

# METROPOLITANA DI NAPOLI - LINEA 1 – IL TRATTAMENTO DI CONGELAMENTO DI POZZO GARIBALDI

Balossi Restelli A., Cavagna B., Pettinaroli A.

\* Studio Ing. A. Balossi Restelli

\*\* Napoli Metro Engineering

## SOMMARIO

La stazione Garibaldi della Metropolitana di Napoli, costituita da un pozzo centrale e da 4 gallerie di banchina scavate con sistema tradizionale, è stata la prima ad essere affrontata in una situazione geoidrologica assai severa. Hanno reso difficili gli scavi delle gallerie: il forte battente di falda (oltre 20 m in chiave calotta), la velocità dei flussi di falda in movimento, i cavi affondati nel tufo di base, ma appena al di sotto delle pozzolane di scarsa densità e cariche di acqua, la presenza nel tufo di fratture di scorrimento verticali (“scarpine”), infine la lunghezza di 50 m delle tratte di galleria. Per il consolidamento e l’impermeabilizzazione dei cavi si è optato per un trattamento di congelamento. In questo elaborato si descrive l’evoluzione delle varie fasi operative relative alla prima tratta sperimentale e le criticità che si sono dovute superare per una corretta messa a punto della tecnologia. Gli autori illustrano come il congelamento con salamoia non sia stato in grado di fornire al guscio congelato l’omogeneità e lo spessore necessario per uno scavo sicuro e come sia stato necessario l’utilizzo dell’azoto liquido per la fase di congelamento, seguito dalla salamoia nella fase di mantenimento.

Parole chiave: congelamento, salamoia, azoto liquido, tufo, perforazioni guidate

## 1 GENERALITÀ

La stazione della metropolitana di Napoli, denominata “stazione Garibaldi”, è costituita da un grande pozzo di servizio, posto nella sua zona centrale, e da 4 tronchi di galleria che da esso si dipartono, rispettivamente 2 diretti verso la stazione Duomo e 2 verso il Centro Direzionale.

Le dimensioni del pozzo centrale, sostenuto da paratie in c.a. tirantate e da puntoni, sono di 19m x 44m all’incirca e la sua profondità di 44m dal piano campagna.

La dimensione di ciascuna galleria di banchina è di 11m di larghezza e 9,50m di altezza e la profondità degli archi rovesci rispetto al piano campagna è di 42m all’incirca.

Si riportano in figura 1 la planimetria della stazione ed in figura 2 la sezione longitudinale di una delle gallerie di banchina. Il battente di falda al momento degli scavi era di circa 20m sopra chiave calotta.

I due scudi provenienti dal Centro Direzionale sarebbero stati fatti traslare, una volta ultimata l’esecuzione in tradizionale dei quattro tronchi di galleria allargata di stazione, all’interno degli stessi e spinti fino al pozzo Garibaldi.

Qui sarebbero stati oggetto di una radicale revisione prima di immergersi nuovamente all’interno dei due tron-

chi di gallerie allargate verso settentrione ed al fondo delle stesse avrebbero ripreso a scavare verso la successiva stazione Duomo.

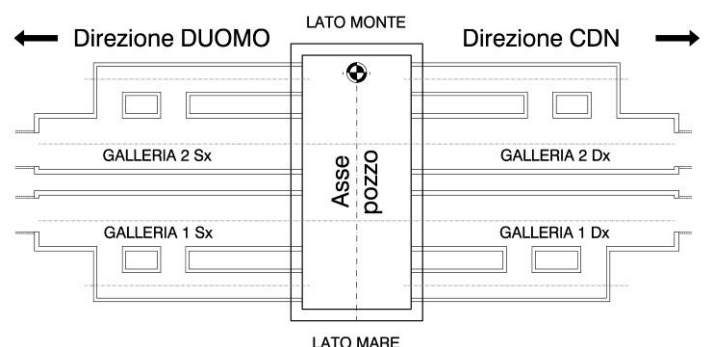


Figura 1. Planimetria della stazione Garibaldi

In questa relazione vengono descritte, per la prima galleria eseguita (1DX), le fasi della messa a punto delle operazioni di congelamento del terreno, che hanno consentito di scavare sotto battente in condizioni assai difficili.

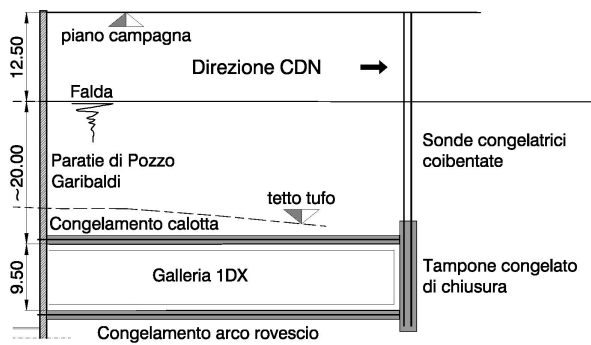


Figura 2. Sezione longitudinale lungo una delle gallerie di banchina

## 2 IL TERRENO ATTORNO ALLE GALLERIE E LA SCELTA DELLA METODOLOGIA DI PROTEZIONE DEGLI SCAVI

La situazione idrogeologica nell'intorno del pozzo Garibaldi è apparsa fin dai primi sondaggi assai critica nei confronti dell'esecuzione degli scavi, tanto che per assicurare il loro procedere con la necessaria sicurezza si sono dovute impiegare metodologie insolite. La stratigrafia del terreno si presentava come segue: alla base ad una profondità di 28m circa dal piano campagna presenza di una importante formazione di tufo vulcanico di buona consistenza e bassa permeabilità, ma la cui omogeneità era interrotta da fenditure di scorrimento subverticali (le cosiddette "scarpine") caratterizzate da notevole grado di permeabilità; al di sopra del tufo, presenza di una formazione di pozzolane di scarsa consistenza ed alta permeabilità; in sommità terreno di riporto di limitato spessore. Appariva determinante la presenza della falda freatica a 12,50 m circa dal piano campagna per cui, come già detto, il battente sopra la chiave delle calotte delle gallerie da scavare risultava di ben 20m. La falda inoltre era caratterizzata da un movimento Est-Ovest, cioè dalla zona collinosa della città verso il mare, con una velocità non trascurabile: la temperatura dell'acqua di falda si aggirava mediamente attorno a 16°C. Dopo attenta disamina delle varie tecnologie possibili, ci si è decisamente orientati verso il congelamento tutt'attorno agli scavi quale unica risorsa per superare questa situazione, garantendo sia il grado di consolidamento necessario per la stabilità dei cavi, sia una omogenea impermeabilizzazione delle pareti degli scavi stessi.

## 3 IL CONGELAMENTO DEL TERRENO

Già erano stati eseguiti interventi di congelamento in Italia (vedi cantiere dell'Autostrada del Brennero a Fortezza, dell'autostrada Udine-Tarvisio a Pontebba, della MM3 di Milano alla Crocetta ed altri), ma mai in condizioni così severe e con sonde congelatrici così lunghe (~50m ognuna). Anche la gestione del congelamento ha comportato attenzioni particolari e monitoraggi continui di vario tipo. Nel seguito si descrivono le criticità che si sono dovute affrontare e superare durante il congela-

mento della prima galleria eseguita, la 1DX considerata di prova per la messa a punto definitiva della metodologia. Qualche correzione ha dovuto essere adottata rispetto a quanto previsto al momento della progettazione iniziale.

## 4 LA GEOMETRIA DEL TRATTAMENTO E LE CARATTERISTICHE PROGETTUALI INIZIALI

La scelta progettuale originale è stata quella di congelare in un'unica fase tutta la tratta di ciascuna galleria di banchina e cioè trattare il terreno per una lunghezza di 50 m all'incirca; allora era stato previsto il congelamento solamente attorno alla calotta ed ai piedritti, perché l'arco rovescio si riteneva fosse sufficientemente immerso nel tufo. La figura n°3 riporta la disposizione delle sonde congelatrici e termometriche attorno alla galleria 1DX.

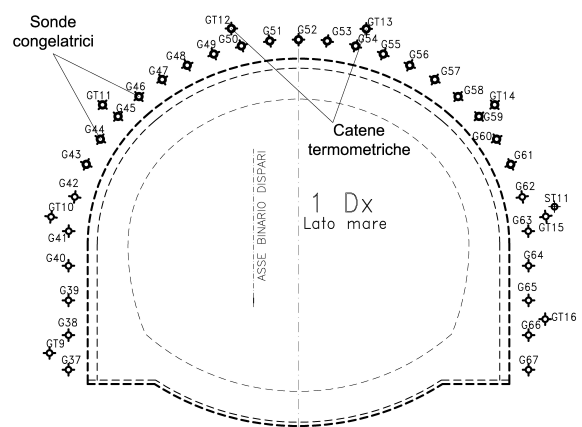


Figura 3. Disposizione delle sonde congelatrici e delle sonde termometriche GT previste dal progetto iniziale

Come è noto le frigorie si diffondono nel terreno in modo omogeneo secondo isoterme concentriche aventi al centro la fonte criogenica, ossia la sonda congelatrice. La formazione di un "muro congelato" di un certo spessore e continuità dipende dall'interasse delle sonde che deve mantenersi il più possibile pari a quello di progetto, altrimenti la consistenza e lo spessore del muro stesso possono non raggiungere quei valori previsti per garantire i gradi di consolidamento e di impermeabilizzazione necessari o addirittura possono verificarsi dei vuoti di congelamento incolmabili anche dopo un periodo di mantenimento prolungato nel tempo: da cui alti costi e soprattutto inevitabili importanti venute d'acqua nel corso degli scavi. Da quanto sopra si può capire quanto sia determinante per la buona riuscita dell'operazione impedire che le sonde congelatrici devino dal loro percorso di progetto. In altre parole le deviazioni delle perforazioni devono risultare le minime possibili: l'obiettivo finale è che, anche nelle zone più lontane dal fronte di perforazione (50 m dal pozzo), le sonde congelatrici non si discostino fra loro, se non di piccole entità, nell'ordine del 12%÷15% dell'interasse: ad esempio per interasse di 60 cm la deviazione massima deve essere contenuta in 9 cm. Questi piccoli scostamenti vengo-

no compensati nel corso del congelamento perché, per una buona consistenza del muro di congelamento, la temperatura da raggiungere nel terreno è ben inferiore a 0 °C, ma deve essere almeno pari a -5÷-9 °C, per cui le isoterme circolari che si irradiano dalle sonde congelatrici tendono a compenetrarsi fra loro (al di sotto dello 0 °C) durante la fase di congelamento. Inoltre, durante la fase di mantenimento, si innesca un fenomeno di migrazione di frigorie dalle zone più fredde a quelle appena al di sotto dello zero termico, una sorta di compensazione criogenica per cui il “muro” di terreno congelato tende ad avere uno spessore uniforme. Nel caso in esame, data la lunghezza delle canne congelatrici, il problema delle deviazioni ha avuto un peso determinante ed ha potuto essere in gran parte superato con l'adozione del sistema delle perforazioni guidate messo a punto dall'Impresa specialistica Trevi. E' stato così possibile correggere le deviazioni dal percorso teorico di progetto mano mano con l'approfondirsi delle perforazioni fino alla sua massima estensione di 50m dal pozzo. Il progetto originario aveva considerato: una sola corona di sonde congelatrici tutt'attorno a calotta e piedritti delle gallerie; un interasse finale delle sonde pari a 60 cm; diametro delle sonde esterne di Ø 2" e del tubo interno di Ø ¾"; l'utilizzo di acciai normali; una distanza media delle sonde dal filo dello scavo di 60 cm all'incirca; una decina di tubi termometrici con 11 sensori (T1÷T11) distanziati di 5m fra loro, al limite esterno del muro congelato (50 cm circa dall'asse); congelamento a ciclo chiuso con salamoia (temperatura media -28 °C) raffreddata da 3 gruppi frigoriferi; esecuzione di uno schermo congelato eseguito da piano campagna con l'inserimento di canne congelatrici da verticali a subverticali sulla testata di ciascuna delle 4 gal-

lerie di banchina, congelamento da mantenersi attivo fino all'arrivo delle macchine fresanti.

## 5 LA PRIMA FASE DEL CONGELAMENTO (CON SALAMOIA) DELLA GALLERIA DI BANCHINA DI VALLE LATO CENTRO DIREZIONALE (1DX)

Il congelamento con salamoia è iniziato a partire dalla galleria 1DX il 19 ottobre del 2004.

Dopo molte settimane di assestamento, nel corso delle quali la salamoia ha raggiunto una sorta di temperatura di regime (entrata nel circuito attorno ai -25°C e ritorno attorno ai -15°C), si è constatato che il quantitativo criogenico pompato nel circuito non era in grado di superare certe soglie limite e quindi di contrastare in modo adeguato i quantitativi di calore che i flussi della falda in movimento apportavano nella porzione di terreno da congelare.

Come si può notare sulla figura n. 4, dove sono riportati i diagrammi delle temperature rilevate mano mano alle varie profondità dalle celle termometriche (posizionate ogni 5m lungo la tratta), malgrado il flusso continuo di fluido frigorifero, in alcune zone la temperatura del terreno ha raggiunto lo 0°C solamente dopo 2 mesi di congelamento (17 dicembre 2004) con salamoia.

La figura 4 è relativa alla catena termometrica GT10 (rene sinistro di calotta), ma la situazione in calotta e sui piedritti risultava peggiore in molte altre zone. La visione globale dei diagrammi evidenzia la lentezza del congelamento con salamoia e la situazione di stallo intervenuto a partire dalla fine di dicembre 2004.

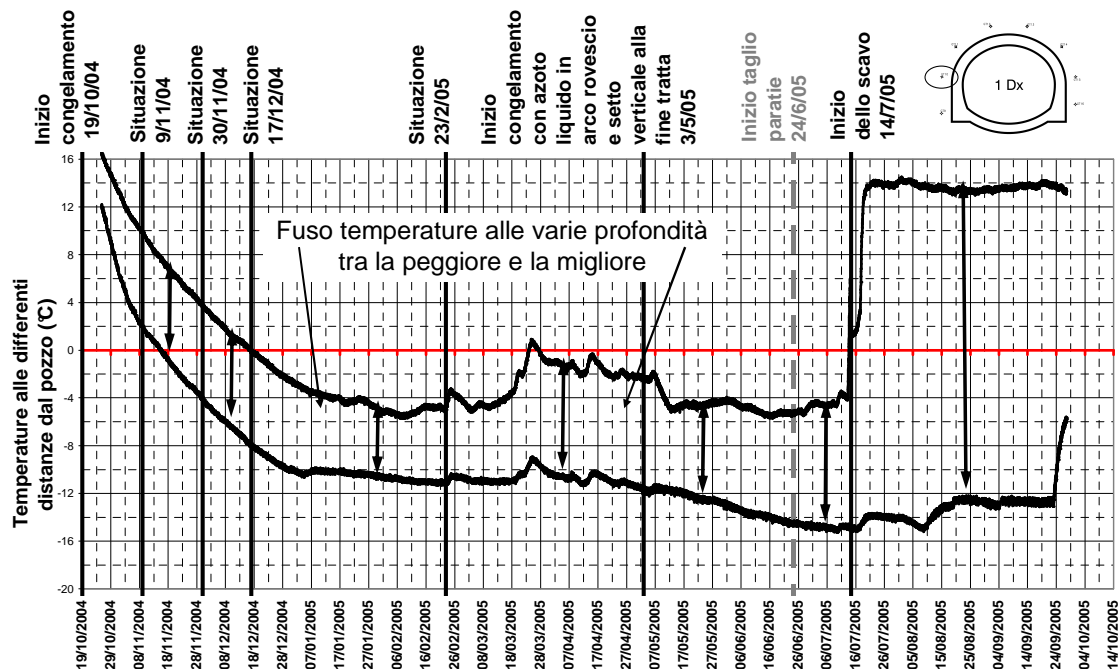


Figura 4. Galleria 1DX. Andamento nel tempo delle temperature rilevate dalla catena GT10 (rene di calotta sinistro) alle differenti distanze dal pozzo

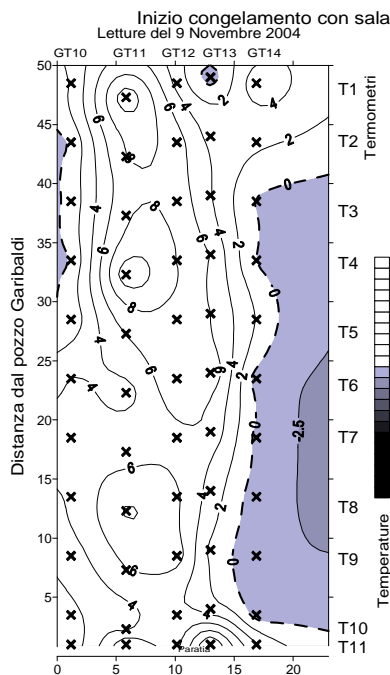


Figura 5. Situazione al 9/11/04

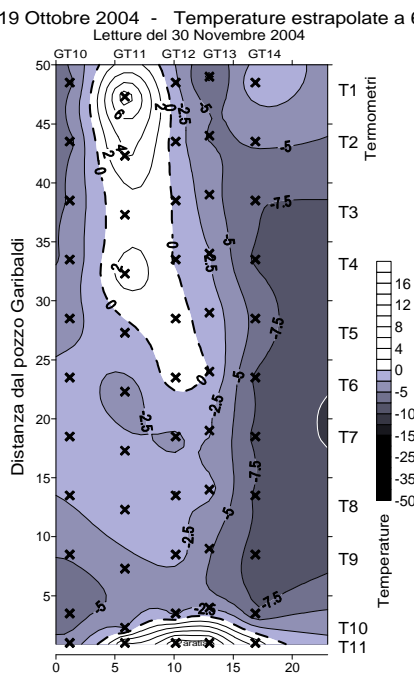


Figura 6. Situazione al 30/11/04

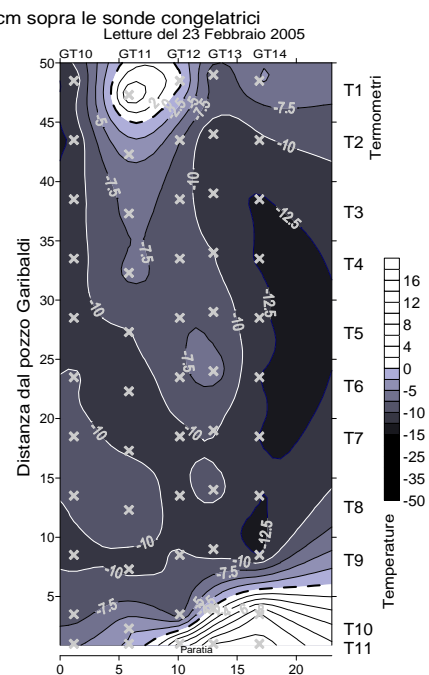


Figura 7. Situazione al 23/2/05

Nelle figure nn° 5, 6, 7 sono esposte le curve isoterme lungo la calotta ed i piedritti estrapolate a 60 cm di distanza sopra l'asse delle sonde congelatrici, ossia sul lembo esterno del muro di congelamento in via di formazione (lo spessore congelato a  $-10^{\circ}\text{C}$  avrebbe dovuto raggiungere (60 cm + 60 cm) 1,20 m. La figura n° 5 riporta la situazione dopo 21 giorni di congelamento. Come di può notare le temperature sono pressoché tutte sopra lo  $0^{\circ}\text{C}$ . La figura n° 6 riporta la situazione dopo 42 giorni di congelamento. Le temperature sono scese in modo discontinuo: sopra lo  $0^{\circ}\text{C}$  si notano ampie zone di calotta tra i 25 m ed i 50 m di profondità ed a ridosso delle paratie. La figura n° 7 riporta la situazione a 4 mesi dall'inizio del congelamento. La situazione presenta ancora zone sopra lo  $0^{\circ}\text{C}$  in calotta verso la fine della tratta e sempre ancora a ridosso delle paratie. Si conferma quindi ancora una volta il limite frigorico conseguito con la salamoia. Nel dicembre 2004 è stato deciso il riesame di tutte le operazioni di congelamento.

## 6 IL RIESAME DEL TRATTAMENTO DI CONGELAMENTO E L'INTRODUZIONE DELL'AZOTO LIQUIDO

A questo punto è iniziato l'esame critico della situazione prendendo in considerazione tutti i dati emersi durante la prima fase ed intraprendendo qualche ulteriore sperimentazione. Innanzitutto le perforazioni guidate per il posizionamento delle sonde congelatrici hanno consentito di eseguire, osservando il tipo di terreno fuoriuscito assieme al fluido di perforazione, una mappatura assai precisa dei tipi di formazioni attraversate. Informazioni preziose che hanno evidenziato come la linea sommitale della formazione dei tufi di base fosse più profonda di quanto previsto dal progetto iniziale o perlomeno presentasse degli avvallamenti (proba-

bilmente sfuggiti ai sondaggi preliminari), tali per cui le pozzolane superiori venivano ad interessare o essere molto vicine alle calotte. Questo fatto è stato ritenuto di notevole importanza in funzione della riuscita del congelamento. Infatti è noto, ed ampiamente sperimentato in altri cantieri (avvallato pure da prove di laboratorio), come le frigorifiche migrino con grande facilità nei terreni di maggiore densità, mentre la loro diffusione sia più lenta con raggi d'azione ben più limitati nelle formazioni di terreni fini o finissimi (limi e argille), caratterizzati inoltre da bassa densità e con notevoli quantitativi di acqua libera, così come nelle pozzolane in questione. In questi casi è prudente ridurre gli interassi delle sonde congelatrici oppure prevedere una doppia coronella di sonde disposte a quinconce. Nella zona centrale della galleria lato mare, dopo un lungo periodo di congelamento con salamoia, è stato eseguito un foro di controllo di 35 m di lunghezza. In fase di avanzamento ogni 2,50 m è stata misurata la portata d'acqua a bocca foro.

Il diagramma di figura n. 8 mostra come immediatamente a ridosso della parte posteriore delle paratie già vi fosse una notevole venuta d'acqua di oltre 6 lt/sec, a salire per i primi 5 m fino ad oltre 10 lt/sec; successivamente non si sono notati ulteriori apporti di acqua fino a 20 m, dove si è notato un incremento di portata che ha raggiunto i 13 lt/sec, poi nessun aumento fino a 35 m. Si sono così evidenziati due fenomeni che sono stati ritenuti meritevoli di attenzione: l'uno, un flusso d'acqua nei primi metri dietro le paratie, dove la formazione di tufo ha certamente subito decompressione durante lo scavo dei diaframmi, facendo aumentare in profondità nei tufi il carico della falda, l'altro, a 20 m la probabile presenza di una "scarpina" che ha incrementato la circolazione di acqua a metà circa della tratta. Entrambi questi fenomeni hanno ostacolato in modo decisivo la formazione del muro di ghiaccio (così come mostrano i diagrammi delle sonde termometriche di figura n. 4).

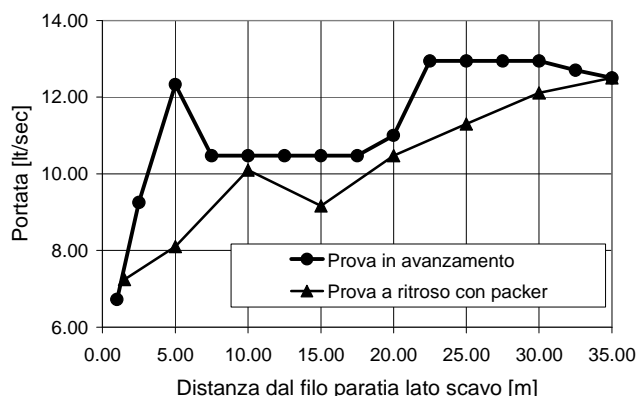


Figura 8. Foro di controllo delle venute d'acqua in asse galleria 1DX (zona centrale sopra arco rovescio). Fine dicembre 2004

In conclusione si è potuto attribuire la disomogeneità del congelamento e la sua condizione di "stallo" (impossibilità di maggiore espansione dei raggi d'azione delle isoterme inferiori allo zero, contrastate dall' "attacco" delle calorie apportate dalla falda) alle seguenti motivazioni principali: flussi della falda in movimento con una notevole velocità e conseguente inadeguatezza della temperatura minima ottenibile dal fluido frigorifero ( $-28^{\circ}\text{C}$ ) per l'ottenimento di raggi d'azione compenetrati fra loro delle isoterme inferiori allo zero termico; nelle zone di calotta, interessate dalle pozzolane, ancora maggiori difficoltà di diffusione delle frigorifiche a causa della scarsa densità del terreno da congelare. A questo punto l'unica soluzione per risolvere il problema era l'adozione del congelamento con azoto liquido in aiuto alla salamoia e questo nei punti più delicati. La figura n° 9 riporta per le gallerie 1DX e 2DX gli interventi aggiuntivi adottati dopo il riesame effettuato e precisamente: la realiz-

zazione di una seconda coronella di sonde congelatrici nella zona di calotta della galleria 2DX, laddove si era constatata la presenza di pozzolane appena sopra la chiave calotta; una serie di iniezioni cementizie di contatto che interessassero i primi metri oltre le paratie della galleria 2DX allo scopo di ricomprimere i primi 5÷6 m di quella formazione tufacea che aveva evidenziato un notevole e concentrato scorrimento d'acqua; la chiusura del congelamento anche in arco rovescio con la predisposizione di sonde congelatrici di acciaio a basso tenore di carbonio per la circolazione di azoto liquido; attorno alla 1DX la realizzazione di 3 nuove colonne termometriche GT16bis, GT17bis, GT18bis, tutte in arco rovescio.

## 7 QUALCHE CONSIDERAZIONE SUL SISTEMA DI CONGELAMENTO CON AZOTO LIQUIDO

La temperatura dell'azoto liquido è pari a  $-196^{\circ}\text{C}$  ed il suo trasporto in cantiere avviene tramite autocisterne nelle quali è mantenuto ad una pressione di 2 atmosfere.

Ricordiamo che la sua capacità criogenica, cessione di frigorifiche al terreno tramite le sonde congelatrici, dipende solo parzialmente dalla sua bassa temperatura, ma in grande misura dal cambiamento di stato da liquido a gassoso, che comporta un aumento di volume pari a 700 volte. All'inizio della fase di congelamento l'azoto si mantiene liquido lungo la tubazione di mandata bene coibentata; non appena l'azoto raggiunge la prima sonda congelatrice ed è investito dal calore del terreno si determina il cambiamento di stato e relativa cessione di grande quantità di frigorifiche all'intorno. Il gas prodotto percorre la sonda esterna e, tramite il tubo coassiale interno, ritorna alla testata speciale e viene espulso in sommità pozzo.

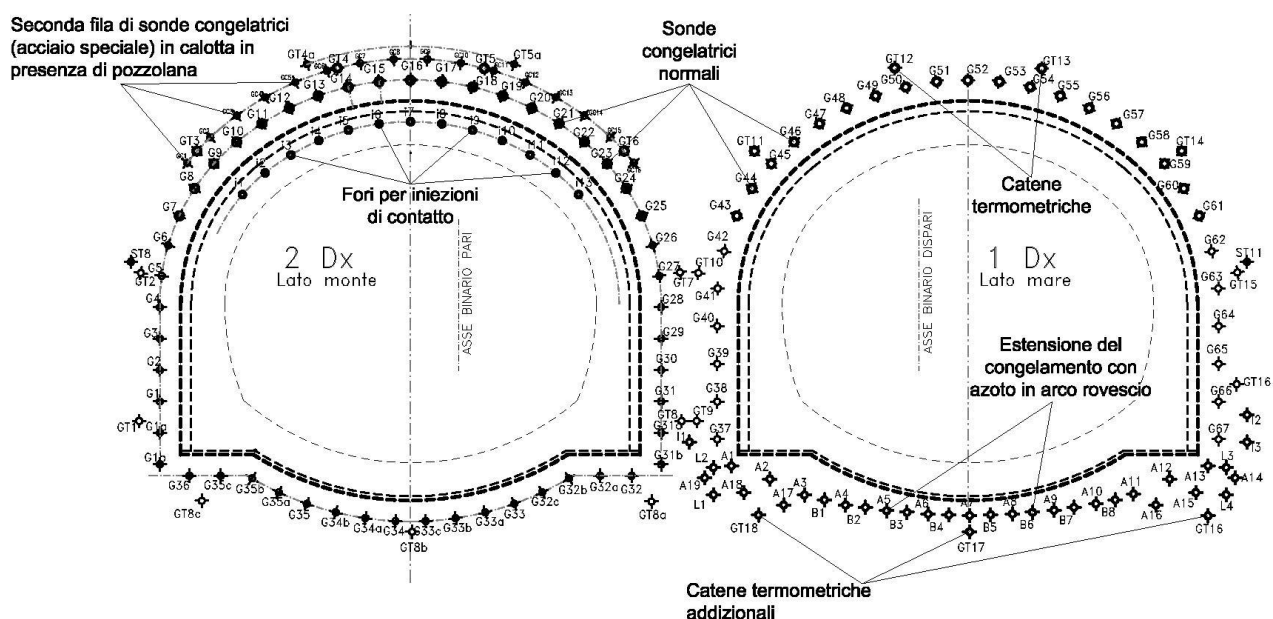


Figura 9. La disposizione delle sonde congelatrici e delle catene termometriche dopo il riesame della situazione

Il procedimento è evolutivo nel tempo e così il punto di cambiamento di stato si sposta continuamente verso la parte più profonda della sonda congelatrice perché all'indietro trova terreno a sempre più bassa temperatura. La temperatura del gas di scarico deve essere sempre monitorata con attenzione; essa tende a diminuire mano mano con la graduale formazione del muro di ghiaccio. In condizioni normali lo spessore del muro con temperature  $\leq -8^{\circ}\text{C} \div -10^{\circ}\text{C}$  è pari ad 1,20 m e si ottiene in 2-3 giorni. Questo nell'ipotesi che le sonde abbiano un interasse di 60 cm (max 70 cm) e che le condizioni all'intorno delle sonde siano le più idonee e soprattutto con un quantitativo di acqua libera trascurabile. La formazione di ghiaccio "puro" ostacola la diffusione delle frigorie. Di qui l'importanza di riempire il meglio possibile l'intercapedine tra il terreno decompresso dalla perforazione e la sonda congelatrice.

Nel caso in esame sono subentrati fenomeni turbativi, imputabili soprattutto alla falda in movimento ed alle differenti situazioni dei terreni più o meno densi incontrati, che hanno rallentato le operazioni ed hanno richiesto maggiori quantitativi di azoto rispetto ai consumi normali. Le evoluzioni degli abbassamenti di temperatura nelle varie sezioni di galleria da congelare devono essere costantemente monitorate e costituiscono la guida fondamentale per le non semplici manovre di regolazione dei flussi di azoto da immettere nelle singole sonde congelatrici. L'obiettivo finale deve essere una porzione di terreno congelato tutt'attorno al futuro scavo della galleria, di spessore (1,20m) omogeneo e di temperatura media che si aggiri attorno ai  $-5 \div -8^{\circ}\text{C}$  e questo per garantire uno scavo sicuro, sia dal punto di vista della impermeabilizzazione che del consolidamento.

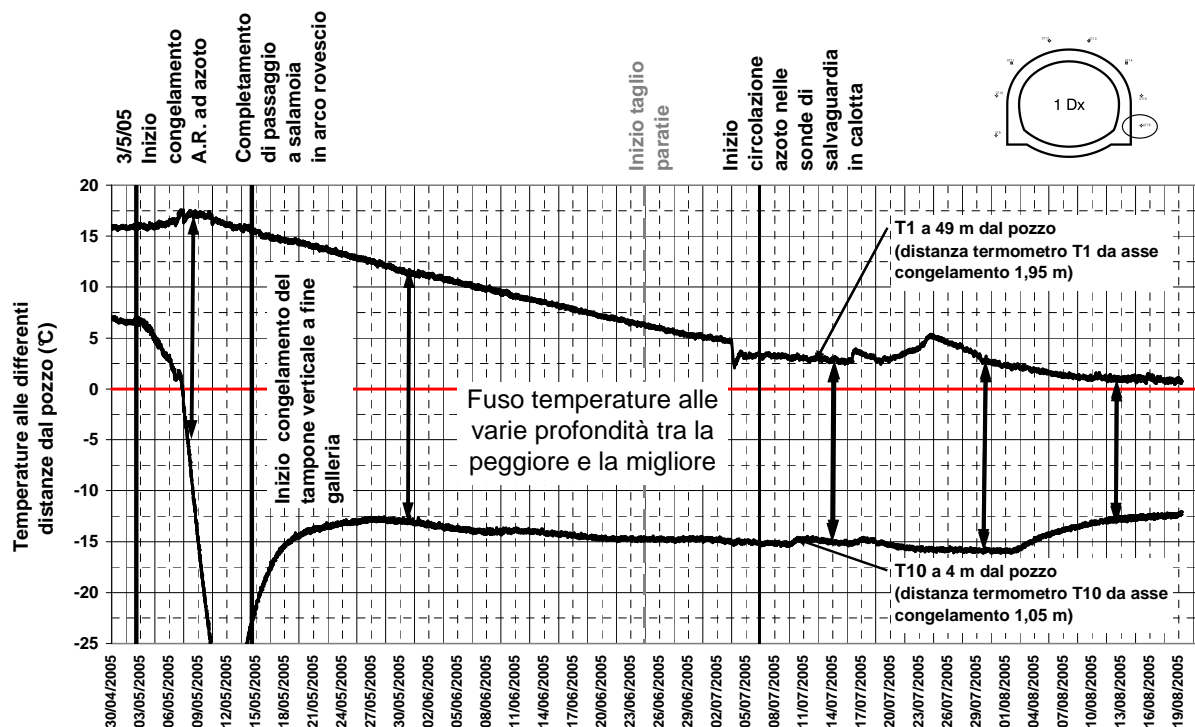


Figura 10. Galleria 1DX. Andamento nel tempo delle temperature rilevate dalla catena GT16bis (all'esterno di valle dell'arco rovescio) alle differenti distanze dal pozzo

## 8 IL DECORSO DEL CONGELAMENTO MISTO CON AZOTO E SALAMOIA DELLA GALLERIA SPERIMENTALE 1DX

La figura n. 9 riporta la disposizione delle sonde congelatrici e delle catene termometriche relative alla galleria in questione. A seguito del riesame critico della situazione di stallo del congelamento con salamoia intervenuto nella galleria, sono state apportate le modifiche integrative elencate in fondo al paragrafo 6. Il giorno 3/5/2005 è iniziata la fase di congelamento con azoto liquido alla base della galleria, coinvolgendo tutte le nuove sonde, mentre continuava la salamoia in calotta e piedritti. In quel momento la situazione delle temperature del terreno attorno alla galle-

ria, ottenuta precedentemente dopo il lungo periodo di circolazione della salamoia in calotta e piedritti, era rimasta circa uguale a quanto mostrato nella figura n° 7. I diagrammi temperatura/tempo riportano le complesse operazioni che si sono susseguite nel tempo in zone rappresentative differenti, ad esempio la figura n. 10 espone l'evoluzione delle temperature ottenute sulla destra dell'arco rovescio, sotto il controllo della catena termometrica GT16bis. Al centro dell'arco ed alla sua sinistra l'andamento è simile rispettivamente per le catene GT17bis e GT18bis. I fasci di diagrammi di ogni zona sono stati compresi in un "fuso" delimitato dall'andamento della temperatura sia alla distanza dal pozzo dove ha raggiunto i valori più bassi, che a quella dove si sono registra-



te la temperature più alte. Nel fuso è riportata la situazione lungo tutta la tratta di 50 m e precisamente T1 a 49 m (prossima al termine della futura stazione), T2 a 44 m, T3 a 39 m, T4 a 34 m, T5 a 29 m, T6 a 24 m, T7 a 19 m, T8 a 14 m, T9 a 9 m, T10 a 4 m, T11 a 1 m (appena al di là della paratia del pozzo). Seguendo nel tempo i vari diagrammi si ha una idea di quanto avvenuto nel terreno attorno alla calotta, piedritti ed arco rovescio della galleria in questione. L'azoto liquido, fatto circolare in tutte le sonde di arco rovescio a partire, come si è detto, dal 3 maggio 2005 e fatto circolare dopo poco tempo (14/5/2005) anche nelle sonde verticali del setto di congelamento del tampone di testa di 3 m di spessore (4 file), ha decisamente colmato le carenze precedenti fornendo a tutto il guscio di terreno congelato attorno alla tratta da scavare lo spessore medio di 1,20 m, raggiungendo quindi l'obiettivo di avere tutto ben al di sotto dello 0°C. In due zone, a fine tratta ed a ridosso delle paratie, la temperatura di -2,5°C evidenziava tuttavia una certa debolezza del muro congelato. La figura n° 11 riporta la situazione delle temperature (a 60 cm dall'asse di congelamento) raggiunte il 20 giugno 2005, appena prima dell'inizio degli scavi. Si può anche notare come l'azoto immesso solamente in arco rovescio e nel tampone di fondo abbia originato una discesa delle temperature anche nella zona di calotta e piedritti, interessati da sola salamoia. Come già accennato più sopra, l'azoto utilizzato per la sola fase di congelamento è stato mano mano sostituito dalla reimmissione della salamoia per la fase di mantenimento: e così le sonde ad azoto in arco rovescio sono state riportate a salamoia, dai due estremi laterali di destra e di sinistra verso la chiave centrale dell'arco, nel periodo dal 10 maggio al 14 maggio 2005 e cioè mediamente dopo una decina di giorni dall'inizio. La figura n. 10 riporta le temperature della catena termometrica GT16bis (alla base del piedritto lato mare) alle varie profondità, anche successivamente alla reimmissione della salamoia (dopo il "colpo" di azoto). Malgrado alcuni incidenti di percorso tra i quali alcune rotture di sonde congelatrici (canocchialate con nuove tubazioni e temporanea ripresa dell'azoto in queste stesse sonde per una ricostituzione adeguata del congelamento danneggiato), le temperature si sono stabilizzate in alcune zone a valori tra i -10 °C ed i -15 °C ed addirittura hanno continuato a scendere alle altre progressive, dove la diffusione di frigorie è risultata più lenta. Si è così giunti al taglio delle paratie avvenuto a partire dal 24 giugno 2005. A questo punto sembra utile rimarcare che, essendosi accumulato qualche ritardo nel programma dei lavori a causa delle problematiche descritte, si è eseguito il tentativo di iniziare lo scavo con ancora un paio di zone con spessore limitato di congelamento. Dobbiamo dire inoltre che al momento dell'inizio del taglio delle paratie, sempre osservando la figura n. 10, le temperature ad alcune progressive evidenziavano valori al di sopra dello zero (ad esempio la T1 a progr. 49 m era +6 °C, la T2 a progr. 44 m era +5 °C). Questo fatto non ha tuttavia impedito il taglio delle paratie in quanto le due celle di rilevamento della temperatura erano distanti dall'asse di congelamento (sonde congelatrici) rispettivamente 1,95 m e 1,86 m.

Di conseguenza, considerando la curva di diffusione delle frigorie di figura n. 12 si può notare come anche in quelle 2 zone, a 60 cm dall'asse, la temperatura risultasse ben inferiore allo 0 °C e quindi lo spessore voluto del muro di congelamento di 1,20 m fosse stato conseguito.

Ragionamenti simili sulle altre catene termometriche hanno determinato la decisione di affrontare lo scavo, pur sapendo di dovere essere pronti ad interventi puntuali di rimagliatura del congelamento.

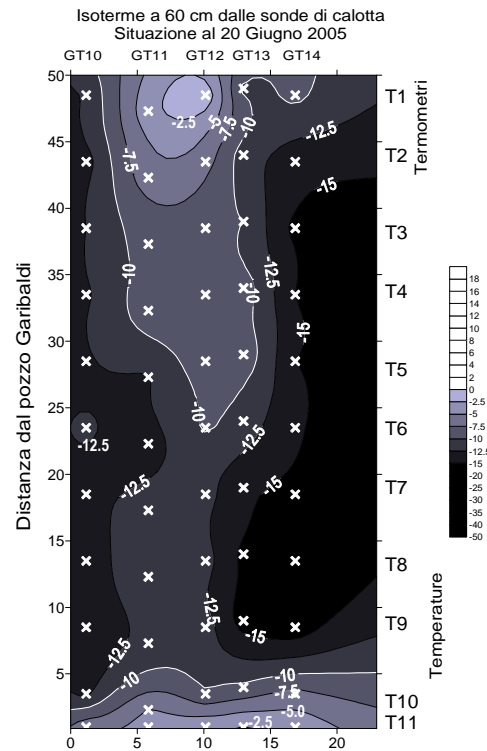


Figura 11. Situazione delle temperature a 60 cm dalle sonde di calotta e di piedritti al 20 giugno 2005 (inizio taglio paratie 24/6/05)

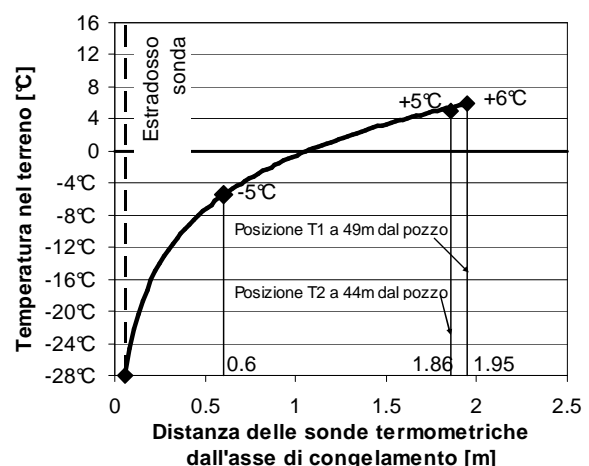


Figura 12. Curva di diffusione delle frigorie apportate al terreno dalla salamoia pompata a -28°C. Temperatura raggiunta nel terreno in funzione della distanza dalla sonda congelatrice (acqua di falda +16°C)

## 9 ANDAMENTO DELLO SCAVO E SUPERAMENTO DELLE SUE FASI CRITICHE

Lo scavo vero e proprio è iniziato il 14 luglio 2005 e subito la zona di debolezza della calotta a ridosso delle paratie è stata interessata da notevoli venute d'acqua, che si sono estese mano mano nel periodo successivo all'incirca fino alla progressiva 38. Le venute d'acqua sono state raccolte con un sistema di tubi captatori e concentrate in punti singolari in modo che fosse consentita l'esecuzione del prerivestimento: posa delle centine, dello spritz-beton armato con rete e dell'impermeabilizzazione. La debolezza del muro congelato a ridosso delle paratie era esaltata anche dalle conseguenze di una filtrazione di acqua attraverso il setto verticale all'estremità della tratta, che ostacolava la rimagliatura del muro congelato. Questa venuta risultava concentrata nella parte centrale della galleria e quindi l'acqua fluiva al centro della tratta verso il pozzo al di sotto della calotta. Il muro congelato non ha risentito di questo fenomeno nella parte terminale (punti di misura T1 e T2 oltre progr. 40 all'incirca – vedere figura n. 13). Nel corso dello scavo si sono di conseguenza dovute assumere delle misure particolari “di rimagliatura” per

consentire il proseguimento delle varie operazioni in sicurezza. Ancora una volta si è ricorsi all'azoto, questa volta fatto circolare in numerose sonde di calotta e piedritti. La presenza di acciaio normale e non di acciaio a basso tenore di carbonio ha originato, nel corso della “rimagliatura” con azoto in calotta e piedritti della tratta in questione, la rottura di alcune di queste sonde. E' stato allora necessario “canocchialare”, all'interno delle sonde difettose, delle nuove tubazioni attraverso le quali riprendere l'immissione di azoto. Tali manovre hanno determinato tutte quelle anomalie che si possono notare nella parte destra dei diagrammi di temperatura riportati nella figura n. 4 (GT10); l'abbassamento della temperatura del terreno è stato ottenuto con l'azoto ed ha consentito il completamento dello scavo e del rivestimento. L'ultimazione è avvenuta attorno alla fine di ottobre del 2005. Le altre 3 tratte di galleria (2DX, 1SX e 2SX) sono poi state condotte in migliori condizioni ed in tempi più brevi, perché si sono potute attuare preventivamente tutte quelle operazioni migliorative agli impianti ed alla regia di congelamento derivanti dalla esperienza acquisita nel corso della realizzazione della prima tratta sperimentale 1DX.

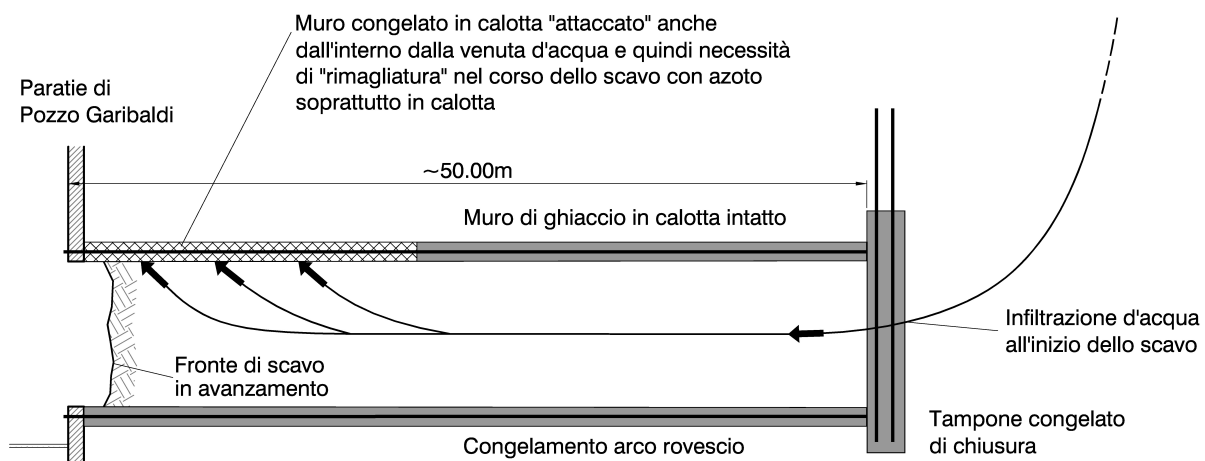


Figura 13. Fenomeno anomalo avvenuto all'inizio dello scavo che ha costretto ad utilizzare azoto liquido in alcune sonde di calotta e piedritti (avendo qui arrestato la salamoia di mantenimento)

## 10 CONCLUSIONI

Dalle vicende legate al congelamento del pozzo Garibaldi della Metropolitana di Napoli si possono trarre alcune conclusioni di notevole interesse che possono guidare i progettisti ed esecutori per una migliore applicazione di questa tecnologia.

Riportiamo qui di seguito i punti principali.

- In condizioni di flussi in movimento della falda, per ottenere un muro di terreno congelato di sufficiente spessore è necessario l'utilizzo del sistema a ciclo aperto con azoto liquido. Nel caso di disponibilità di gruppi frigoriferi, per ridurre i costi, è possibile mantenere il congelamento nel tempo facendo fluire salamoia (a -28 °C all'incirca) nelle stesse sonde congelatrici utilizzate per l'azoto nella fase di congelamento.

- Per l'azoto liquido sono necessari materiali particolari: le sonde devono essere costituite da acciaio a basso tenore di carbonio ed i raccordi tra le varie testate devono essere di rame coibentato con “armaflex” di buon spessore, per ridurre al minimo i consumi e fare avvenire il cambiamento di stato sempre all'interno delle sonde.
- Per tratte lunghe da congelare (nel caso in esame 50 m) è determinante potere “guidare” le perforazioni per le sonde congelatrici ed ugualmente per le catene di rilevamento delle temperature. Le deviazioni ammissibili sono minime. Il sistema di perforazioni guidate messo a punto dall'Impresa Trevi ha funzionato bene. Tuttavia pensiamo che la lunghezza di 50 m debba essere considerata quale limite non superabile con la tecnologia oggi a disposizione.



- In terreni carichi d'acqua e di scarsa densità (tipo le formazioni di limi, argille, pozzolane) è sempre opportuno avere a disposizione una serie di sonde congelatrici disposte a quinconce su due coronelle distinte, così come attuato in corrispondenza della calotta della galleria ( 2DX).
- Il decorso della fase di congelamento deve essere seguito ora per ora, con una attenta rilevazione delle temperature del gas di azoto fuoriuscente da ogni sonda (o dall'ultima di gruppi di sonde collegate in serie) ed accuratissima registrazione delle temperature delle catene termometriche, riportate, se possibile, su diagrammi a "macchie" simili a quelli costruiti nel cantiere di pozzo Garibaldi (figure nn. 5,6 e 7).

Solo così la tecnica del congelamento può risolvere situazioni difficili, con consumi di azoto ridotti allo stretto necessario, tempi contenuti e di conseguenza costi limitati.

Si ringraziano quanti hanno fattivamente collaborato alla realizzazione dell'opera sia in fase progettuale che in corso d'opera: si ringraziano in particolar modo i progettisti di Rocksoil e le Imprese Pizzarotti e Trevi.

## 10 BIBLIOGRAFIA

- Balossi Restelli A., 1971. *Un'applicazione mista d'iniezioni e congelamento con azoto liquido sull'autostrada del Brennero*. L'Industria delle Costruzioni, Nov-Dic
- Balossi Restelli A., 1973. *La tecnica del congelamento dei terreni per risolvere un delicato problema geotecnico sulla S.S. 36*. L'Industria delle Costruzioni, Nov-Dic
- Balossi Restelli A., Profeta M., 1985. *Autostrada Udine-Tarvisio. Trattamenti speciali per fondazioni e difese fluviali*. L'Industria delle Costruzioni. Dic
- 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
- 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

## ABSTRACT

### UNDERGROUND OF NAPLES – FREEZING TREATMENT OF POZZO GARIBALDI

Keywords: freezing, calcium chloride brine, liquid nitrogen, directional drilling, tuff

The "Stazione Garibaldi" of Naples underground consists of a central service shaft, and four portions of tunnels

departing from the bottom of the shaft itself, two of them with direction stazione Duomo and two towards Centro Direzionale. Tunnels' inverts lie at a depth of 42 m under ground level with a water table head of 20 m above the crown. Tunnel's width and height are respectively 11 m and 9,50m. The two TBM coming from the Centro Direzionale were stopped at about 40 m from the South end of Stazione Garibaldi, in order to allow the safe excavation of the two station tunnels executed with a traditional method.

The soil stratigraphy was as follows: at a depth of 25 m a volcanic tuff bedrock of good consistency and low permeability. Its homogeneity was though interested by an irregular pattern of vertical cracks (called "scarpine") marked by a great permeability; above the tuff bedrock, a very inconsistent and permeable "pozzolana" layer was found; at the top, filling material of a low thickness. To allow tunnels' excavations with traditional method, in these critical conditions, soil had to be improved by special treatments able to convert this soft flowing material into a strong, watertight structural shell. The freezing method was chosen.

The freezing of the soil had to face the following problems: the high water temperature of + 16 °C; the water table flow moving with a certain speed from the hills towards the sea; the disconformities of the tuff contact characterized by some depressions so that the saturated pozzolane came into the crown zones of some portions of the tunnels; the high water table head. All this caused the adoption of a peculiar planning and design both of the freezing management and of the freezing pipes spacing.

The first tunnel carried out 1DX served as a test necessary for the final setting up of the methodology to be adopted. In this paper are described the critical points that had to be faced and overcome, sometimes with changes of the original project. The following conclusions were drawn: the freezing calcium chloride brine method was not able to give to the ground enough refrigeration units to form a strong, watertight structural shell. So it was necessary to adopt the liquid nitrogen method during the freezing phase; because of the presence in the tuff of "scarpine", spreading under the invert zones too, it became necessary to extend the freezing under the inverts of the galleries; the proximity of the pozzolana to the crowns of two tunnels portions, made it necessary to increase the thickness of the freezing shell, obtained by two rows of freezing pipes located just around the crowns themselves; the growth of the frozen shell was monitored by temperature sensors located along chains parallel to the freezing pipes (50 m long). The freezing behaviour was followed continuously and carefully by means of isothermal lines of soil temperatures reached at a distance of 1,20 m from extrados of excavation; the freezing length of 50 meters represents today the maximum limit to obtain a safe frozen shell, even if the horizontal directional drilling method, carried out by Trevi Company, gave good results.