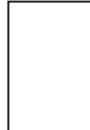


CONVEGNI E CONGRESSI



La progettazione di un intervento di congelamento artificiale dei terreni per i lavori di rifacimento di una galleria esistente: indagini geotecniche, modelli teorici e campi prova sperimentali

Prediction and performance of a ground freezing application to the rehabilitation works of an existing tunnel: geotechnical investigations, numerical modelling and real-scale trial tests

Dott. Ing. Andrea PIGORINI^(*), Alessandra SCIOTTI^(**),
Giorgio ZOPPO^(***), Prof. Ing. Giovanni CALABRESI^(****)

Premessa

La galleria ferroviaria Cassia-Monte Mario, che attraversa il rilievo collinare di Monte Mario, nella parte settentrionale della città di Roma, ha richiesto recentemente interventi di rinforzo strutturale che hanno comportato la demolizione e la ricostruzione dell'arco rovescio. La galleria attraversa terreni eterogenei sotto falda, pertanto, come intervento preventivo alla demolizione dell'arco rovescio esistente, è stata adottata la tecnica del congelamento artificiale dei terreni. L'articolo illustra le fasi salienti dello sviluppo della progettazione che si è basata su modelli teorici, indagini geotecniche e campi prova. La sperimentazione in situ è stata supportata da un completo sistema di monitoraggio automatico per il controllo in tempo reale dell'evoluzione del processo di congelamento del terreno e dei suoi eventuali effetti al contorno. I campi prova hanno fornito un contributo essenziale nella definizione degli aspetti progettuali e realizzativi dell'intervento e l'applicazione del congelamento artificiale ha consentito di portare a termine con successo i lavori di rifacimento dell'arco rovescio.

1. Introduzione

Negli ultimi anni la tecnica del congelamento artificiale dei terreni si è andata sempre più diffondendo anche in Italia, dove importanti applicazioni sono state realizzate nel campo delle opere in sotterraneo: il congelamento, in-

Abstract

The Cassia-Monte Mario railway tunnel, which runs through a hill in the northern part of Rome (Italy), has required invert demolition and reconstruction. The tunnel crosses heterogeneous sandy and silty soils below the water table. In order to prevent the ingress of water, the ground freezing technique was applied. The paper describes the design predictions based on simplified thermal analyses, laboratory tests and real-scale trial fields which were performed to integrate and validate the design predictions. Field tests were supported by automatic monitoring system implemented to measure the temperatures in the ground and deformation effects induced by freezing on the lining. The paper focuses on the role played by field tests which gave a decisive contribution to the correct and effective planning of the execution phase. This allowed to reach a better insight into the application of the ground freezing for underground works.

1. Introduction

In the last years ground freezing application to tunnelling is largely spreading in Italy in response to problems due to groundwater conditions: frozen soil provides a strong watertight barrier allowing the excavation to safely proceed (e.g. Ref. [1], [2]).

(^{*}) Italfer - Direzione Tecnica, Responsabile UO Gallerie

(^{**}) Italfer - Direzione Tecnica, UO Gallerie, Capo Settore Progettazione geotecnica applicata alle gallerie

(^{***}) ex Italfer - Direzione Tecnica, UO Gallerie

(^{****}) Consulente geotecnico

(^{*}) Italfer - Direzione Tecnica, Responsabile UO Gallerie

(^{**}) Italfer - Direzione Tecnica, UO Gallerie, Capo Settore Progettazione geotecnica applicata alle gallerie

(^{***}) ex Italfer - Direzione Tecnica, UO Gallerie

(^{****}) Consulente geotecnico

CONVEgni E CONGRESSI

fatti, permette di conseguire temporaneamente il consolidamento e l'impermeabilizzazione del terreno al contorno dello scavo, rendendo quindi possibile eseguire i lavori in sicurezza anche nel caso di terreni permeabili sotto falda (cfr. [1]; [2]). Hanno contribuito al diffondersi di tale tecnica anche le recenti innovazioni, che rendono tale intervento efficace e competitivo rispetto ad altri metodi di miglioramento delle caratteristiche dei terreni.

Tuttavia, ancora oggi il progetto di un intervento di congelamento artificiale dei terreni rappresenta un banco di prova per l'ingegnere geotecnico, poiché richiede la non semplice previsione dello sviluppo del processo di congelamento e di come le caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno siano modificate da tale processo. Per tale ragione la sperimentazione in situ con campi prova nei quali siano riprodotte le reali condizioni di progetto rappresenta uno strumento imprescindibile da affiancare alle previsioni progettuali condotte con modelli teorici.

Nel presente articolo è illustrata l'applicazione della tecnica del congelamento artificiale per i lavori di rifacimento dell'arco rovescio di una galleria ferroviaria esistente, dando particolare risalto al contributo fornito dalla sperimentazione in situ in merito alla definizione degli aspetti progettuali e realizzativi dell'intervento.

2. La galleria Cassia-Monte Mario

La galleria ferroviaria Cassia-Monte Mario fa parte del progetto di realizzazione della cintura Nord del Nodo di Roma. È una galleria a doppio binario (diametro interno 8,8 m) che attraversa la collina di Monte Mario per circa 4 km. Per gran parte del suo sviluppo la galleria è stata scavata in terreni plio-pleistocenici sotto falda, con una copertura massima di 75 m.

Lo scavo della galleria, cominciato nel 1944, fu completato solo nel 1984, anche a causa di frequenti interruzioni e fermi lavori necessari per le difficoltà incontrate nell'attraversamento di complesse condizioni geotecniche ed idrauliche.

Ripetuti dissesti e fenomeni di instabilità si sono, infatti, manifestati nel corso dei lavori, in particolar modo in una tratta di circa 500 m, compresa tra le progressive chilometriche 21,100 ÷ 21,600. Tali fenomeni hanno avuto importanti ripercussioni anche in superficie, con formazione di "fornelli" e danneggiamento di preesistenze superficiali.

Per superare tali difficoltà fu realizzato un cunicolo pilotato dal quale eseguire interventi di consolidamento preventivi allo scavo. Iniezioni cementizie e silicatiche furono realizzate anche a partire dal piano campagna.

Nei tempi recenti la galleria ha richiesto lavori di adeguamento della sagoma cinematica a gabarit Bplus e interventi di rinforzo strutturale (soprattutto dell'arco rovescio), oltre che di mitigazione dei fenomeni di infiltrazione d'acqua. Durante l'esecuzione dei lavori di demolizione e rifacimento dell'arco rovescio, completati senza inconvenienti per 420 m dei 960 m previsti, si è verificato l'improvviso ed imprevisto ingresso di acqua in galleria con trasporto di materiale fino, che ha raggiunto nel giro di

Recent developments in ground freezing techniques have indeed resulted in more efficient and cost-effective freezing systems that can compete with other ground improvement techniques. However, the design of a freeze system is still challenging as it involves the prediction of freezing process and soil response: real-scale trial fields are required to integrate and validate the design predictions and to accurately plan the construction stages.

In this paper the ground freezing application to rehabilitation works of an existing tunnel is described and the role of trial fields in the design and execution stage is highlighted.

2. The Cassia Monte-Mario tunnel

The Cassia-Monte Mario tunnel belongs to the double track railway line forming the Northern Railway Belt of the city of Rome (Italy). The 8,8 m internal diameter tunnel, which has a length of 4,4 km, crosses the Monte Mario hill, made up of cohesive and granular deposits of Plio-Pleistocene age below groundwater table. The maximum overburden is 75 m. The excavation of the tunnel began in 1944 and was carried out quite irregularly, with many interruptions and breaks, until 1984. The long construction history was indeed characterized by many problems due to difficult soil and groundwater conditions: various instability phenomena occurred in the southern section (km 21,100 ÷ km 21,700), which also produced significant effects on the surface. To overcome this situation, a 150 m long pilot tunnel was built to carry out ground improvement works prior to excavation. Extensive cement and silicate injections were also performed from ground surface.

In recent times the tunnel required rehabilitation works aimed at strengthening the original structure (particularly the invert), controlling the water leakage and enlarging the tunnel clearance profile. During the execution of the invert reconstruction, a serious disruption took place: a sudden ingress of water and, then, water and soil occurred from the invert excavation. The water inflow (up to 100 l/s) could not be stopped easily and the tunnel was flooded. The amount of mud which accumulated into the tunnel was significant. Despite the overburden of 60 m (Fig.1), the event had repercussions on the surface in an area having a diameter of about 50 m.

After this event the suspension of works was imposed and a detailed geotechnical study was carried out to identify the most appropriate design solution to continue invert reconstruction.

3. The geotechnical context

The geological profile along the tunnel route consists of a marine deposit of stiff overconsolidated clay of Pliocene age (Monte Vaticano Formation), overlain by a Pleistocene deposit of clayey silt and sandy silt (Monte

CONVEgni E CONGRESSI

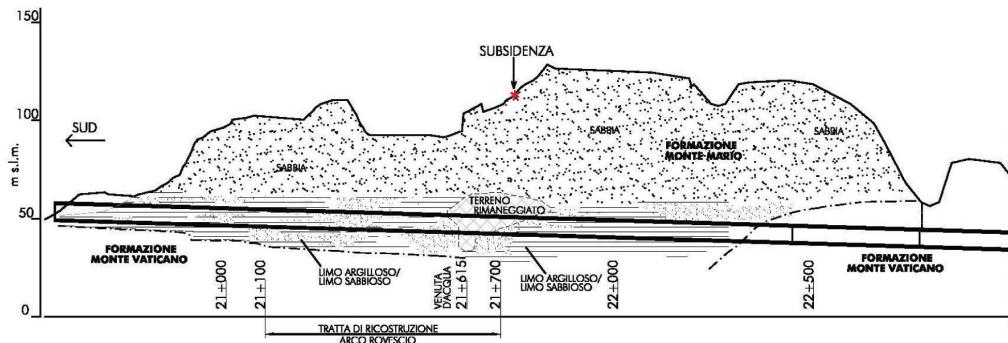


Fig. 1 - Schema del profilo geotecnico lungo l'asse della galleria Cassia-Monte Mario nella tratta in cui è attraversata la formazione di Monte Mario. *The schematic geotechnical profile along the Cassia-Monte Mario tunnel crossing the Monte Mario Formation.*

poche ore portate elevate (fino a 100 l/s). Falliti i tentativi di arrestare il fenomeno al suo innesco, la galleria si è parzialmente allagata e la quantità di materiale trasportato in galleria ha raggiunto un volume molto consistente.

Nonostante la copertura della galleria in tale tratta sia di circa 60 m (Fig.1), l'evento ha avuto ripercussioni anche in superficie, producendo, su un'area di circa 50 m di diametro, risentimenti tensiono-deformativi non marginali. In conseguenza di tale evento i lavori furono sospesi e fu intrapreso un approfondito studio geotecnico per identificare le cause del fenomeno ed individuare le soluzioni più appropriate per poter riprendere i lavori in sicurezza.

3. Il contesto geotecnico

La galleria attraversa depositi di origine marina composti da argille consistenti sovraconsolidate plioceniche (la formazione di Monte Vaticano), al di sopra delle quali si trova il deposito pleistocenico di limo argilloso e limo sabbioso (la formazione di Monte Mario).

Nella tratta che fu interessata dai dissesti durante la costruzione, la galleria attraversa la formazione di Monte Mario (Fig.1). Tale formazione presenta un assetto stratigrafico laminato sub-orizzontale, tipico della deposizione in un ambiente marino prossimo alla linea di costa. In particolare, mentre la porzione basale di tale deposito è caratterizzata da una fitta alternanza di livelli sabbiosi e livelli limosi, nella parte sommitale di chiusura del ciclo deposizionale si osserva un passaggio graduale a sabbie giallastre con grana più grossa. Gli spessori della porzione basale procedendo dall'imbrocco Sud tendono ad aumentare (Fig.1) fino a raggiungere diverse decine di metri; la sottostante formazione di Monte Vaticano, quindi, si approfondisce per riemergere alla quota del cavo della galleria al di là della zona interessata dai dissesti.

Le proprietà geotecniche dei terreni sono state investigative nel corso di numerose campagne di indagine condotte sia dal piano campagna, sia dall'interno della galleria.

Mario Formation), with sandy interbeddings, becoming medium dense sand in the upper part.

Along the stretch which has been characterized by instability phenomena during the construction, the tunnel crosses the Monte Mario Formation (Fig.1).

Soil properties have been investigated by means of numerous geotechnical surveys which were carried out both from the ground surface and from within the tunnel.

The soil at the tunnel level is characterized by a silt content between 40÷50 %, while the sand fraction can vary between 30÷48 % and the clay between 13÷22 %. The Liquid and Plastic limits are respectively equal to 26 % and 18 %. The natural water content at the tunnel depth has an average value of 20 %. Strength parameters are typical of fine dense granular soils: $c' = 40 \div 50 \text{ kPa}$, $\omega' = 34^\circ$ for a range of confinement pressure between 200 and 600 kPa, with the high value of cohesion mostly related to the mutual interlocking of the grains.

Geotechnical investigation also revealed that the ground around the tunnel where the inflow of water occurred is loosened and remoulded with high water content.

The average horizontal permeability determined by Lefranc tests is about $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Vertical permeability measured by means of laboratory test varies between 1.2×10^{-8} and $9 \times 10^{-9} \text{ m/s}$. The high anisotropy of permeability has to be correlated to the frequent sandy interbeddings.

Piezometers installed in boreholes drilled from within the tunnel and from the ground surface showed piezometric levels increasing in the stretch between km 21,100 and km 21,700 and reaching the maximum value of 20 m above the tunnel invert. The piezometric measurements often show significant variations at short distances but no particular variations over time have been identified.

It is reasonable to assume that the extensive ground improvement works, carried out during the tunnel excavation to counteract the difficult soil conditions, modified

CONVEgni E CONGRESSI

Il terreno alla profondità della galleria è caratterizzato da una frazione limosa variabile tra il 40% e il 50%, mentre la frazione sabbiosa è compresa tra il 30 e il 48% e il contenuto d'argilla varia tra il 13 e il 22%. Il limite liquido (w_L) e il limite plastico (w_p) sono rispettivamente pari a $w_L = 26\%$ e $w_p = 18\%$. Il contenuto naturale d'acqua alla profondità della galleria è intorno al 20%.

I parametri di resistenza al taglio, coesione efficace (c') e angolo di resistenza al taglio (ϕ'), ricadono nel campo dei valori tipici dei terreni granulari a grana fina: $c' = 40 \pm 50$ kPa, $\phi' = 34^\circ$ per un intervallo di valori della pressione di confinamento tra 200 e 600kPa. La coesione che si osserva in terreni limo-sabbiosi come quelli della Formazione di Monte Mario non deriva da legami interparticellari caratteristici di minerali fillosilicatici (la frazione argillosa è bassa), ma piuttosto dall'incastro mutuo di granuli inerti. La dilatanza rilevata nelle prove a bassa pressione ne dà conferma.

Le indagini geotecniche hanno dimostrato, inoltre, che il terreno attorno alla galleria, alla progressiva in cui si è verificata l'ingresso di acqua in galleria, è rimaneggiato, poco addensato e con un elevato contenuto d'acqua.

Il valore medio della permeabilità orizzontale determinata con prove in situ (Prove Lefranc) è circa 5×10^{-5} m/s. La permeabilità verticale, misurata con prove di laboratorio, è risultata variabile tra $1,2 \times 10^{-8}$ e 9×10^{-9} m/s. L'elevata anisotropia della permeabilità è correlata alle intercalazioni sabbiose tipiche del deposito pleistocenico.

Piezometri installati in fori di sondaggio eseguiti a partire dalla galleria e dal piano campagna hanno misurato livelli piezometrici progressivamente crescenti nella tratta compresa tra il km 21,100 e il km 21,600, dove la quota piezometrica sull'arco rovescio raggiunge il valore massimo di circa 20 m. I livelli piezometrici misurati mostrano spesso significative variazioni spaziali, anche tra punti di misura posti a breve distanza, ma non è stata riscontrata alcuna significativa variazione temporale nel periodo di osservazione.

È ragionevole pensare che le intense campagne di iniezioni cementizie e silicate, eseguite durante la costruzione della galleria per superare le difficoltà realizzative, abbiano modificato la struttura originale del terreno, e di conseguenza le sue proprietà, creando, tra l'altro, preferenziali e imprevedibili vie di circolazione dell'acqua nel terreno. In alcuni casi, durante l'esecuzione delle indagini geotecniche sono state individuate piccole cavità, probabilmente residuo di precedenti fori di sondaggio.

La permeabilità del terreno e la circolazione dell'acqua nel terreno hanno rappresentato, pertanto, il dato di partenza con la maggiore alea di incertezza nel progetto dell'intervento di congelamento.

4. Il progetto dell'intervento di congelamento artificiale

4.1 I criteri progettuali

Nel contesto sopra descritto, condizione imprescindibile per poter riprendere in sicurezza i lavori era garantire la com-

the original soil structure and properties, particularly creating unpredictable groundwater flow-paths.

In some cases, during geotechnical investigations, small cavities, probably related to previous boreholes, have been identified.

As a consequence, the soil permeability and groundwater flow-paths represented the main uncertainty the ground freezing design had to face with.

4. The design of the ground freezing application

4.1 Design criteria

To resume works in safety, it was necessary to ensure the water-tightness and improved strength of the soil around the tunnel invert. At the initial design stage, jet grouting and artificial ground freezing seemed to be the suitable methods to meet these requirements.

Considering the heterogeneity of the subsoil and the necessity of realizing a continuous water cut-off, the effectiveness of jet grouting seemed to be low and ground freezing was selected as the most appropriate solution.

Artificial ground freezing is normally realized through the circulation of a refrigerant fluid into freeze pipes, installed in the soil, to extract heat from the ground until the temperature falls below the groundwater freezing point.

In this case, the indirect method ("brine method") was adopted as freezing technique (Ref. [3], [4]). This method requires the use of an industrial refrigeration plant, from which the refrigerant liquid (a water solution of calcium chloride CaCl_2 , "brine", whose operational temperature is generally in the range from -18°C to -30°C) is delivered to freeze pipes drilled in the ground. A freeze pipe consists of two concentric tubes: the refrigerant fluid enters into the open-ended inner tube and flows through the annulus between the two tubes, drawing heat from the ground. The outer tube is connected to the return lines so that the brine is sent back to the plant, where it is cooled and delivered again to the freeze pipes (Fig.2).

Adopting the ground freezing, the tunnel invert reconstruction has required the preliminary freezing of an arch of soil around the invert and side walls by an array of freeze pipes drilled from the tunnel and, then, the removal of the pipes to proceed with the excavation and cast of the new invert.

The frozen soil arch around the tunnel was aimed at temporarily preventing the ingress of water and improving strength and deformation properties of the soil. As the excavation took place when pipes were dismantled, the freezing system was designed to ensure the maintenance of the above requirements until the completion of the new invert.

CONVEGNI E CONGRESSI

pleta impermeabilizzazione e un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno al contorno dello scavo, prima di procedere alla demolizione dell'arco rovescio esistente.

Nelle fasi iniziali della progettazione, il trattamento con *jet-grouting* e il congelamento artificiale dei terreni sono apparsi come i metodi più adeguati per rispondere a tale esigenza. Tuttavia, considerando la marcata eterogeneità del terreno e la necessità di garantire uno schermo di tenuta all'acqua assolutamente continuo, la resa del trattamento in *jet-grouting* poneva maggiori dubbi, mentre il congelamento artificiale dei terreni appariva come l'intervento dalle migliori possibilità di riuscita.

Il congelamento artificiale dei terreni è usualmente realizzato attraverso la circolazione di un fluido refrigerante all'interno di sonde congelatrici installate nel terreno per estrarre calore dal terreno stesso, fino ad abbassarne la temperatura al di sotto del punto di congelamento dell'acqua interstiziale.

Per l'intervento nella galleria Cassia - Monte Mario è stato adottato il metodo indiretto (cfr. [3]; [4]). Il metodo indiretto è così definito perché per il raffreddamento del terreno sono necessari due scambi termici: il primo scambio si ha all'interno di una centrale frigorifera in cui il liquido refrigerante (una soluzione di cloruro di calcio (CaCl_2) in acqua, detta "salamoia") è raffreddato dall'evaporazione del fluido frigorifero, il secondo scambio si ha nell'intorno delle sonde congelatrici, dove il terreno è raffreddato dalla salamoia.

Nell'impianto di congelamento il liquido refrigerante (salamoia) è portato a temperature generalmente comprese tra -18°C e -30°C e, tramite una tubazione coibentata, viene-

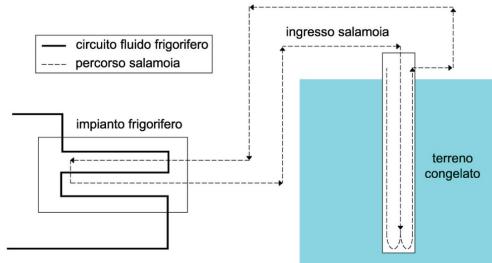


Fig. 2 - Schema di funzionamento del sistema di congelamento con metodo indiretto. *Operation scheme of the indirect method of freezing.*

4.2 Design predictions

The prediction of the real ground behaviour during and after the freezing process was a hard task to tackle, due to the uncertainties about the changes which the soil around the tunnel has suffered in the long history of instabilities and ground improvements. As a consequence, real-scale trial fields were considered a necessary step in the design stage.

The design analyses first focused on the evaluation of geometrical features and mechanical properties of the frozen soil required to ensure water-tightness and stability at the bottom of the excavation.

These design requirements were evaluated by means

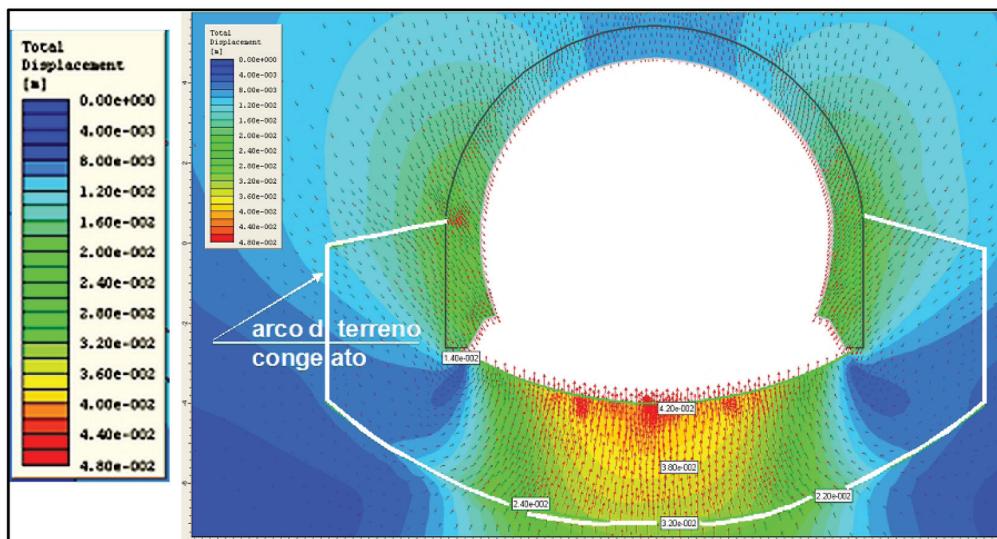


Fig. 3 - Campo di spostamenti indotti dalla demolizione e scavo dell'arco rovescio in presenza dell'arco di terreno congelato al contorno. *Displacements field induced by invert excavation adopting the protective arch of frozen soil.*

CONVEgni E CONGRESSI

ne immesso nelle sonde congelatrici installate nel terreno. Le sonde congelatrici sono costituite da due tubi coassiali opportunamente distanziati: il liquido refrigerante, immesso nel tubo interno, con l'estremità inferiore aperta, circola nell'intercapdine tra i due tubi, e in tale passaggio sottrae calore dal terreno; la salamoia che esce dal tubo esterno è utilizzata per alimentare altre sonde congelatrici connesse in serie, ed è infine rinviata alla centrale frigorifera per essere nuovamente raffreddata e rimessa in circolo (Fig.2).

Per il rifacimento dell'arco rovescio della galleria Cassia-Monte Mario l'applicazione di tale tecnica ha richiesto l'installazione, dall'interno della galleria, di un sistema di sonde congelatrici disposte in modo da realizzare un arco di terreno congelato intorno all'arco rovescio e ai piedritti, a cui è seguita, previa rimozione delle sonde congelatrici, la demolizione dell'arco rovescio esistente e la sua ricostruzione.

Il terreno congelato attorno alla galleria svolgeva la dopplice funzione di prevenire l'ingresso di acqua e migliorare temporaneamente le caratteristiche meccaniche del terreno stesso. Dal momento che lo scavo poteva aver luogo solo dopo aver rimosso le sonde, e quindi disattivato il sistema di congelamento, il progetto dell'intervento è stato sviluppato in modo da garantire il mantenimento dei requisiti suddetti fino al completamento del nuovo arco rovescio.

4.2 Le previsioni progettuali

La previsione del reale comportamento del terreno durante e dopo il processo di congelamento è stata l'aspetto cruciale della fase progettuale, considerate le incertezze circa le modifiche indotte nel terreno al contorno della galleria dalla lunga storia di dissesti ed interventi di consolidamento. Per tale motivo è stata considerata parte integrante ed irrinunciabile della fase progettuale la sperimentazione in situ tramite la realizzazione di campi prova.

Il primo aspetto progettuale esaminato è stato la definizione delle caratteristiche geometriche dell'intervento e delle proprietà meccaniche del terreno congelato necessarie per garantire la tenuta all'ingresso d'acqua e la stabilità del fondo dello scavo.

Questi requisiti progettuali sono stati valutati con l'aiuto di una modellazione numerica bidimensionale basata sul metodo degli elementi finiti. Le analisi sono state condotte riproducendo le condizioni iniziali tramite *back analysis* delle misure di stato tensionale del rivestimento della galleria, simulando, quindi, la fase preliminare di miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno, prodotte dal congelamento e, infine, la demolizione e lo scavo per la realizzazione del nuovo arco rovescio.

I risultati hanno dimostrato la necessità di uno spessore di 3 m circa di terreno congelato al di sotto dell'arco rovescio e attorno ai piedritti.

In tale configurazione viene assicurata la stabilità del fondo scavo alla sottospinta idraulica: lo spostamento massimo del rivestimento prodotto dallo scavo dell'arco rovescio raggiunge i 20 mm circa (Fig.3).

of 2D numerical analyses based on the finite element method. The analyses were carried out reproducing the initial tunnel conditions by the back-analysis of lining stress measurements and then simulating the preliminary stage of the ground improvement and invert excavation. The results indicated that a 3 m thick arch of frozen soil was necessary below the invert and around the lower part of the side walls (Fig.3). Lining displacements induced by excavation are about 20 mm (Fig.3)

Parametric analyses were performed progressively decreasing strength and stiffness of the frozen soil; the results showed that an average compressive strength of about 1,5 MPa was required to allow the construction safely proceeds.

Laboratory tests under temperature and strain-rate controlled conditions were performed to measure strength and stiffness properties of the Monte Mario silt in the frozen condition. Uniaxial compressive tests were carried out on samples frozen at the temperatures of -5°C, -10°C and -15°C, imposing a strain rate of 1%/min (Ref. [5]) The results showed that the average short-term compressive strength of the frozen soil ranges from 3,5 MPa (-5°C) to 7 MPa (-15°C) and the initial modulus from 120 MPa (-5°C) to 600 MPa (-15°C). Experimental tests performed on similar soils (e.g. Ref. [6]) indicated that long term uniaxial compressive strength can decrease almost to 40% of the short term value, considering a free standing time of the frozen soil of about 7 days.

Hence, on the basis of the numerical analyses and laboratory tests results, the mechanical properties shown by the soil at the temperature $T = -5^\circ\text{C}$ were set as the minimum design requirements for the arch of frozen soil. As a consequence, the temperature $T = -5^\circ\text{C}$ was identified as the maximum temperature that could be accepted during the thawing process, after the removal of the freeze pipes, until the completion of the new invert.

To predict the rate of freezing, thermal computations were carried out by means of a simplified model (Ref. [4]). According to this model, the freezing process develops in three stages: at first, the frozen soil columns grow from separate freeze pipes; then, the separate frozen soil columns at a distance s , merge to form a continuous wall and, finally,

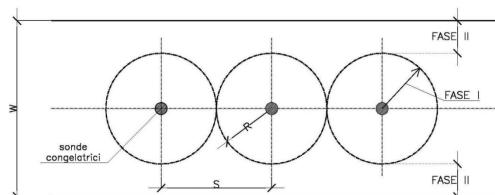


Fig. 4 - Schema delle fasi di congelamento nel terreno secondo il modello di Sanger & Sayles (cfr.[7])
(s = interasse sonde congelatrici, w = spessore del terreno congelato). Freezing stages according to the Sanger & Sayles model (Ref. [7]) (s = freeze pipe spacing, w = frozen wall thickness).

CONVEGNI E CONGRESSI

Le analisi numeriche sono state eseguite diminuendo progressivamente resistenza e rigidezza del terreno congelato fino ad arrivare al collasso: in questo modo è stato possibile evidenziare la condizione limite, per eseguire demolizione e ricostruzione dell'arco rovescio, identificata dalla resistenza a compressione media del terreno congelato pari a circa 1,5 MPa.

Per determinare resistenza e rigidezza dei terreni della formazione di Monte Mario nel processo di congelamento è stata condotta una sperimentazione in laboratorio in condizioni di temperatura e deformazione controllate. In particolare, sono state eseguite prove di compressione uniaxiale con velocità di deformazione dell'1%/min (cfr. [5]) su campioni congelati alle temperature di -5°C, -10°C e -15°C.

I risultati hanno confermato che le proprietà meccaniche del terreno si incrementano al diminuire della temperatura: infatti, la resistenza a compressione media nel breve termine (condizione iniziale) cresce da 3,5 MPa (alla temperatura di -5°C) a 7 MPa (alla temperatura di -15°C) e il modulo di rigidezza iniziale varia da 120 MPa (alla temperatura di -5°C) a 600 MPa (alla temperatura di -15°C).

Tuttavia, tali valori di resistenza diminuiscono nel tempo, a carico costante: prove di laboratorio eseguite su terreni con caratteristiche simili hanno evidenziato che la resistenza a compressione uniaxiale in un arco temporale di 7 giorni, mantenendo costante la temperatura, può diminuire fino al 40% del valore iniziale di breve termine (cfr. [6]).

Pertanto, considerando i risultati delle analisi numeriche e della sperimentazione di laboratorio, le proprietà meccaniche del terreno congelato alla temperatura $T = -5^\circ\text{C}$ sono state individuate come requisito progettuale minimo per l'arco di terreno congelato. Di conseguenza, tale valore di temperatura ($T = -5^\circ\text{C}$) è stato identificato come il massimo valore ammissibile nel processo di scongelamento del terreno, dopo la rimozione delle sonde congelatrici, fino al completamento del nuovo arco rovescio.

Per la previsione del tempo necessario a raggiungere il congelamento del terreno, sono state condotte analisi termiche basate sul modello semplificato di Sanger e Sayles (cfr. [7]). Secondo tale modello, il processo di congelamento si sviluppa in tre fasi: nella prima fase le colonne di terreno congelato crescono attorno alle sonde congelatrici, poste ad interasse s , poi le singole colonne si uniscono per formare una parete continua di spessore w (Fig.4) e, infine, due separate file di colonne di terreno congelato si uniscono per formare una parete di terreno congelato di maggior spessore.

Il modello è stato applicato per prevedere il tempo necessario per la formazione delle colonne congelate (fase 1) e il tempo necessario per la formazione del muro congelato (fase 2) (Fig.4). Nella prima fase il campo della temperatura attorno ad una sonda congelatrice, nella regione di terreno congelato, è stato determinato secondo la legge di Fourier della trasmissione del calore, nell'ipotesi plausibile di condizione stazionaria:

two separate rows of frozen columns merge to form a thicker wall of frozen soil having thickness w (Fig.4).

The model has been applied to predict the time required for the formation of the frozen columns (stage 1) and the time required for the formation of the frozen wall (stage 2). In the first stage the temperature field around a freeze pipe, in the frozen region, was determined according the Fourier heat flow equation, assuming a steady-state condition:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (1)$$

where T = temperature at the distance r . The time required to freeze the column to a radius R was thus obtained from the following:

$$t_I = \frac{R^2 L_I}{4K_1 T_s} \cdot \left[2 \ln\left(\frac{R}{r_o}\right) - 1 + \frac{C_1 T_s}{L_I} \right] \quad (2)$$

where R = radius to the interface frozen-unfrozen soil, r_o = radius of the freeze pipe, T_s = difference between the temperature at the freeze pipe and the freezing point of water, K_1 = thermal conductivity of the frozen soil, C_1 = frozen soil specific heat, L_I = a function of the latent heat of fusion of the soil water and unfrozen soil specific heat.

Due to soil heterogeneity, the prediction of the freezing time was carried out considering different scenarios characterized by variations in soil particle size: clay, silt, and sand. In Table 1 the main physical and thermal properties used in the analyses are indicated.

Assuming a temperature of the brine of -28°C the time for the closure of the frozen columns (with a spacing of 1 m) was in the range between 20 days (sand) and 30 days (clay).

The role played by the brine temperature was also investigated: Figure 5 shows the growth of the frozen column in a silty soil, assuming different freeze pipe temperatures.

The freezing time predictions by the simplified model are indeed conservative, nevertheless they gave useful information to plan the freeze pipes lay-out and construction stages to be validated by the field tests (see § 5).

Considering that the excavation works required the dismantling of the freeze pipes, i.e. these works took place during the thawing process, the estimation of the rate of thawing was the crucial aspect of the design. It had indeed a strong influence on the definition of the construction stages and temperature at which the excavation could start (*target temperature*, T_o).

Experimental tests on the real site appeared to be the most reliable way for accurately evaluating those aspects

CONVEGNI E CONGRESSI

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (1)$$

dove T = temperatura alla distanza r. Il tempo necessario per ottenere una colonna di terreno congelato di raggio R è stato quindi ottenuto dalla seguente equazione:

$$t_I = \frac{R^2 L_I}{4K_1 T_s} \cdot \left[2 \ln\left(\frac{R}{r_o}\right) - 1 + \frac{C_1 T_s}{L_I} \right] \quad (2)$$

dove R = raggio dell'interfaccia terreno congelato-non congelato, r_o = raggio della sonda congelatrice, T_s = differenza tra la temperatura del fluido nella sonda congelatrice e il punto di congelamento dell'acqua, K_1 = conducibilità termica del terreno congelato, C_1 = calore specifico del terreno congelato, L_I = una funzione del calore latente di fusione dell'acqua interstiziale e del calore specifico del terreno non congelato.

A causa dell'eterogeneità del terreno la previsione del tempo di congelamento è stata effettuata considerando diversi possibili scenari, ovvero considerando la prevalenza di una frazione granulometrica del terreno rispetto alle altre: argilla, limo, sabbia. Nella tabella 1 sono riportati i principali parametri fisici e termici utilizzati nelle analisi.

Assumendo una temperatura della salamoia di -28°C il tempo necessario per la formazione delle colonne di terreno congelato (con interasse di 1m) varia tra 20 giorni (nel caso della sabbia) e 30 giorni (nel caso dell'argilla).

Con lo stesso modello teorico è stato inoltre analizzato il ruolo della temperatura della salamoia: in Figura 5 è mostrato lo sviluppo nel tempo del raggio di una colonna di terreno congelato al variare della temperatura del liquido refrigerante.

Sembra la previsione del tempo di congelamento secondo il metodo semplificato sopra illustrato sia sicuramente conservativa, da tali analisi si sono ricavate utili indicazioni per progettare la configurazione geometrica delle sonde congelatrici e programmare le fasi di costruzione, verificate e tarate in seguito con i campi prova (cfr. § 5).

Considerato che i lavori di demolizione dell'arco rovescio esistente e di scavo richiedono lo smantellamento del sistema di sonde congelatrici, e che quindi tali lavori avvengono durante la fase di scongelamento, la stima della velocità di risalita delle temperature nel terreno congelato ha rappresentato un aspetto fondamentale della progettazione. La velocità di tale processo, infatti, aveva un'influenza decisiva sulla definizione delle fasi costruttive e della temperatura alla quale lo scavo poteva avere inizio (definita nel seguito *temperatura target*). I campi prova eseguiti nelle reali condizioni del terreno sono apparsi co-

TABELLA 1- TABLE 1

PRINCIPALI PARAMETRI FISICI E TERMICI
MAIN PHYSICAL AND THERMAL PARAMETERS

Parametro Parameter	U.M. U.M.	Sabbia Sand	Limo Silt	Argilla Clay
Peso specifico del secco <i>Dry specific weight</i>	kN/m ³	15.90	15.89	15.87
Contenuto d'acqua <i>Water content</i>	%	25.20	25.50	25.80
Grado di saturazione <i>Saturation degree</i>	-	1.0	1.0	1.0
Calore specifico del terreno congelato <i>Frozen soil specific heat</i>	kJ/m ³ K	2.19	2.195	2.20
Calore specifico del terreno non congelato <i>Unfrozen soil specific heat</i>	kJ/m ³ K	3.061	3.067	3.072
Conducibilità del terreno congelato <i>Frozen soil conductivity</i>	kJ/hm ² K	12.50	10.60	8.70
Conducibilità del terreno non congelato <i>Unfrozen soil conductivity</i>	kJ/hm ² K	7.10	6.00	4.90

and validate the preliminary assumption of a target temperature $T_o = -10^\circ\text{C}$.

Finally, one of the major concern in the design stage was the evaluation of the expansion of the ground due to freezing and the possible effects on tunnel lining. Because of the uncertainties about soil properties and structural behaviour of the tunnel, it was decided to address this issue in the trial field, implementing an accurate system to monitor lining displacements.

5. Trial field

5.1 Geometrical layout

The trial field was realized inside the tunnel for a length of 48 m. Freeze pipes were installed with a spacing

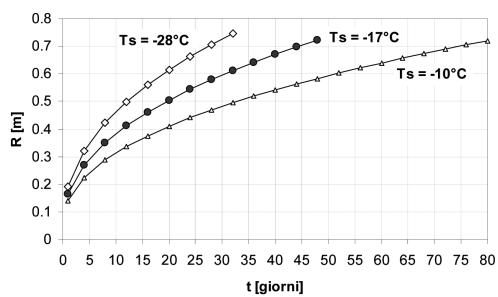


Fig. 5 - Evoluzione nel tempo del raggio, R, della colonna di terreno congelato (isoterma $T = 0^\circ\text{C}$) per differenti valori della temperatura T_s nelle sonde congelatrici. Variation of the radius of the frozen column (isotherm $T = 0^\circ\text{C}$) over time for different

CONVEgni E CONGRESSI

me il modo più affidabile per esaminare accuratamente tali aspetti.

Infine, particolare attenzione è stata dedicata alla valutazione delle variazioni di volume che il terreno può subire per effetto del congelamento dell'acqua interstiziale e alle possibili ripercussioni di tali variazioni volumetriche sul rivestimento della galleria. A causa dell'incertezza sulle proprietà del terreno e sul reale comportamento strutturale della galleria, è stato deciso di investigare tale aspetto nei campi prova, implementando un accurato sistema di monitoraggio degli spostamenti dei rivestimenti definitivi.

5. I campi prova

5.1 La configurazione geometrica

Il campo prova è stato realizzato all'interno della galleria interessando una tratta di circa 48 m di lunghezza. Le sonde congelatrici sono state installate a quinconce, ad interasse di 1 x 1 m (Fig.6) in una disposizione radiale, in modo da ottenere un arco di terreno congelato di 3 m di spessore al di sotto dell'arco rovescio e attorno ai piedritti fino ad un'altezza di circa 2,5 m.

La spaziatura delle sonde nel terreno cresce da circa 1,20 m in sommità fino a 1,35 m all'estremità inferiore.

La lunghezza delle sonde congelatrici varia da 4 m a 4,8 m, in funzione dello spessore del rivestimento della galleria. La parte superiore delle sonde che attraversa l'arco rovescio esistente è stata isolata per delimitare la lunghezza efficace ai fini del congelamento. Il volume totale del terreno congelato nei campi prova è di circa 2640 m³.

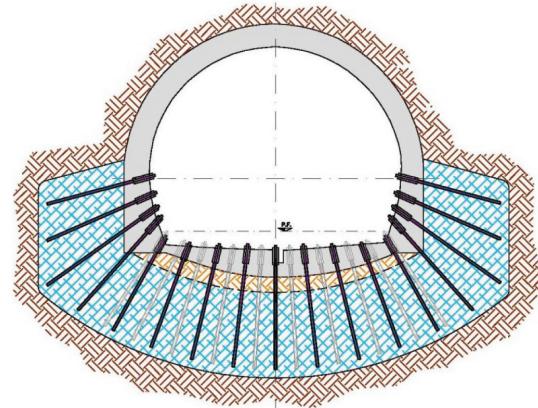


Fig. 6 - Schema geometrico di installazione delle sonde congelatrici: sezione trasversale e vista planimetrica. *Freeze pipes lay-out in the tunnel cross-section and plan view.*

of 1 x 1 m, in a radial arrangement to freeze a 3 m thick soil body below the tunnel invert and around the side walls up to a height of about 2,5 m (Fig.6). The pipes spacing varies from 1,20 m at the top to 1,35 m at the bottom.

The length of the pipes is in the range from 4,0 m to 4,8 m. The upper section of the pipes, drilled through the existing invert, was insulated to delimitate the target frozen zone of the tube. The total volume of frozen soil was 2640 m³.

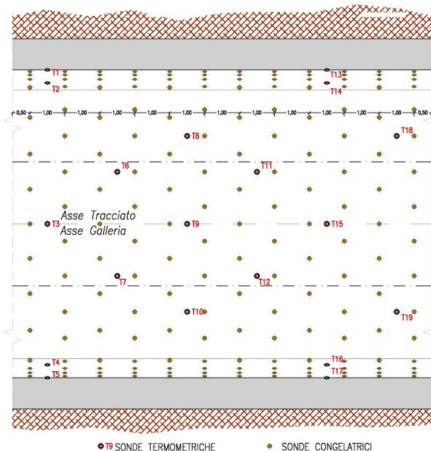
The field test length was subdivided into 4 sections with a length of 12 m each. Each section was equipped with 210 freeze pipes, for the total number of 840 pipes in the trial field.

All pipe installations were realized using a preventer system to rapidly close the hole in case of uncontrolled flows of water and/or soil.

The freezing ground application was preceded by injections of water-cement mixtures to reduce the soil permeability and to contrast possible preferential pathways of water especially in the area affected by the water inflow.

5.2 The refrigeration system

The refrigeration plant was located inside the tunnel and connected through pipes to the cooling towers realized outside. A freeze plant with a capacity of 500 kW was used. The freeze plant was designed for simultaneously freezing a tunnel length of 48 m. The designed brine supply temperature was -28°C. The delivery system was planned and realized in order to separately feed each row of freeze pipes and to disconnect the pipes installed at the invert, while feeding the pipes at the side walls (Fig.7).



CONVEgni E CONGRESSI

La tratta di prova è stata suddivisa in 4 campi, ciascuno con lunghezza di 12 m. Ogni campo è stato attrezzato con 210 sonde congelatrici, per un numero totale di 840 sonde.

Tutte le sonde congelatrici sono state installate utilizzando un sistema "preventer", che consentiva di chiudere rapidamente il foro della perforazione nel caso di venuta incontrollata di acqua o di acqua con trasporto di materiale fino.

Il congelamento è stato preceduto da iniezioni di miscela di acqua e cemento per ridurre la permeabilità del terreno e contrastare eventuali percorsi preferenziali di filtrazione nella zona interessata dai fenomeni di ingresso di acqua in galleria con trasporto di materiale fino, già menzionati al paragrafo 3.

5.2 L'impianto di congelamento

La centrale frigorifera è stata installata all'interno della galleria, connessa attraverso un sistema di tubazioni alle torri di raffreddamento collocate all'esterno. La centrale è stata progettata con capacità di 500 kW, dimensionata per poter congelare contemporaneamente 4 campi da 12 m ciascuno. La temperatura di progetto della salamoia è stata imposta pari a -28°C. Ciascun campo è stata approntato con due tubazioni di distribuzione della salamoia, di lunghezza pari a 12 m.

Il sistema di immissione ed estrazione della salamoia dalle sonde congelatrici è stato studiato in modo tale da poter alimentare separatamente ciascuna fila di sonde congelatrici: le tubazioni di distribuzione della salamoia erano dotate, infatti, di 18 diramazioni con altrettante valvole di chiusura e le raggiere di sonde in arco rovescio erano collegate trasversalmente in serie (Fig.7). Le sonde congelatrici sui piedritti erano, invece, collegate tra loro longitudinalmente, così da poter disconnettere le sonde in arco rovescio, mantenendo invece attive le sonde ai piedritti.

5.3 Il sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio è stato concepito con caratteristiche di semplicità e robustezza per poter funzionare anche nel complesso contesto di un cantiere in sotterraneo.

Il monitoraggio delle temperature era composto da sensori di temperatura e automaticamente per l'acquisizione delle temperature, con la possibilità di analizzare i dati in tempo reale per seguire costantemente l'evoluzione temporale dei processi di congelamento e scongelamento.

Le sonde per la misura delle temperature, installate a di-



Fig. 7 - Circuiti di distribuzione della salamoia nelle sonde congelatrici. *Freeze pipes feeding system.*

5.3 The monitoring system

The monitoring system was developed to be simple and robust in order to work in the complex conditions of a tunnel under construction.

The temperature monitoring system was composed of temperature sensors and data loggers for the automatic data acquisition and recording, allowing real time data processing to control both the freezing and thawing process.

Temperature measurement tubes were installed at well defined distance from the freeze pipes for a total number of 19 for each section: 11 in the invert and 8 at the side walls. Each tube was equipped with 3 sensors, placed at a depth of 0,5 m (upper sensor), 1,5 m (intermediate sensor), 2,5 m (lower sensor) from the top of the tube (Fig.8).

The total number of sensors is 57 for each section and 228 in the trial field. The temperature measurement tubes at the side walls were maintained active also during the demolition and reconstruction works to control the thawing process. Temperature sensors were also installed along the delivery system to check the brine temperature.

Monitoring of the tunnel lining behaviour was carried out to control possible movements induced by freezing and thawing as well by excavation. Monitoring program included 3D geodetic optical levelling and invar tape to measure tunnel lining diametrical distortion (convergence). Moreover invar

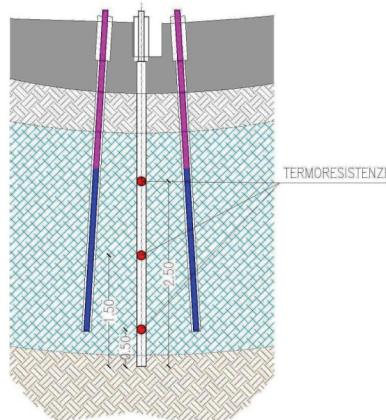


Fig. 8 - Le sonde termometriche: schema di installazione dei sensori. *Thermometric pipes and sensors distribution.*

CONVEGNI E CONGRESSI

stanze ben definite dalle sonde congelatrici, erano 19 per ciascun campo, delle quali 11 sonde in arco rovescio e 8 ai piedritti. Ciascuna sonda termometrica era attrezzata con 3 sensori (termoresistenze), installati alle profondità di 0,5 m (sensore superiore), 1,5 m (sensore intermedio), 2,5 m (sensore inferiore) a partire dalla testa della sonda (Fig.8). Ciascun campo prova era quindi attrezzato con 57 sensori, per un totale di 228 sensori impiegati sui 4 campi prova. I sensori di temperatura ai piedritti sono stati mantenuti attivi durante la demolizione e la ricostruzione dell'arco rovescio allo scopo di monitorare il processo di scongelamento. Sensori di temperatura sono stati installati anche lungo le tubazioni di mandata della salamoia.

Il monitoraggio del rivestimento definitivo della galleria era stato predisposto allo scopo di controllare eventuali movimenti indotti dalle variazioni volumetriche associate ai cambiamenti di stato dell'acqua interstiziale. Gli spostamenti di mire installate sul rivestimento di calotta erano controllati mediante rilievi topografici con stazione totale e mediante nastro invar, queste ultime per la misura sia della convergenza diametrale, sia di eventuali estensioni o compressioni dei piedritti.

Il sistema di monitoraggio era integrato anche da strumentazione geotecnica (inclinometri ed assestimetri) e da livellazione topografica per il controllo, rispettivamente, di spostamenti profondi e spostamenti superficiali nell'area interessata dai fenomeni di dissesto.

5.4 Fasi costruttive

La fase costruttiva del campo prova è stata realizzata con la seguente sequenza:

1. congelamento dei 4 campi prova con lunghezza ciascuno di 12 m (avvio del congelamento sfalsato temporalmente di qualche giorno per i diversi campi)
2. smantellamento delle sonde congelatrici nel campo n° 1 al raggiungimento della *temperatura target* di -10 °C nell'arco di terreno congelato,
3. demolizione e ricostruzione dell'arco rovescio nel campo n° 1 lavorando per conci di lunghezza pari a 4 m,
4. smantellamento delle sonde congelatrici nel campo n° 2 al completamento della ricostruzione del campo n° 1 e al raggiungimento della *temperatura target* di -10 °C nell'arco di terreno congelato,
5. demolizione e ricostruzione dell'arco rovescio nel campo n° 2 lavorando per conci di lunghezza pari a 4 m.

Le fasi 4 e 5 sono state ripetute per i campi n° 3 e n° 4.

Durante lo scavo si è avuta l'opportunità di verificare in maniera indiretta ciò che era stato desunto da indagini e prove circa le caratteristiche geometriche e strutturali dell'arco rovescio esistente, il quale ha presentato in maniera ricorrente una marcata e brusca riduzione della sezione trasversale nel nodo di connessione con i piedritti (Fig.9). In alcuni casi è stata riscontrata l'assenza di collegamento strutturale tra piedritti e arco rovescio.

tape was used to monitor side walls movements, verifying possible compressions or extensions.

Ground surface and subsurface movements were also controlled respectively by optical levelling and borehole inclinometers and extensometers.

5.4 Construction stages

The sequence of construction stages was the following:

1. freezing of the four 12 m long sections (with a time lag of few days for each section),
2. removal of the freeze pipes only in section n°1 when the target temperature $T_o = -10^\circ\text{C}$ was measured below the invert and at the side walls,
3. demolition and reconstruction of the invert in section n°1 working for successive stages with a length of 4 m,



Fig. 9 - L'arco rovescio esistente messo in luce dallo scavo del concio contiguo. *The excavation of the existing invert.*

4. removal of the freeze pipes in section n°2 when the target temperature $T_o = -10^\circ\text{C}$ was measured in the frozen soil body,

5. demolition and reconstruction of the invert in section n°2 working for stages with a length of 4 m,

Stages n° 4 and 5 were repeated for section n°3 and n°4.

During the excavation works the actual shape and structural features of the existing invert were discovered: the invert is characterized by a marked and abrupt reduction of the cross-section size at the side walls connection (Fig.9). In some cases the lack of any structural continuity between the invert and side walls was found out.

5.5 The monitoring results

During the trial field 840 freeze pipes were simultaneously active and 228 thermometric sensors were installed in the ground recording data every 8 hours. Monitoring da-

CONVEGNI E CONGRESSI

5.5 I risultati del monitoraggio

Nel campi prova erano simultaneamente attive 840 sonde congelatrici, mentre il controllo della temperatura nel terreno sottoposto al congelamento era effettuato mediante 228 sensori con acquisizione dei dati ogni 8 ore.

I dati raccolti nel corso della sperimentazione hanno fornito importanti indicazioni sul processo di congelamento ed hanno permesso di definire i parametri di tale processo che risultavano critici per la progettazione dell'intervento.

Lo sviluppo del congelamento nel terreno è ben descritto dall'andamento dei dati di temperatura in funzione del tempo. La figura 10 mostra il tipico andamento registrato dai sensori in arco rovescio: un'iniziale e rapida diminuzione della temperatura è seguita da un rallentamento del processo di raffreddamento all'approssimarsi della temperatura di congelamento dell'acqua. Compuito il passaggio di stato dell'acqua interstiziale, la temperatura ricomincia a diminuire, ma più lentamente che nella fase precedente. All'inizio del processo la velocità di congelamento (espressa in gradi centigradi/giorno) è compresa tra $1,3^{\circ}\text{C}/\text{d} \div 1,7^{\circ}\text{C}/\text{d}$, diminuendo fino a valori compresi tra $0,6 \div 0,8^{\circ}\text{C}/\text{d}$ superato il punto di congelamento dell'acqua.

Nei campi prova la temperatura della salamoia nelle sonde congelatrici non ha raggiunto il valore operativo prefissato di -28°C , anche a causa dell'insoddisfacente isolamento termico del sistema di distribuzione della salamoia. Anche se il valore medio della temperatura raggiunta è stato di -17°C , la condizione termica $T = 0^{\circ}\text{C}$ è stata raggiunta, alla distanza di 0,675 m dalle sonde congelatrici, in circa 25 giorni, mentre la temperatura target è stata conseguita dopo circa 45 giorni dall'inizio del processo di congelamento.

Le misure di temperatura nel terreno sotto l'arco rovescio sono risultate generalmente omogenee, mentre i valori di temperatura ai piedritti sono più dispersi, avendo riscontrato, infatti, un coefficiente di variazione sempre maggiore di 0,3 (Fig.11).

Il campo delle temperature, come deutsno dalle misure, è caratterizzato da una distribuzione spaziale con gradiente delle temperature (in valore assoluto) decrescente lungo l'asse della sonda termometrica, poiché la distanza dei sensori dalle sonde congelatrici aumenta procedendo dall'alto verso il basso a causa della disposizione radiale delle sonde stesse. Pertanto, i sensori superiori, più vicini alle sonde, hanno registrato la diminuzione

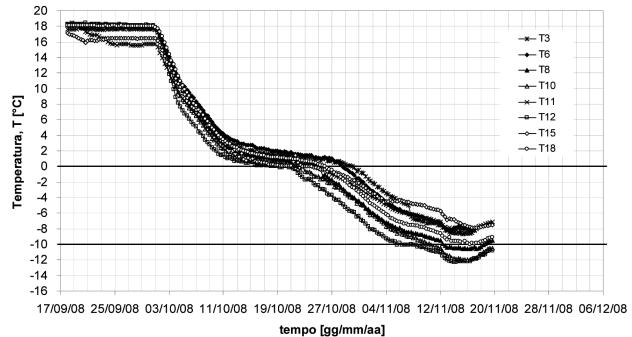


Fig. 10 - Andamento della temperatura durante il processo di congelamento: misure dai sensori intermedi installati sotto l'arco rovescio nel campo prova n° 1. Variation of temperature over time during ground freezing. Data from intermediate sensors below the invert in section n° 1.

ta were an invaluable aid to analyze the freezing process and to define the critical design parameters.

The freezing process is well described by the temperature data plotted versus time. Figure 10 shows the typical measured trend recorded by the sensors below the invert: an initial rapid decrease of temperature is followed by a slowdown trend approaching the freezing point of groundwater. Then, the temperature starts decreasing again but slower than in the previous phase. At the beginning of the process the freezing rate is in the range $1,3^{\circ}\text{C}/\text{day} \div 1,7^{\circ}\text{C}/\text{day}$, decreasing to $0,6 \div 0,8^{\circ}\text{C}/\text{day}$ after the freezing point.

During the experimental test, the temperature of the brine flowing into the freeze pipes did not reach the operative value $T = -28^{\circ}\text{C}$, also because of the unsatisfactory insulation of the feeding system. Even if the average brine temperature was $T = -17^{\circ}\text{C}$, the thermal condition $T = 0^{\circ}\text{C}$ was attained in about 25 days, while the target temperature $T_o = -10^{\circ}\text{C}$ was reached in about 45 days.

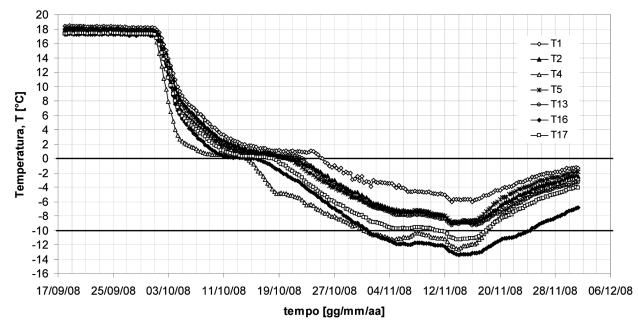


Fig. 11 - Andamento della temperatura durante il processo di congelamento e di scongelamento: misure dai sensori intermedi installati dietro i piedritti nel campo prova n° 1. Variation of temperature over time during ground freezing. Data from intermediate sensors at the side walls in section n° 1.

CONVEGNI E CONGRESSI

delle temperature nel terreno prima dei sensori inferiori. Il gradiente lungo la direzione radiale delle sonde è stato misurato variabile nell'intervallo 1,6 °C/m ÷ 2,8 °C/m.

Una risposta differente è stata osservata tra i sensori installati al di sotto dell'arco rovescio e quelli installati ai piedritti. Di regola, a parità di distanza dalle sonde congelatrici, le temperature misurate ad un dato istante di tempo sotto l'arco rovescio sono più alte delle temperature misurate ai piedritti. La massima differenza misurata è di 2,7 °C.

Il processo di scongelamento (Fig. 11) è stato monitorato per più di due settimane per ciascun campo sperimentale. Dall'analisi dei dati è stata riscontrata una variazione non lineare nel tempo della temperatura e una più rapida risalita delle temperature nei sensori superiori, come riportato ad esempio nella Figura 12.

Considerando un intervallo temporale di 7 giorni, la velocità di scongelamento varia da 0,36°C/d a 0,58°C/d con un valore medio di 0,4°C/d per i sensori in arco rovescio. Per i sensori ai piedritti la velocità di scongelamento varia da 0,38°C/d a 0,81°C/d con un valore medio di 0,6°C/d.

Il processo di congelamento ha prodotto effetti trascurabili sul rivestimento definitivo: nei campi prova n° 2, 3 e 4 è stata misurata una convergenza media di 4 mm (Fig.13). Un comportamento differente è stato osservato nel campo prova n°1, dove si è misurato uno spostamento dei piedritti verso l'esterno di circa 6 mm.

Gli spostamenti associati alle operazioni di demolizione dell'arco rovescio e successivo scavo sono stati più rilevanti: i dati sono stati analizzati anche considerando l'effetto prodotto dallo scavo dei campi adiacenti (Fig.13).

5.6 Esiti dei campi prova

I risultati dei campi prova hanno validato i principali aspetti progettuali dell'intervento di congelamento propedeutico allo scavo e hanno dato un contributo fondamentale per definire la programmazione temporale dei lavori e delle attività di cantiere.

In base alla velocità di congelamento misurata, anche estrapolando i dati con riferimento alla reale temperatura di progetto della salamoia (-28°C), secondo le previsioni del modello teorico semplificato la risposta del terreno è apparsa più simile a quella di un terreno a prevalente granulometria sabbiosa.

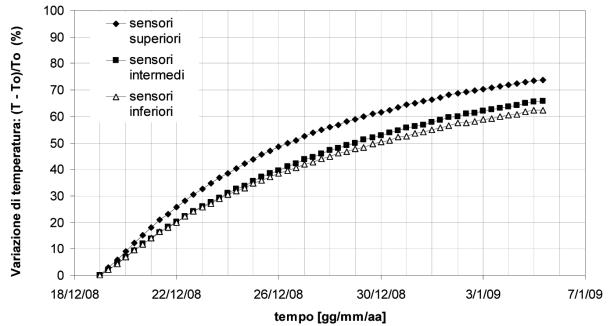


Fig. 12 - Andamento della temperatura nel terreno ai piedritti durante il processo di scongelamento per il campo n° 3. La variazione della temperatura è espressa come variazione percentuale della temperatura T_0 all'inizio del processo di scongelamento. *Temperature variations measured in the ground at the side walls during the thawing process (section n°3). The variation is expressed as a percentage of the temperature T_0 at the beginning of the thawing process.*

Temperature measurements in the ground below the invert were generally homogeneous, while the temperature data in the ground at the side walls were more scattered, showing a coefficient of variation always greater than 0,3 (Fig.11).

The spatial distribution of the temperature was characterized by a decreasing gradient along the axis of the temperature tubes, due to the radial arrangement of the freeze pipes that caused an increase of the sensor-freeze pipe distance from the top to the bottom. As a consequence, the upper thermometers, that were located closer to the freeze pipes, recorded an apparent faster cooling than the lower sensors. The decreasing radial gradient was in the range between 1,6 °C/m and 2,8 °C/m.

A different response has been noticed between the sensors installed below soil invert and those installed at the side walls. As a rule, comparing sensors with the same distance from the freezing pipes, the temperatures measured at a given time below the invert were higher than temper-

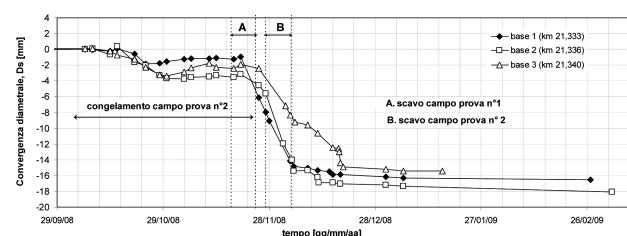


Fig. 13 - Spostamenti misurati nelle tre basi di calotta del campo prova n°2 durante la fase di congelamento, la fase di demolizione e scavo del campo precedente (A) e del campo n°2 (B). *Lining displacements measured in tunnel section n° 2 during the freezing and excavation stages (A = excavation of section n°1, B = excavation of section n°2). (Negative values indicate convergence).*

CONVEgni E CONGRESSI

È stato inoltre possibile definire le temperature operative per la fase costruttiva. I campi prova hanno, infatti, dimostrato che la demolizione e ricostruzione di un campo di arco rovescio della lunghezza di 12 m può essere completato in una settimana. Considerato che dalle analisi progettuali la massima temperatura nella fase di scongelamento era stata individuata pari a $T = -5^\circ\text{C}$ e che le misure dei campi prova hanno indicato la massima velocità di scongelamento pari a $0,6^\circ\text{C}/\text{d}$, la temperatura *target* T_o , raggiunta la quale gli scavi potevano avere inizio, è stata definita $T_o = -10^\circ\text{C}$, confermando quindi le preliminari ipotesi progettuali.

La dipendenza delle misure di temperatura dalla distanza sensore-sonde congelatrici e la differente risposta riscontrata tra sensori in arco rovescio e sensori ai piedritti, ha evidenziato la necessità di un'attenta analisi dei dati di monitoraggio. È stata quindi elaborata, sulla base dei risultati sperimentali, una procedura per la valutazione della temperatura *target*.

Secondo tale procedura la temperatura *target* è definita come il valore $T_o = -10^\circ\text{C}$ ottenuto come media dei valori misurati nel terreno congelato, considerando, però, separatamente i dati provenienti dai sensori ai piedritti e quelli dai sensori in arco rovescio, imponendo vincolante il soddisfacimento di tale requisito per i sensori in arco rovescio. Tale valutazione doveva essere sempre preceduta da controlli circa la qualità (ad es. verifica di eventuali malfunzionamenti dei sensori) e la rappresentatività dei dati (ad es. verifica attraverso il coefficiente di variazione). Sono stati inoltre definiti requisiti locali (ad es. la temperatura media di ciascuna sonda termometrica doveva rispettare la condizione: $T \leq -7,5^\circ\text{C}$) per scongiurare la presenza di puntuali difetti nella formazione dell'arco di terreno congelato.

6. La fase realizzativa

La ricostruzione dell'arco rovescio è stata eseguita su una tratta di galleria avente lunghezza di 325 m, secondo la stessa sequenza ciclica adottata nei campi prova:

1. congelamento di quattro campi (ciascuno con lunghezza di 12 m),

2. rimozione delle sonde congelatrici nel campo n° 1 al raggiungimento della temperatura *target* individuata secondo la procedura di cui al paragrafo precedente,

atutes measured at side walls. The maximum measured difference was $2,7^\circ\text{C}$.

The thawing process has been monitored for more than 2 weeks for each section. A non linear variation of temperature over time was measured and a faster heat of the ground was observed in the upper sensors (Fig.12).

Considering a period of time of 7 days the rate of thawing varies in the range from $0,36^\circ\text{C}/\text{day}$ to $0,58^\circ\text{C}/\text{day}$ with an average value of $0,4^\circ\text{C}/\text{day}$ for the sensors below the invert. For the sensors at the side walls the rate varies from $0,38^\circ\text{C}/\text{day}$ to $0,81^\circ\text{C}/\text{day}$ with an average value of $0,6^\circ\text{C}/\text{day}$.

The freezing process produced slight effects on the tunnel: in sections n° 2, 3 and 4 an average convergence of 4 mm was measured (Fig. 13). A different behaviour was observed in section n°1, where outward 6 mm displacements of the side walls were recorded.

Movements associated to the excavation stage were more significant; the data were also analysed considering the effect produced by the excavation of the adjacent section (Fig. 13).

5.6 Field trial results

The field experimental evidences validated the designed freezing system and helped in defining the time schedule of works and planning the construction site activities.

On the basis of the measured freezing rate, even considering the real brine temperature, the soil response appeared more similar to a sand behaviour, according to the simplified model used in the design stage.

Moreover, two operative temperatures were defined to guide the construction stage. Trial field demonstrated that the demolition and invert reconstruction of a 12 m long section could be completed in a week. Considering that the maximum acceptable average temperature of the thawing phase was calculated to be $T = -5^\circ\text{C}$, and the maximum measured rate of thawing was $0,6^\circ\text{C}/\text{day}$, the *target temperature* at which excavation could start was set $T_o = -10^\circ\text{C}$. Thus the design preliminary assumption was confirmed.

However, the dependence of the temperature measurements on the sensor-freeze pipes distance and the different response between invert sensors and side walls sensors highlighted the necessity of a careful analysis of mon-

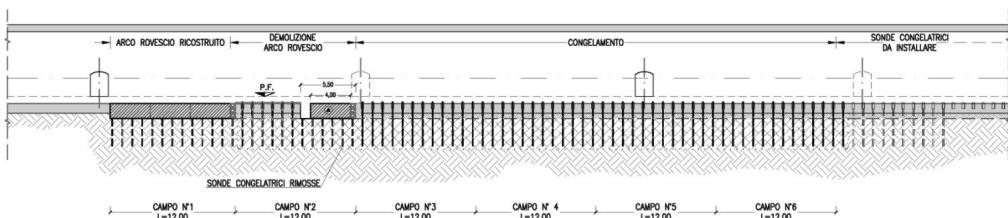


Fig. 14 - La sequenza di demolizione e ricostruzione dell'arco rovescio. The stages of tunnel invert reconstruction.

CONVEgni E CONGRESSI

3. congelamento del campo n° 5, in modo che, rispetto al campo in cui si esegue lo scavo (n° 1), fosse sempre garantita in avanzamento una lunghezza di 48 m di terreno congelato,

4. demolizione e ricostruzione dell'arco rovescio del campo n° 1, avanzando per conci successivi ciascuno di lunghezza pari a 4 m.

Completata la ricostruzione del primo campo, per i campi successivi è stata ripercorsa la stessa sequenza sopra descritta. La Fig. 14 illustra il ciclo di lavorazione con riferimento a titolo d'esempio alla situazione corrispondente alla fase 4 (demolizione e ricostruzione arco rovescio) del campo n°2: alle sue spalle il campo n° 1 è completamente ricostruito, mentre in avanzamento è attivo il congelamento di quattro campi.

Tutte le fasi esecutive sono state condotte con il controllo costante delle condizioni termiche e delle deformazioni del rivestimento.

La procedura per la valutazione della temperatura *target* si è dimostrata uno strumento fondamentale per la rapida analisi dei dati e per l'efficace controllo dei requisiti termici necessari per avviare in sicurezza le attività di scavo.

Il monitoraggio delle temperature ha dimostrato che la temperatura $T = 0^{\circ}\text{C}$ è stata raggiunta in 16 ± 20 giorni dall'attivazione del congelamento

Il monitoraggio degli spostamenti del rivestimento definitivo durante la fase di congelamento ha confermato che in generale la galleria ha subito una modesta convergenza, di qualche millimetro (2 ± 5 mm). In alcuni casi sono stati registrati anche spostamenti divergenti (allontanamento dei piedritti). I piedritti hanno di regola manifestato una modesta estensione (allontanamento dei punti di misura). Il differente comportamento osservato è senza dubbio connesso all'efficacia del collegamento strutturale tra piedritti ed arco rovescio (si veda ad esempio la Fig.9). Durante la demolizione e lo scavo dell'arco rovescio la convergenza media misurata è risultata pari a 14 mm.

Il monitoraggio di lungo termine ha fornito garanzie rispetto alla stabilizzazione dei fenomeni di convergenza indotti (si veda ad esempio la Fig.13) e ha verificato l'esaurirsi del processo di scongelamento. Le prove geotecniche condotte in situ, prima e dopo l'intervento di congelamento artificiale, hanno dimostrato che le proprietà meccaniche del terreno non sono state alterate.

7. Considerazioni conclusive

Il progetto dell'intervento di congelamento artificiale per la galleria Cassia – Monte Mario è stato un compito impegnativo, poiché ha richiesto la previsione del comportamento di un terreno modificatosi rispetto alle sue condizioni naturali in ragione della lunga serie di dissesti ed interventi di consolidamento succedutisi nel corso del tempo. Anche il comportamento strutturale

monitoring data. Thus, a procedure for the *target temperature* evaluation was developed.

This procedure defined the *target temperature* as the average value $T_o = -10^{\circ}\text{C}$ measured in the frozen soil, considering separately data from the side walls sensors and invert sensors; moreover various controls of the quality and representativeness of the data were required (e.g. the coefficient of variation). Additional requirements (e.g. the average temperature for each temperature tube $T \leq -7,5^{\circ}\text{C}$) were also implemented to ensure about local fails in the formation of the frozen soil.

6. Construction phase

The invert reconstruction was carried out for a total tunnel length of 325 m, according to the cyclic sequence that was tested in the trial field:

1. freezing of four sections in advance (each with a length of 12 m),

2. removal of the freeze pipes in the first section when the target temperature in the frozen soil was reached according to the procedure above described,

3. freezing of the fifth section, in order to provide a length of 48 m of freezing soil in advance,

4. demolition and reconstruction of the invert of the first section, advancing for stages with a length of 4 m each.

Figure 14 shows the cyclic sequence of construction stages, with reference to the example of stage n° 4 in the section n°2.

All the execution stages have been carried out with the constant control of thermal conditions and lining deformations.

The procedure for the *target temperature* evaluation has proved to be a useful tool for a rapid data analysis to control the thermal requirements for excavation.

Monitoring of the temperatures demonstrated that the thermal condition $T = 0^{\circ}\text{C}$ was reached between 16 and 20 days.

Monitoring of the movements inside the tunnel during the freezing stage confirmed that in most cases the tunnel underwent a convergence of some millimetres (2 ± 5 mm). Outward movements of the side walls have also been recorded. Side walls generally suffered slight extensions. The different pattern of deformation appears indeed to be related to the effectiveness of the structural continuity between the old invert and side walls (e.g. Fig.9). During the excavation stage the average measured convergence was about 14 mm.

Long term monitoring ensured about the stabilization of induced movements (e.g. Fig.13) and proved the end of thawing process. In situ investigations (cone penetration tests) were carried out before and after the freezing process: the results demonstrated that mechanical properties were not affected by artificial freezing.

CONVEGNI E CONGRESSI

del rivestimento esistente, d'altra parte, era di difficile schematizzazione per i differenti materiali e metodi di esecuzione adottati nelle diverse fasi di realizzazione della galleria.

In tale contesto, la sperimentazione in scala reale, basata su campi prova, ha rappresentato una fase essenziale del processo progettuale, permettendo di conseguire le necessarie conoscenze sull'evoluzione del processo di congelamento artificiale del terreno, come utile completamento delle indagini geotecniche e delle analisi teoriche.

L'insieme dei risultati provenienti dalla sperimentazione e dalle analisi hanno consentito un'efficace pianificazione della fase costruttiva e il rifacimento dell'arco rovescio è stato completato con successo su tutta la tratta d'interesse.

Il monitoraggio di lungo termine e le indagini geotecniche in situ hanno testimoniato che le attività di demolizione e ricostruzione dell'arco rovescio sotto congelamento si sono svolte senza conseguenze sul rivestimento esistente e in superficie.

7. Conclusions

The design of the ground freezing application to the Cassia – Monte Mario tunnel was a challenging task, as it required the prediction of the behaviour of a soil which has suffered modifications from its natural state in the long history of tunnel instabilities and ground improvements. The structural behaviour of the existing lining was also not easily to predict because of the different methods of tunnel execution which were adopted over time.

In this complicated context, real-scale trial fields were an important step of the design stage, giving a deeper insight into the temperature field in the frozen soil body, the rate of freezing and thawing and the associated volume changes. An effective planning of the execution was carried out on the basis of the field testing and the invert reconstruction was successfully completed.

Long term monitoring and in situ tests have allowed to verify the complete exhaustion of the freezing process without any adverse consequences on the existing lining and on the ground surface.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] CRIPPA C., MANASSERO V., LEONI F. (2007). Il congelamento artificiale dei terreni : previsioni progettuali e monitoraggio in corso d'opera. Atti del XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica, Padova, 16-18 May 2007. Bologna: Patron editore.
- [2] COLOMBO G., CAVAGNA B., CASSANI G., MANASSERO V. (2009). La tecnica del congelamento artificiale del terreno per lo scavo delle gallerie di stazione della metropolitana di Napoli. *Gallerie e grandi opere sotterranee*, 89, 23-34.
- [3] HARRIS J.S. 1995. *Ground freezing in Practice*. Thomas Telford.
- [4] ANDERSLAND O.B., LADANYI B. (2004). *Frozen Ground Engineering*. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [5] SAYLES F. H., BAKER T.H.W., GALLAVRES F., JESSBERGER H.L., KINOSITA S., SADOVSKIY A.V., SEGO D., VYALOV S.S. (1987). Classification and laboratory testing of artificially frozen ground. *Journal of Cold Regions Engineering*, 1, 22-48.
- [6] LUNARDI P., LEONI F., VALENTE A. (2001). Full scale test of grouting and freezing for new extension of Rome underground, line B1. Atti del Convegno Internazionale AITES-ITA World Tunnel Congress "Progress in tunnelling after 2000"; Milano, 10-13 June 2001. Bologna: Patron editore.
- [7] SANGER F.J. & SAYLES F.H. (1979). Thermal and rheological computations for artificially frozen ground construction. *Engineering Geology*, 13, 311-337.