenti d'acqua, soggette quindi anche all'azione destabilizzante di flussi d'acqua verso il fronte di scavo indotti dal detensionamento del fronte-nucleo di avanzamento. In virtù del debole gradiente di livello tra l'entroterra e la linea di costa, l'acqua si muove con velocità di permeazione ridotte all'interno dei terreni superficiali, che sono caratterizzati da una permeabilità maggiore di quella del substrato tufaceo. La permeabilità primaria di quest'ultimo è bassa, ma in realtà le prove condotte e le lavorazioni in corso hanno dimostrato come sia presente una permeabilità in grande più elevata, comparabile a quella dello strato superficiale e strettamente connessa al grado di fatturazione.

## L'approccio progettuale

L'approccio adottato si è basato sul metodo ADECO-RS (P. Lunardi, 1994-1996).

In considerazione del particolare ambito in cui viene realizzata l'opera, nella fase conoscitiva l'attenzione è stata posta non solo alla caratterizzazione del terreno ma anche del contesto urbano, intesa come definizione geometrica delle potenziali interferenze, anche indirette, con le pre-esistenze. Sulla base delle risultanze di tale caratterizzazione, nell'ambito della fase di diagnosi è stata analizzata la risposta deformativa del fronte di scavo-nucleo di avanzamento e del cavo, avendo quale finalità quella di individuare tipologie ed entità delle deformazioni attese, le manifestazioni di instabilità collegate e i carichi mobilitati dallo scavo. E' evidente l'importanza che in tale fase di analisi debba venire posta alla valutazione dei possibili fenomeni di subsidenza indotti a piano campagna, potenziale fattore di rischio nei riguardi delle pre-esistenze.

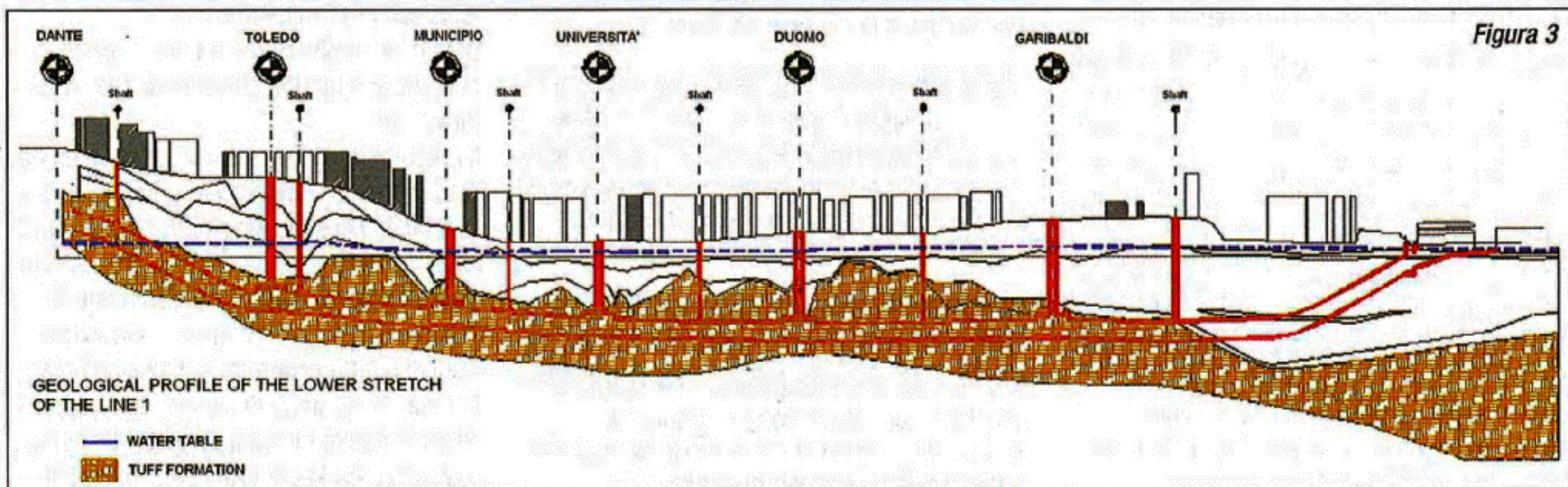


Figura 3