Il congelamento del terreno può risolvere situazioni difficili di scavo sotto battente di falda

A. BALOSSI RESTELLI*

SOMMARIO. Viene descritta l'esperienza di un importante intervento di congelamento del terreno che ha consentito di risolvere un difficile problema di scavo di galleria immersa in falda.

Il congelamento è stato condotto in una zona centrale di Milano, fortemente urbanizzata, a metà circa di C.so di Porta Romana, dove la presenza di fabbricati di ogni tipo ed età ed il traffico molto intenso hanno reso le operazioni ancora più delicate.

Nell'articolo si commentano le differenti soluzioni adottate a seconda delle necessità derivanti dalla gestione degli scavi e dei getti del rivestimento ed in funzione anche delle varie forme di galleria e della posizione dello strato di limo presente nella zona più profonda dei cavi da realizzare sotto battente fino a 6 m.

Vengono descritti i dettagli tecnologici più significativi ed anche le difficoltà incontrate, allo scopo di favorire in futuro, nel caso di interventi similari, l'adozione degli accorgimenti e delle tecnologie più adeguate.

Si è inoltre approfittato di questo cantiere di ampie proporzioni per studiare meglio ed approfondire le conoscenze che già si avevano nei confronti sia delle resistenze ottenibili nell'ambito del masso congelato, sia delle deformazioni indotte nel caso di presenza di fabbricati ed anche in assenza di controspinta.

Tenuto infine conto della velocità e del grado di consolidamento raggiungibile nei terreni ghiaiosi-sabbiosi ed anche misti rocciosi e della precisione geometrica che garantisce la continuità del setto impermeabile, l'Autore auspica che l'«alternativa congelamento» venga d'ora in poi presa in considerazione dai progettisti, anche per situazioni più normali e per problemi meno difficili di quello qui descritto.

1. Generalità

La tecnica del congelamento del terreno viene considerata, soprattutto in Italia, forse ingiustamente, un qualcosa cui si debba ricorrere in casi di estrema difficoltà, quando cioè non possono essere utilizzati altri sistemi atti a migliorare le caratteristiche di resistenza ed impermeabilizzazione di una formazione debole.

Eppure il congelamento presenta dei pregi importanti, spesso sottovalutati, quali la garanzia di omogeneità del trattamento, il notevole grado di resistenza perseguibile, la non alterazione della situazione chimico/fisica del terreno e della falda.

Questi vantaggi innegabili sono sempre difficili da valutare economicamente, ma concorrono in modo determinante alla riuscita del trattamento ed al rispetto dei tempi di intervento, in quanto le probabilità di anomalie in corso d'opera sono assai remote.

Tutto considerato non è assolutamente detto che il congelamento debba necessariamente venire a costare più caro di altri sistemi.

Da tanto tempo si auspica che progettisti e gestori di grandi opere geotecniche entrino nell'ordine di idea di inserire normalmente in sede progettuale questa tecnologia nella rosa delle possibilità per risolvere anche problemi di media difficoltà.

È anche probabile che un utilizzo più frequente del congelamento porti con sè una certa riduzione dei costi di fornitura dell'azoto liquido.

* Dott. Ing. Achille Balossi Restelli - Studio di Ingegneria Civile - Milano

Si ritiene importante divulgare l'esperienza acquisita a Milano nel corso dei lavori del lotto 2B della MM, in quanto si tratta di un intervento assai peculiare condotto in una zona della città densamente abitata, con presenza di edifici di notevole mole e con fondazioni assai prossime alla galleria.

2. Metropolitana Milanese - Lotto 2B

Il lotto 2B con la sua estensione di circa 2km è uno dei più importanti dell'intera linea 3 della MM ed i problemi conseguenti al suo tracciato plano-altimetrico lo rendono decisamente uno dei più difficili e complessi che mai siano stati affrontati a Milano sino ad oggi.

In particolare la scelta di realizzare la linea mediante la soluzione delle gallerie a binari sovrapposti, ha fatto sì che le gallerie inferiori risultassero per buona parte immerse nella falda freatica con battente fino a 6 metri.

Questo fatto ha originato situazioni assai delicate, alcune delle quali hanno potuto essere superate solamente con l'impiego del congelamento del terreno.

3. Particolarità stratigrafiche del terreno interessato dagli scavi in falda

Il terreno di Milano è costituito da depositi alluvionali dove si alternano strati di ghiaia più o meno

pulita a strati misti più chiusi di ghiaia e sabbia con presenza di limo; frequenti sono le bancate di sabbia medio fine omogenea, più rari gli strati decisamente limosi.

Per conferire a questo tipo di terreno un buon grado di consolidamento e l'impermeabilizzazione necessaria per consentire lo scavo in sicurezza delle gallerie in falda si sono generalmente impiegati due tipi di miscele: infatti la sospensione classica, pur essendo costituita da cemento fine, non ha potuto risolvere totalmente il problema della tenuta idraulica ed ha dovuto essere spesso integrata da una soluzione chimica non inquinante capace di penetrare i vuoti più piccoli fornendo anche ai terreni più fini una buona coesione.

Per dare un'idea delle formazioni alluvionali incontrate, in figura 1 vengono esposte le curve granulometriche più caratteristiche delle differenti bancate.

Come si può notare queste sono comprese in un «fuso» che si estende dalle sabbie fini ($d_{10} \geq 0{,}02$ mm) fino alle ghiaie grossolane.

Gli strati limosi sono un'eccezione.

4. Il tracciato e la geometria delle opere

Il lotto 2B si estende da piazza del Duomo a Porta Romana, per una lunghezza di circa 2 chilometri.

La geometria del manufatto, molto variabile, comprende gallerie a doppio ed a singolo binario, parallele o sovrapposte, come è schematicamente esposto in figura 2.

La soluzione delle gallerie sovrapposte è stata adottata in due delle tre stazioni comprese in questo tratto (Missori e Crocetta) ed in quasi tutta la linea, allo scopo di ridurre al minimo l'ingombro sotto i fabbricati.

La base degli scavi è situata generalmente tra 2 e 6 m sotto falda.

Le gallerie superiori sono state costruite realizzando in prima fase un cunicolo di preavanzamento e successivamente gli allarghi, resi possibili dal preventivo consolidamento del terreno circoscritto alla sezione di scavo.

Gli scavi delle gallerie inferiori hanno potuto essere eseguiti previo trattamento di consolidamento ed impermeabilizzazione svolto a partire dal soletone intermedio (Fig. 3).

5. La situazione anomala risolta con il congelamento

Nella fase realizzativa si è verificato che il trattamento con iniezioni miste, nelle zone dove il diametro efficace del terreno risultava $d_{10} > 0{,}02$ mm, ha sempre consentito lo scavo di gallerie senza dare luogo a sensibili inconvenienti, anche sotto battente di falda.

Infatti le sporadiche venute d'acqua localizzate in corrispondenza delle pareti laterali e legate alla giacitura suborizzontale delle stratificazioni, hanno sempre potuto essere controllate e bloccate con semplici interventi puntuali a mezzo di iniezioni tipo Joosten (iniezione contemporanea di cemento e silicato di sodio nelle aperture «beanti»)

La vera sorpresa, che ha comportato la rottura dell'arco di consolidamento e l'innesco di fenomeni di sifonamento (arrestati con notevole difficoltà mediante ricariche di materiale), è stata quella della presenza di uno strato di limo di circa un metro di potenza localizzato nella delicatissima zona del fondo dello scavo della galleria inferiore.

Questa situazione ha coinvolto una tratta di 300 m circa in zona Crocetta.

La meccanica della rottura dell'arco rovescio e delle venute d'acqua attraverso l'arco rovescio stesso è illustrata nella figura 4.

Come si può notare,malgrado un trattamento integrativo eseguito a rinforzo laterale dei piedritti, lo strato di limo disposto nella parte superiore dell'arco consolidato ha provocato il cedimento dell'arco stesso per la seguente serie di motivi concomitanti:

- lo spessore del terreno consolidato che i calcoli (elementi finiti) avevano definito dovesse essere di almeno 2,50 m per garantire la stabilità del cavo, si è ridotto del 40% non essendo il limo trattabile con le miscele di iniezione;
- lo strato limoso, di per sè poco permeabile, non ha consentito quell'effetto di drenaggio che avrebbe potuto ridurre le forze di sottopressione;
- la deformazione dello strato di limo, una volta completamente liberato dallo strato di terreno superiore, ha provocato alcune rotture, soprattutto per effetto di taglio, che si sono generalmente manifestate alla base dei piedritti, laddove si concentravano gli sforzi maggiori.

L'acqua ha avuto così modo di percolare abbondantemente all'interno dello scavo, accompagnata anche da materiali fini (sabbie e limi); si sono allora intraprese faticose operazioni di drenaggio e di ricariche per opporsi immediatamente ai sifonamenti.

In un primo momento si è tentato di eseguire ulteriori trattamenti addizionali di rinforzo con iniezioni di miscele silicatiche nella speranza di riuscire ad eseguire ugualmente lo scavo, secondo campioni di dimensioni molto limitate.

Ed infatti, con grande difficoltà e dispendio di tempo, si è riusciti a completare una decina di metri di arco rovescio.

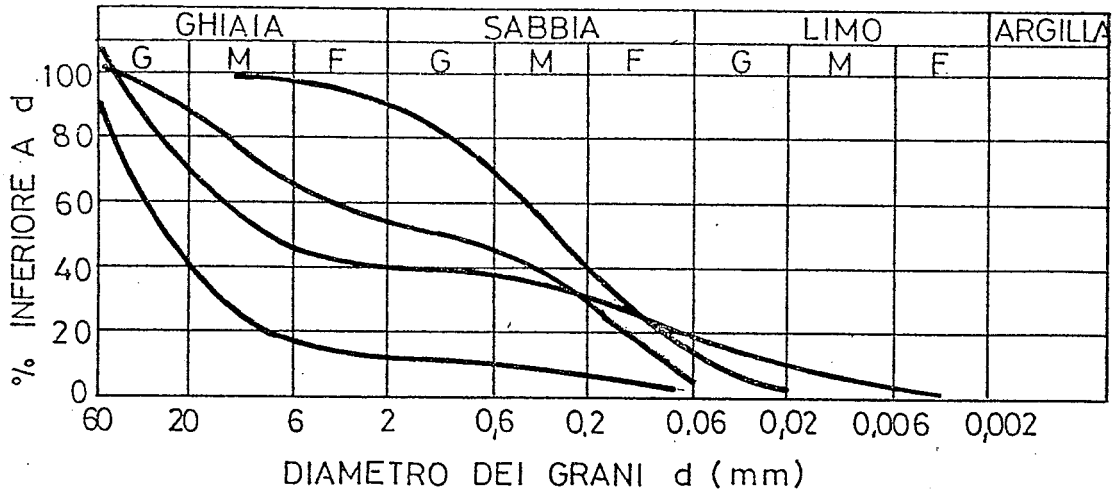


Fig. 1 - Curve granulometriche tipiche dei terreni alluvionali di Milano, consolidati con trattamento misto di: sospensioni stabili cemento-argilla (o bentonite); soluzioni colloidali (gel di silice da semi-duri a duri).

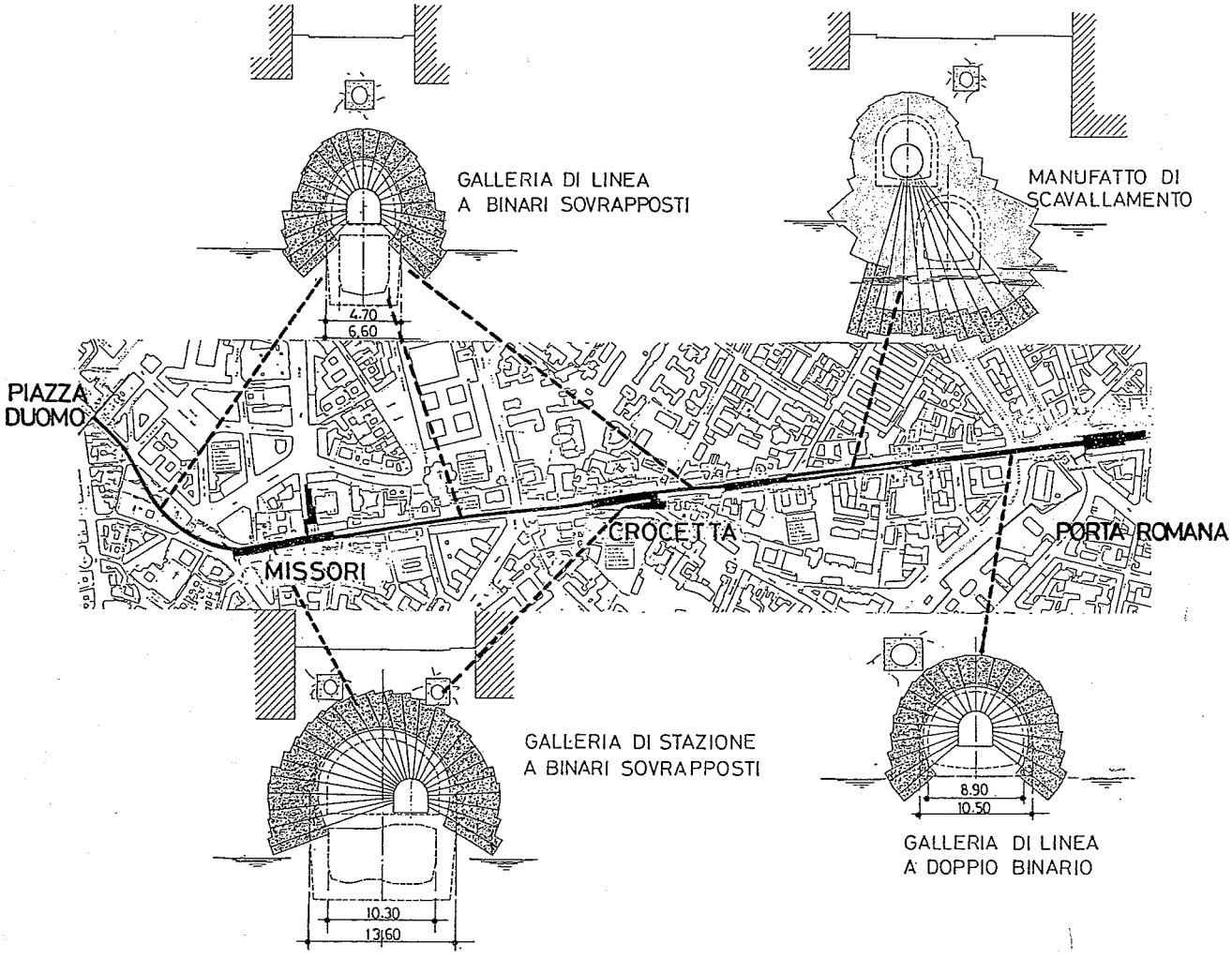


Fig. 2 - Il tracciato del lotto 2B della MM. I vari tipi di sezione di galleria realizzati.

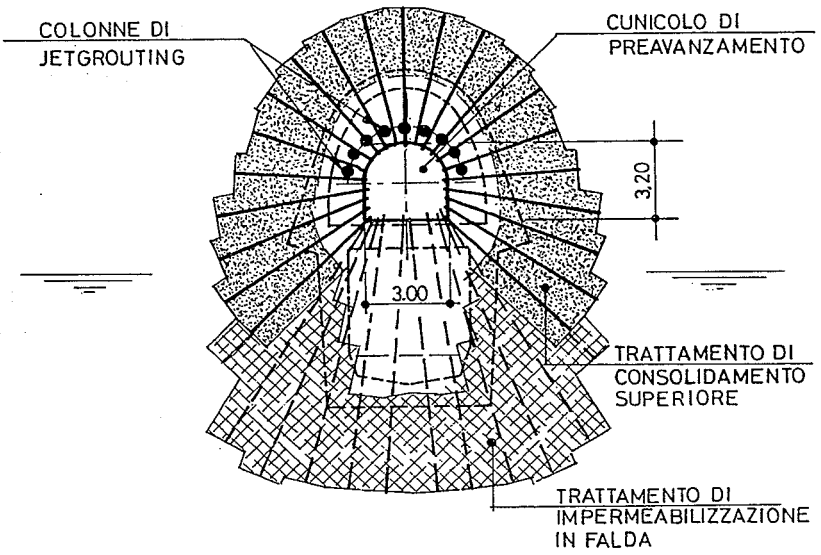


Fig. 3 - Galleria a binari sovrapposti. Schemi dei trattamenti di consolidamento ed impermeabilizzazione.

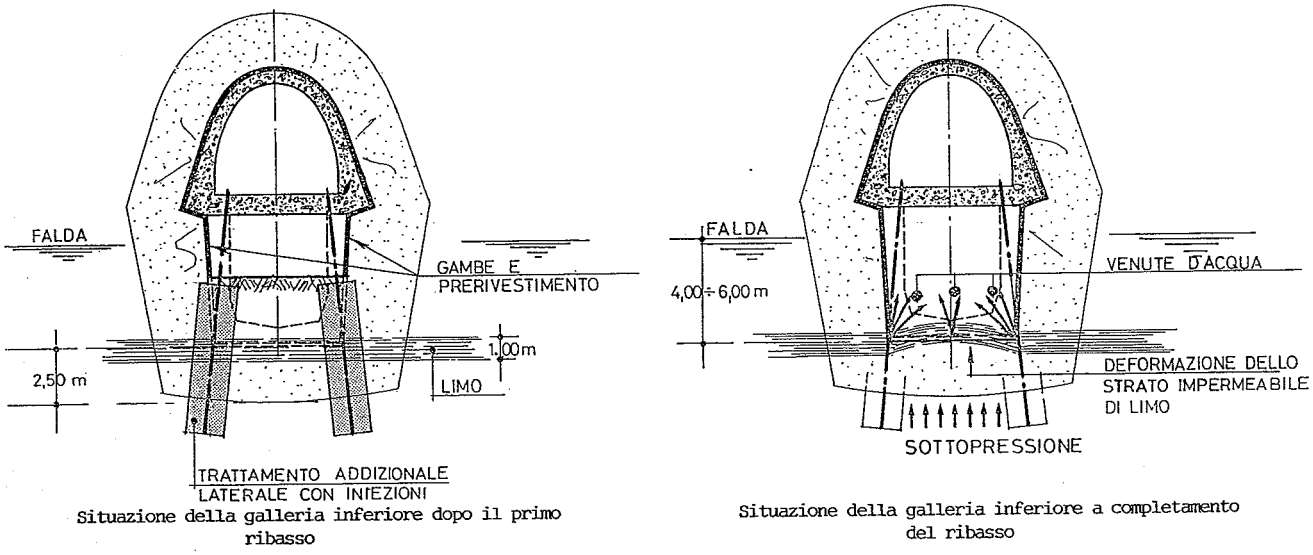


Fig. 4 - La presenza dello strato di limo e la meccanica della rottura dell'arco rovescio.

Ma i gravi rischi di ulteriori fenomeni di sifonamento e di compromissione degli edifici sovrastanti, hanno imposto l'adozione del congelamento quale unico mezzo per fornire un buon grado di consolidamento allo strato limoso.

Siamo dunque di fronte qui ad uno di quei casi limite di estrema difficoltà, come accennato nelle premesse, dove il congelamento viene ad essere l'unica soluzione possibile.

5.1. *La tecnologia di congelamento adottata*

Non si ritiene di dovere in questa sede illustrare nel dettaglio la tecnica del congelamento che è già nota ed è stata oggetto di numerose pubblicazioni recenti.

Sembra invece opportuno, dopo un richiamo molto generale delle differenti metodologie, porre l'accento sulle motivazioni che hanno originato la scelta di utilizzare l'azoto liquido.

Come si ricorderà il congelamento del terreno viene ottenuto utilizzando un fluido frigorifero fatto circolare in sonde congelatrici collocate in apposite perforazioni, secondo la geometria imposta dalla forma e dalle caratteristiche meccaniche della struttura di progetto.

La scelta del fluido frigorifero, e di conseguenza delle temperature di utilizzazione, deve essere fatta con attenzione considerando i requisiti che la struttura congelata deve conseguire nel tempo.

Il fluido definisce i diversi procedimenti di congelamento:

- metodo diretto (a ciclo aperto) che utilizza un liquido a bassissima temperatura (azoto) che vaporizza nelle sonde congelatrici e viene successivamente disperso nell'atmosfera (Fig. 5);
- metodo indiretto (a ciclo chiuso), in cui un liquido frigorifero (salamoia) percorre senza interruzione un circuito chiuso costituito dalle sonde congelatrici in serie e da uno scambiatore di calore facente parte di un impianto frigorifero, mantenendo pressochè inalterata la temperatura di utilizzazione (Fig.6);
- metodo misto, che utilizza in fasi diverse o complementarmente i due procedimenti descritti.

Nel caso in oggetto è stato scelto il metodo diretto per i seguenti motivi:

a) di natura logistica
- spazi a disposizione limitati
- impossibilità di installazione di impianti frigoriferi rumorosi per il raffreddamento della salamoia

b) di natura programmatica
- necessità di raggiungere rapidamente (70-80 ore) la formazione del guscio di ghiaccio per garantire la continuità delle operazioni di scavo fra una tratta e l'altra

c) di natura tecnica
- a causa della particolare sequenza delle operazioni di congelamento e di scavo secondo tratte successive e della conseguente impossibilità di eseguire i normali mantenimenti in arco rovescio per l'eliminazione delle relative sonde congelatrici, diveniva indispensabile raggiungere livelli molto bassi di temperatura e quindi resistenze meccaniche del terreno molto alte.

  Cio' avrebbe assicurato una riserva criogenica nel terreno sufficiente per potere concludere in sicurezza tutti i lavori (scavi e getti) di ciascuna tratta nell'arco di una settimana.

METODO DIRETTO (CICLO APERTO)

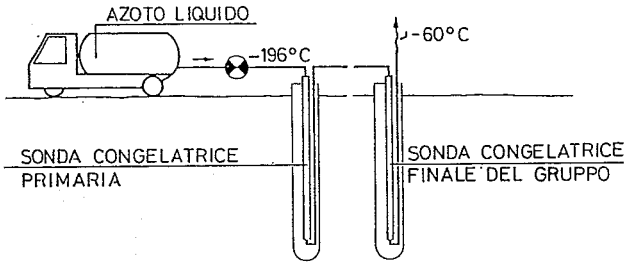


Fig. 5

METODO INDIRETTO (CICLO CHIUSO)

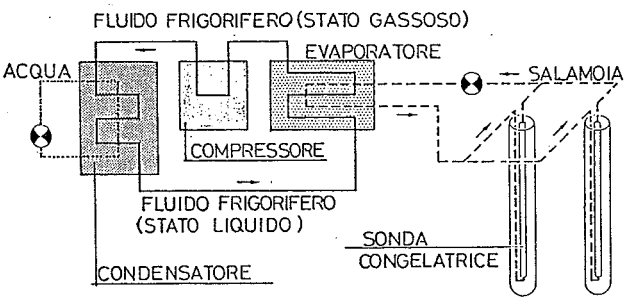


Fig. 6

5.2. *Congelamento con azoto liquido*

Come è noto, l'azoto allo stato liquido viene trasportato in cantiere in apposite cisterne, in cui è mantenuto ad una temperatura di -196 °C e ad una pressione di circa 2 atmosfere (-196 °C è la sua temperatura di passaggio di stato).

In cantiere, generalmente, l'azoto liquido è conservato in analoghe cisterne di stoccaggio a doppia parete sotto vuoto, in cui mantiene le proprie caratteristiche fisiche fino al tempo di utilizzazione.

L'immissione nel circuito avviene in modo diretto utilizzando come spinta la pressione stessa formatasi all'interno dei serbatoi, che puo' essere regolata con appositi evaporatori.

Attraverso un tubo di distribuzione l'azoto liquido viene fatto affluire alle sonde congelatrici, suddivise in gruppi, nell'ambito dei quali sono collegate tra loro in serie.

L'ultima sonda di ogni gruppo è dotata di uno scarico, regolato da una saracinesca, attraverso il quale l'azoto gassoso viene liberato nell'atmosfera (nel caso in oggetto convogliato alla sommità del pozzo).

Ogni sonda congelatrice è costituita da due tubi in acciaio coassiali, collegati tra loro da una testa speciale, che consente il passaggio del fluido proveniente dal circuito di distribuzione (o dalla sonda precedente posta in serie) al tubo interno più piccolo.

L'azoto risale quindi nella intercapedine tra i due tubi e successivamente passa nella sonda congelatrice posta immediatamente a valle (oppure, se si tratta di una sonda terminale, al tubo di efflusso).

Il tubo congelatore esterno, che deve essere perfettamente ermetico, è realizzato in modo tale da sopportare la bassissima temperatura di utilizzazione ed è collegato al terreno circostante con una miscela cementizia caratterizzata da un alto coefficiente di conducibilità termica.

La corretta posa delle sonde e la scelta dei materiali più idonei rivestono carattere di prioritaria importanza per la riuscita dell'operazione di congelamento: è assolutamente necessario evitare qualsiasi fuga di azoto nel terreno.

L'immissione dell'azoto liquido in ciascuno dei vari gruppi di sonde, posti in parallelo sull'anello di distribuzione, è regolata per mezzo di speciali valvole; la portata puo' quindi essere modificata localmente a seconda delle necessità.

È importante disporre di una notevole flessibilità del sistema per potere governare la distribuzione del freddo in funzione delle temperature mano mano ottenute e registrate nelle varie porzioni di terreno, e per ottenere di conseguenza la corretta omogeneità del trattamento.

Inoltre è conveniente verificare in fase operativa la temperatura del gas in uscita dai vari gruppi di sonde.

La buona riuscita del congelamento con azoto liquido è strettamente legata ad una serie di fattori, quali ad esempio la corretta progettazione idraulica delle distribuzioni, l'interasse tra le sonde, la definizione della lunghezza ottimale da attribuire alle sonde congelatrici poste in serie in ogni singolo gruppo.

Il notevole rendimento criogenico dell'azoto consente sia la rapidissima costituzione della struttura di terreno congelato, nell'ordine di 2-4 giorni, sia la possibilità di affrontare situazioni difficili, costituite ad esempio dall'esistenza di correnti subalvee (di lieve entità).

Il calore specifico di vaporizzazione dell'azoto liquido è di 39 Kcal/l, mentre il calore assorbito dal gas tra la temperatura di passaggio di stato e quella di dispersione nell'atmosfera (all'incirca attorno ai −60 °C) è di 27 Kcal/l.

Durante il passaggio di stato da liquido a gas si ha dunque un assorbimento di calorie pari a circa il 70% del quantitativo totale.

Il punto di passaggio di stato varia continuamente nel corso del congelamento. Tende a spostarsi, in ogni gruppo, dalla prima sonda alla sonda terminale risalendo mano mano lungo l'intercapedine tra i due tubi coassiali; così viene ad interessare tutte le sezioni del terreno, provocando la formazione di una struttura congelata omogenea.

Interviene successivamente la *fase di mantenimento* in freddo, per garantire sempre al terreno le caratteristiche meccaniche di progetto durante l'esecuzione delle opere di scavo e getto.

In questa fase l'azoto liquido è introdotto nel circuito tutte le volte che i termometri segnalano temperature nel terreno superiori a quelle previste.

Queste vengono allora riportate ad un valore inferiore a quelle corrispondenti al coefficiente di sicurezza assunto nel calcolo della struttura (Fig. 7).

Il *controllo delle temperature* del terreno si effettua mediante lettura diretta con termocoppie introdotte a differenti quote negli appositi fori di controllo attrezzati, in varie sezioni ed a differenti distanze dall'asse del congelamento, per definire con la maggiore precisione possibile i gradienti termici nell'ambito del muro congelato.

La rappresentazione grafica di tutti i punti di controllo offre la visione d'insieme della reale consistenza della struttura che mano mano si sta formando, mettendone in evidenza gli eventuali punti deboli e rendendo possibili interventi localizzati al fine di ristabilire il necessario grado di omogeneità.

La gestione dell'impianto di congelamento richiede grande attenzione e notevole esperienza.

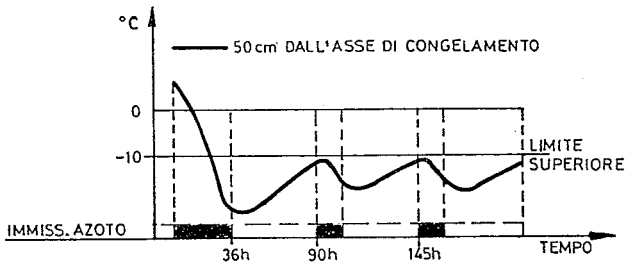


Fig. 7 - Andamento tipico delle immissioni di azoto liquido nel corso delle fasi di congelamento e mantenimento in freddo.

6. Le differenti strutture di terreno congelato realizzate nel lotto 2B

A seguito dell'incidente occorso e delle ricariche con terreno trasportato da scavi prossimi alla zona, è stata condotta una campagna di sondaggi molto accurata, che ha consentito di ricostruire con buona precisione la distribuzione stratigrafica e la tipologia dei terreni nella parte più profonda della galleria, attorno all'arco rovescio.

L'indagine era soprattutto mirata ad individuare quegli strati prevalentemente limosi impossibilitati ad essere permeati dalle iniezioni.

La loro distribuzione e potenza rispetto alla geometria del cavo ha consentito di elaborare differenti geometrie di congelamento che riportiamo negli schemi allegati a),b),c),d) di Fig. 8.

7. Il congelamento totale

Le figure 9,10,11 riportano lo schema di congelamento totale, o di «massa», adottato nelle tratte di

galleria con condizioni stratigrafiche più critiche.

In particolare le figure 10 e 11 evidenziano la sezione «scatolare» che si realizza tutt'attorno alla tratta da scavare oggetto di ogni fase di congelamento.

I due muri laterali ed il muro di setto «in avanti» possono essere mantenuti anche durante le operazioni di scavo; le sonde congelatrici centrali vengono invece staccate all'inizio di dette operazioni.

La lunghezza delle tratte di scavo dipende dal tempo di decongelamento della zona centrale e dalle difficoltà insite nelle operazioni di scavo.

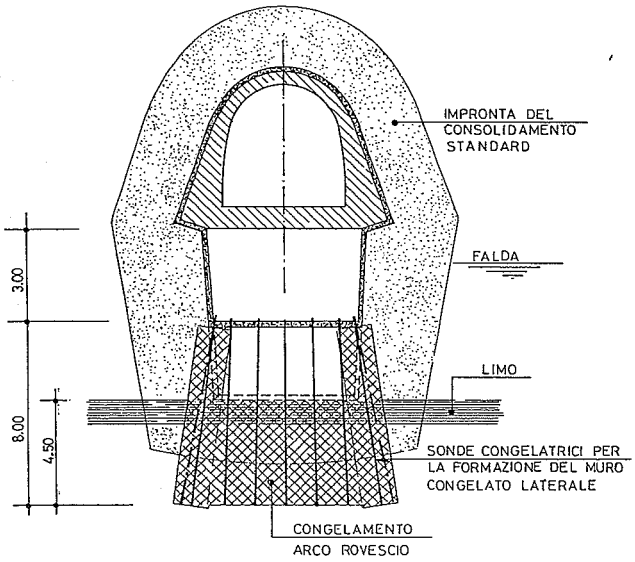


Fig. 8a - Congelamento totale: livello limoso di notevole potenza interessante buona parte dell'arco di consolidamento a ridosso del fondo scavo.

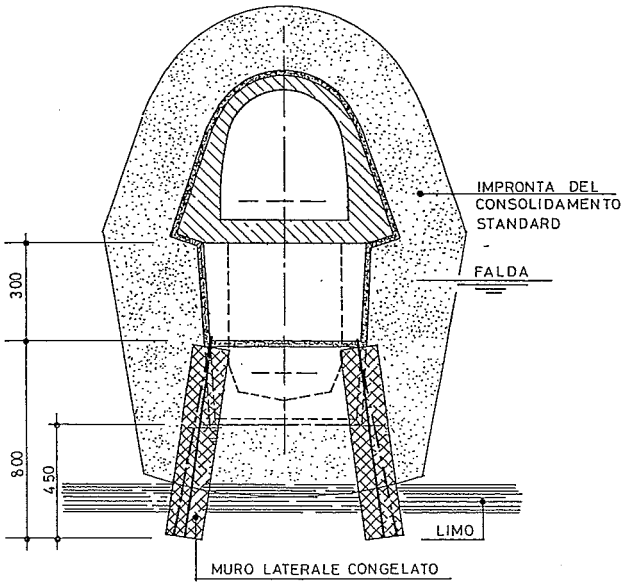


Fig. 8b - Congelamento laterale: livello limoso posto in prossimità del limite inferiore dell'arco di consolidamento.

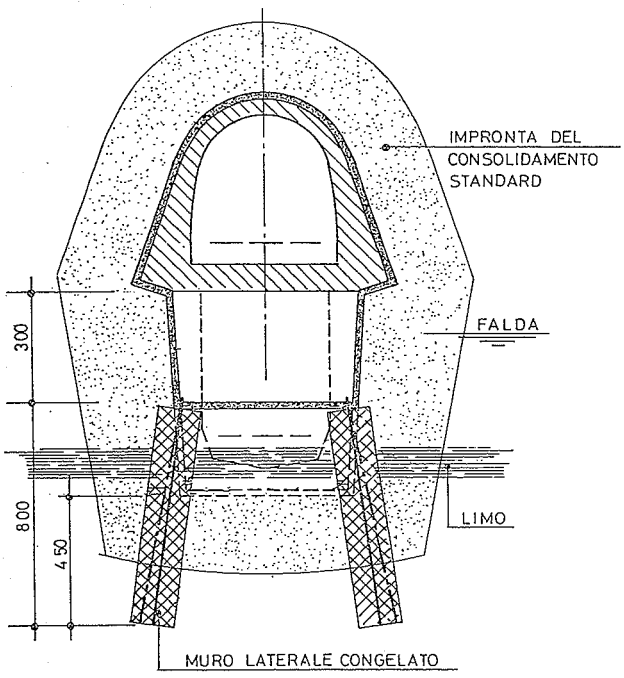


Fig. 8c - Congelamento laterale: livello limoso interessante i piedritti del consolidamento standard.

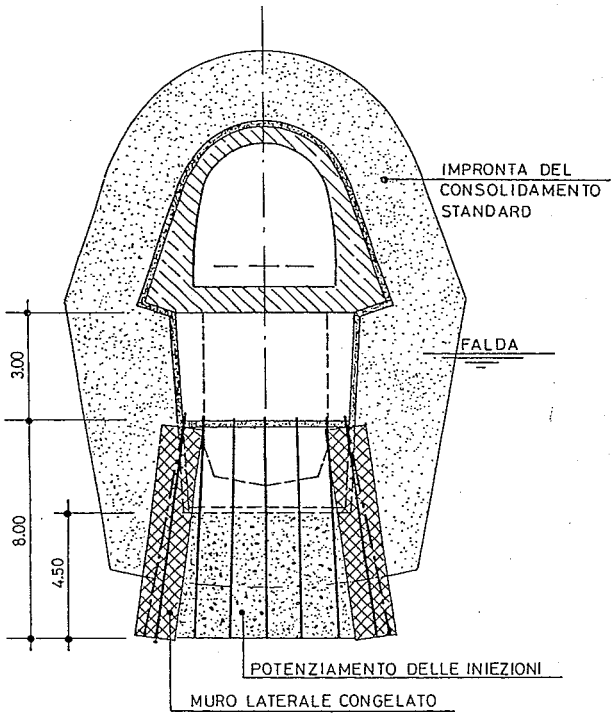


Fig. 8d - Congelamento laterale e potenziamento del fondello con iniezioni cementizie e chimiche: terreno costituito prevalentemente da sabbie molto limose.

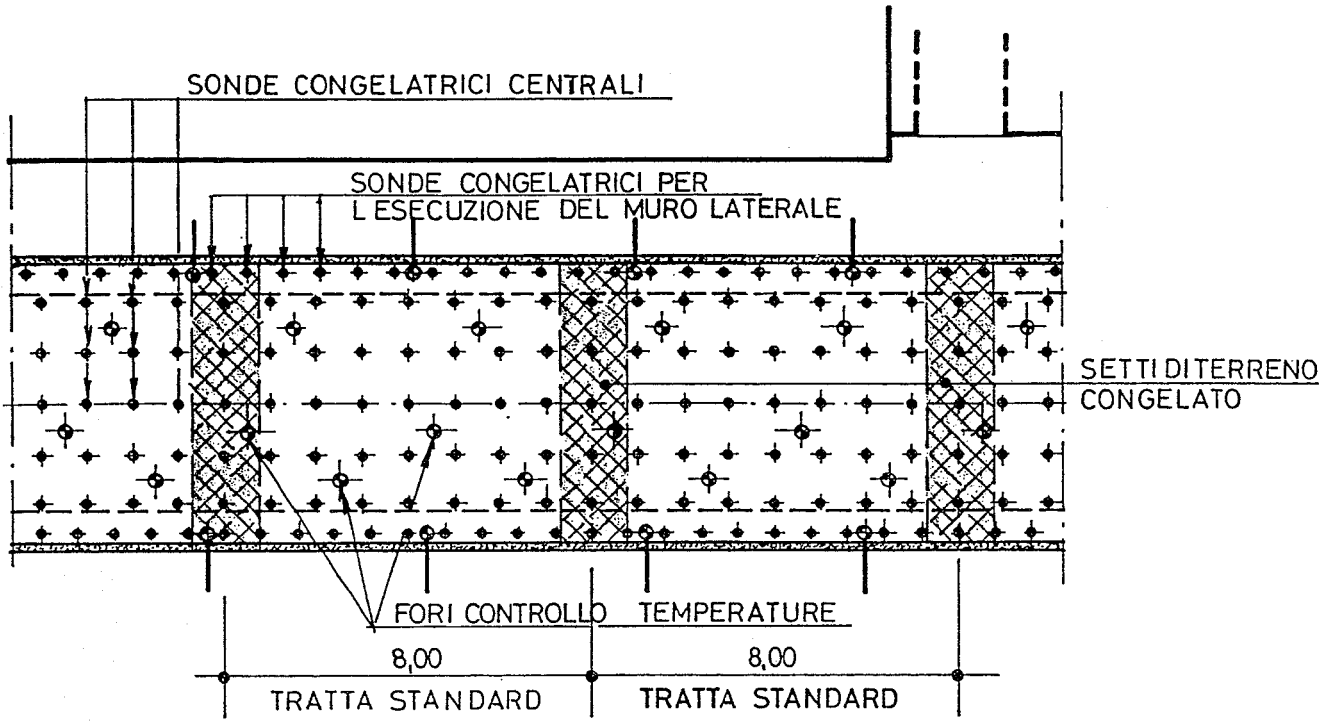


Fig. 9 - Il trattamento di congelamento di «massa» visto in planimetria.

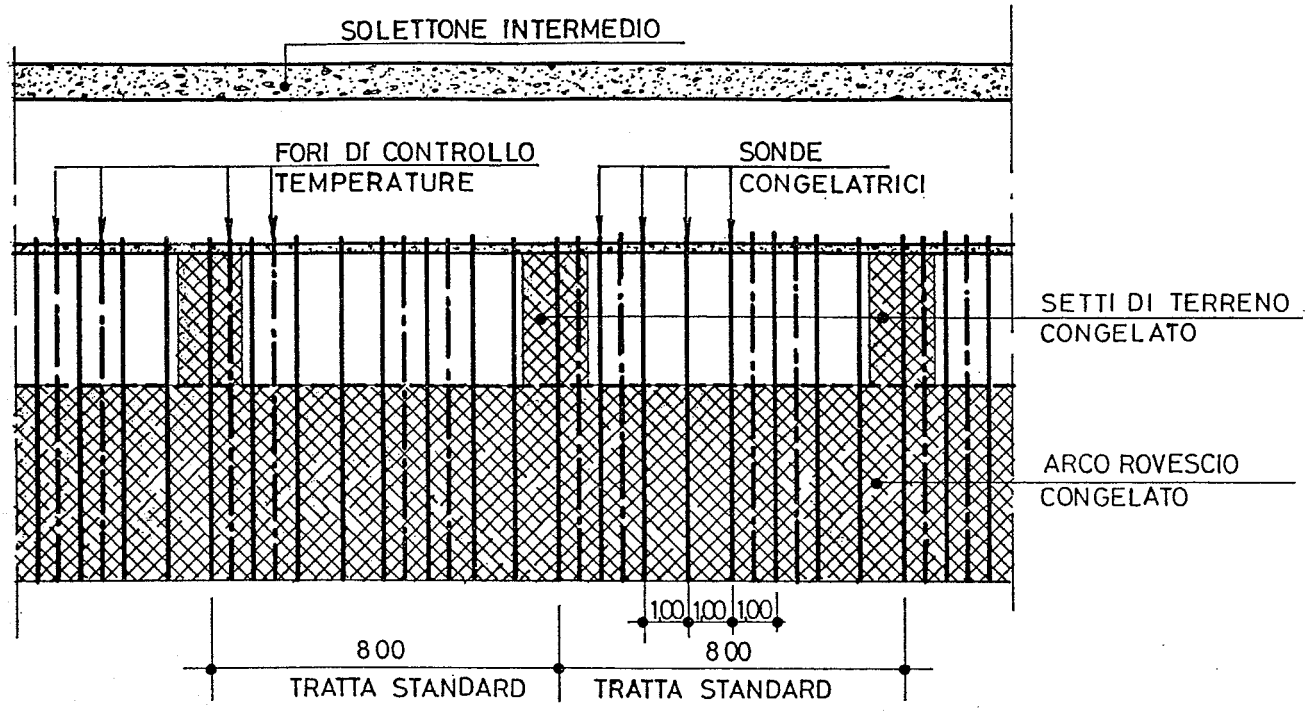


Fig. 10 - Il congelamento di tratte successive visto in sezione longitudinale.

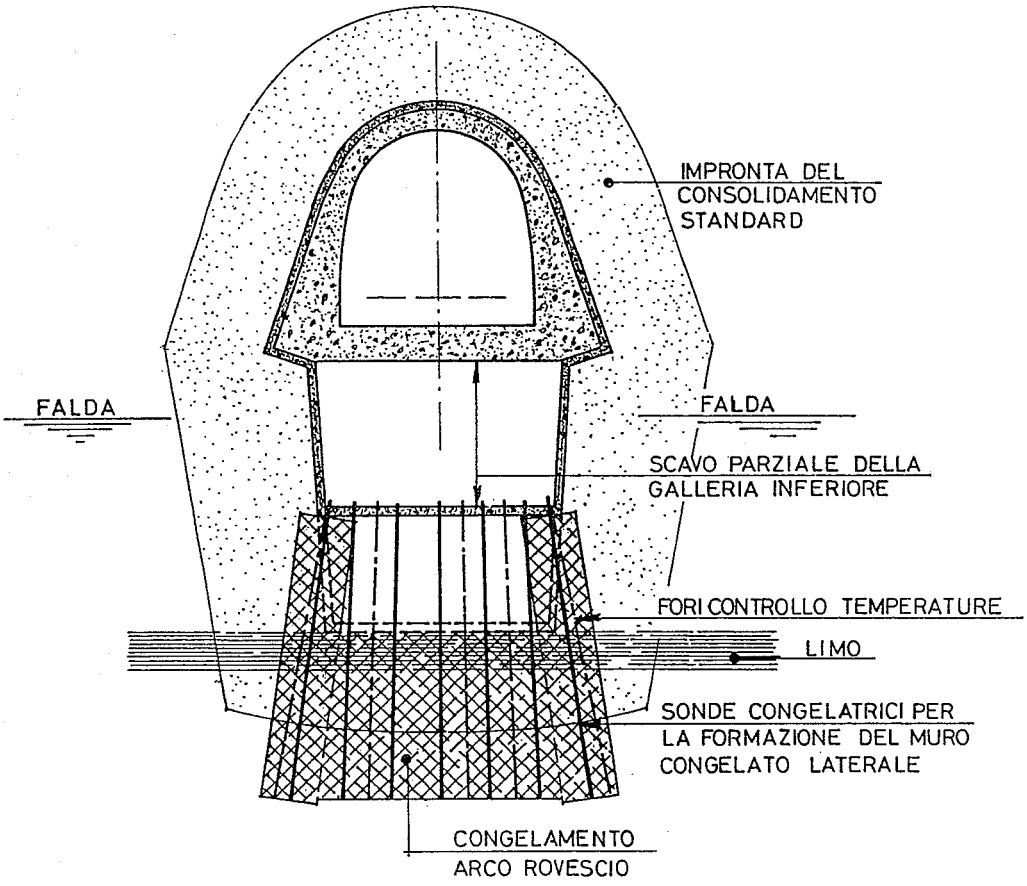


Fig. 11 - Il congelamento scatolare di «massa» in sezione trasversale.

8. Descrizione dell'operazione di congelamento di una tratta standard

Le figure 9, 10 e 11 mostrano lo schema adottato per le tratte standard nelle zone della linea in cui si è applicata la tecnica del congelamento totale.

Nelle zone oggetto di congelamento, allo scopo di facilitare le operazioni connesse, si è dovuto realizzare in primo luogo lo scavo parziale della galleria inferiore.

Tale scavo, condotto in presenza di un limitato battente di falda, ha potuto essere effettuato grazie al consolidamento precedentemente realizzato.

Di conseguenza la perforazione per la posa delle sonde congelatrici è stata condotta sotto pressione idraulica e spinta ben oltre il vecchio limite di consolidamento.

Al fine di compensare l'inevitabile rifluimento di materiale fine durante la perforazione e la conseguente decompressione del terreno, si è spesso dovuto intervenire con delicate operazioni di «Joosten», realizzate mediante tubi di rame posizionati all'esterno delle sonde congelatrici, ed attraverso delle mirate iniezioni di intasamento generale in tubi valvolati distribuiti lungo tutta la tratta.

Come si puo' osservare dalle figure 9, 10 e 11 la tratta, di lunghezza pari a 8 m, è interessata da tre tipi di sonde congelatrici:

- le *sonde laterali* che consentono la formazione del muro laterale e l'alimentazione al fondello durante lo scavo.
  Sono poste ad interasse di 0,80 m e risultano prive di coibentazione
- le *sonde di setto* che vengono disposte trasversalmente all'asse della galleria, ad interasse di circa 1,10 m e sono prive di coibentazione.
  Garantiscono la formazione di un muro congelato a tutta sezione che isola la tratta in scavo dalle tratte successive ancora da congelare
- le *sonde di fondello* che hanno lo stesso interasse delle sonde di setto; esse sono però parzialmente dotate di coibentazione, così da impedire il congelamento della porzione di terreno da scavare.
  Le file trasversali di sonde hanno fra di loro un interasse pari ad 1,00 m.

Sulle stesse figure sono anche riportate le posizioni dei *fori termometrici*, previsti in numero di 11 per ogni tratta in congelamento.

Tali «captatori della temperatura del terreno»

sono realizzati con tubi riempiti di alcool nei quali, mediante sonde a termocoppia, vengono eseguite misure sistematiche di temperatura durante tutte le fasi di congelamento e scavo.

I rilievi termometrici costituiscono strumento essenziale per poter controllare il processo di congelamento e quindi intervenire sul sistema per apportare le idonee correzioni sia in fase di congelamento vero e proprio, sia in fase di mantenimento durante lo scavo.

Altro elemento molto importante per la corretta formazione della struttura congelata è la definizione dei circuiti che collegano i vari gruppi di sonde congelatrici.

La figura 12 mostra uno degli schemi adottati per la tratta standard.

Riportiamo di seguito alcuni dati medi caratteristici della tratta:

- sonde congelatrici in funzione	n. 72
- fori termometrici	n. 11
- gruppi in funzione	n. 21
- volume di terreno da congelare	mc 410
- volume di terreno da mantenere	mc 120

Una volta realizzato l'impianto di collegamento si dà corso *all'operazione di congelamento*.

Sono stati eseguiti alcuni tentativi per stabilire la sequenza ottimale delle lavorazioni di congelamento, scavo e getto, tenuto conto delle differenti esigenze delle squadre addette e della gestione del cantiere.

Si è poi proceduto secondo la tempistica qui di seguito riportata.

L'azoto liquido veniva fatto circolare nell'impianto a partire dalla mattinata del giovedì, per un periodo ininterrotto variabile fra le 70 e le 80 ore e con portate comprese fra 6.500 e 7.000 l/ora.

Come si vedrà più oltre in questo lasso di tempo si sono normalmente raggiunte le temperature imposte dal progetto.

L'operazione si concludeva nella giornata di domenica e durante la notte venivano smontati i circuiti che erano compresi nella sezione di scavo.

Le operazioni di scavo avevano allora inizio a partire dalle ore 6.00 del lunedì successivo e proseguivano con mezzi tali da consentire il getto completo dell'arco rovescio entro il venerdì della stessa settimana.

Tale ciclo di lavorazione, oltre che dalle esigenze sopra esposte, era anche suggerito da considerazioni sul tempo di decongelamento del fondello che, come già detto, non era possibile alimentare e controllare durante la fase di scavo; inoltre in tale modo veniva garantita la continuità degli scavi delle tratte successive.

Ultimate alcune di queste porzioni di galleria, il congelamento poteva avere una sosta nel corso della quale l'Impresa procedeva con i getti dei piedritti della galleria inferiore.

Infatti il mantenimento delle sonde laterali di ciascuna tratta veniva arrestato in concomitanza con il getto dell'arco rovescio della tratta stessa; l'azione statica ed impermeabilizzante necessaria nel periodo intercorrente fra la fine dello scavo ed il getto dei piedritti (in genere 3 settimane) veniva garantita dal

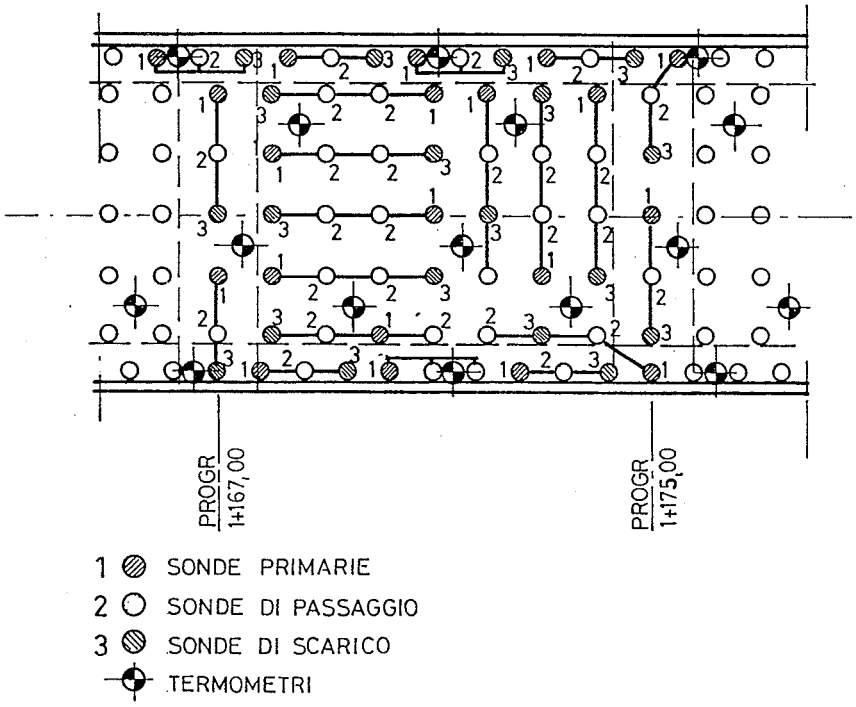


Fig. 12 - Schema di un circuito di collegamento dei vari gruppi di sonde congelatrici collegate in serie.

consolidamento preesistente e dal prerivestimento.

Come già anticipato l'*andamento delle temperature* del terreno nel tempo è basilare per gestire correttamente l'operazione.

Negli undici fori termometrici presenti in ogni tratta venivano compiute letture sistematiche di temperatura ogni sei ore.

Le letture alle varie profondità (metro per metro) venivano diagrammate su appositi tabelloni; dai grafici era possibile desumere l'evoluzione del processo di congelamento nel tempo e alle diverse quote. Sembra interessante riportare ora alcuni diagrammi significativi e lo schema della sezione trasversale con relativa stratigrafia e posizione dei termometri (Fig.13).

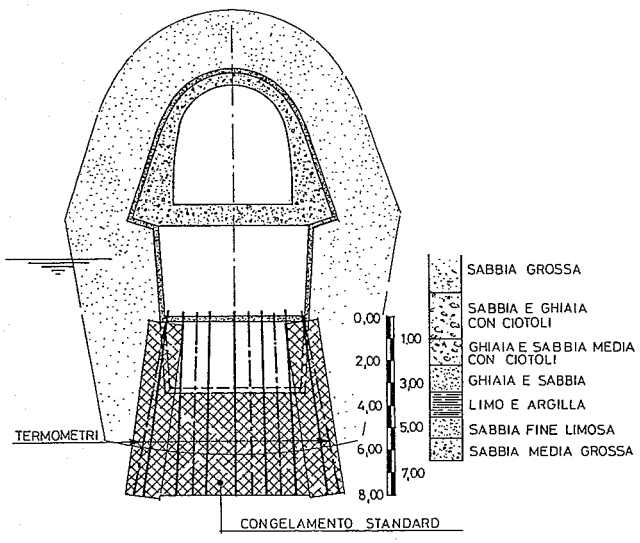


Fig. 13 - La struttura congelata standard e la stratigrafia dei terreni coinvolti.

Vengono evidenziate sia le letture registrate in corrispondenza dello strato limoso, sia quelle dello strato sabbioso.

La figura 14 mostra l'andamento nel tempo delle temperature registrate attraverso un termometro laterale lungo le pareti di congelamento.

La presenza di sonde congelatrici poste ad interasse di 0,80 m e non coibentate consente di raggiungere nella fase finale del ciclo di congelamento temperature molto basse (fino a -30 °C circa) anche in corrispondenza dello strato limoso.

Nelle zone centrali, dove invece lo strato limoso non è aggredito dall'alto e dal basso dall'azione di congelamento (vedi Fig. 15), le temperature che si possono raggiungere nel limo sono quasi sempre dell'ordine dei -5 °C/-10 °C.

Poichè è proprio la temperatura raggiunta dal limo che governa l'intera fase di congelamento, si manifestano inevitabilmente delle distribuzioni anomale di temperatura lungo le sonde, con la conseguenza di raggiungere negli strati sabbiosi valori anche inferiori ai -50 °C.

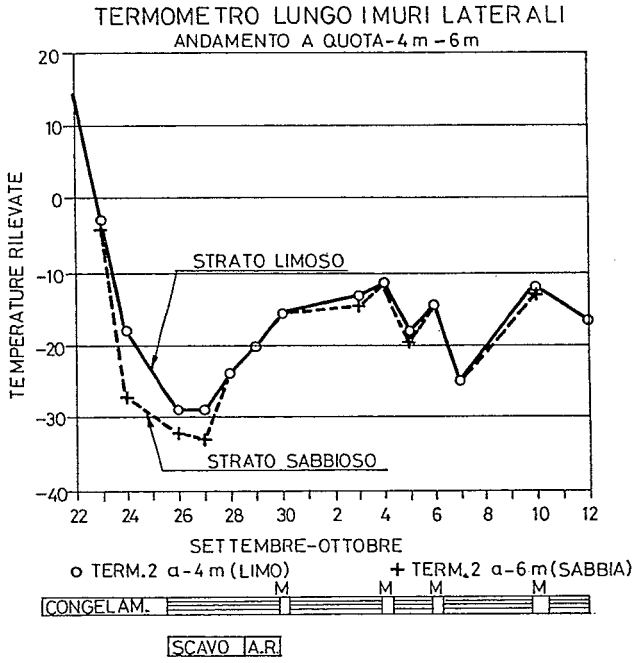


Fig. 14 - Andamento delle temperature nei muri laterali durante il congelamento, lo scavo ed il mantenimento (M).

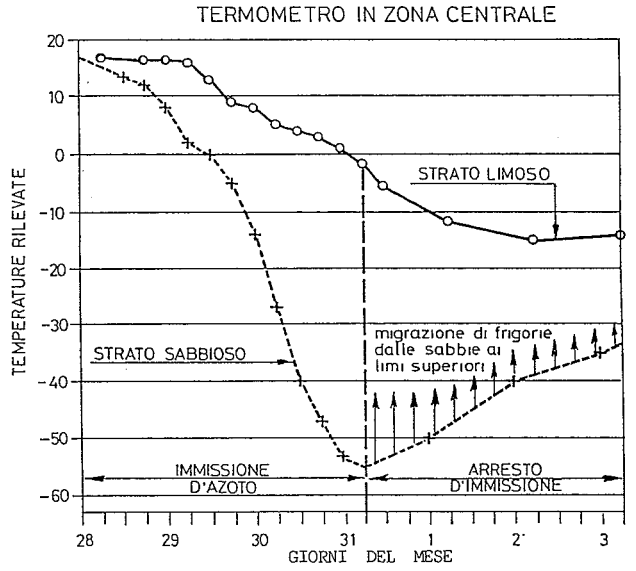


Fig. 15 - Andamento delle temperature nella zona centrale dell'arco rovescio nel limo e nelle sabbie.

Gli strati sabbiosi diventano quindi dei veri e propri serbatoi di frigorie che con il passare del tempo, quando non si ha più circolazione di azoto, vengono cedute alle zone meno fredde.

Tale fenomeno, così come ben evidenziato in figura 15, porta col passare del tempo ad una omoge-

neizzazione del congelamento, con distribuzione uniforme delle temperature indipendente dalle condizioni stratigrafiche.

Da notare infatti come nei limi la temperatura continui a scendere malgrado l'arresto di immissione d'azoto; le sabbie cedono le frigorie «immagazzinate».

La figura 16 mostra una ulteriore peculiarità del processo di congelamento in terreni a differente composizione granulometrica; la figura si riferisce a due termometri con lettura di temperatura effettuata alla stessa quota.

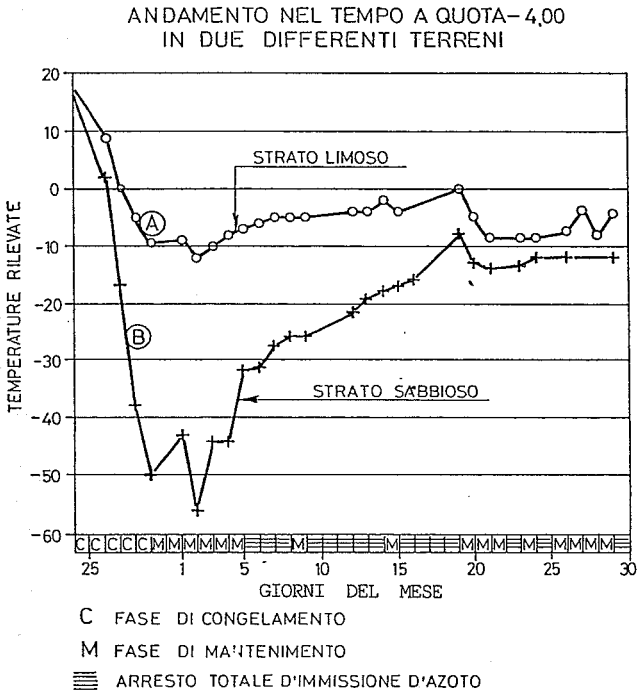


Fig. 16 - Differente comportamento delle reazioni criogeniche delle sabbie e dei limi a parità di apporti di frigorie con immissioni di azoto.

La particolare situazione stratigrafica porta ad avere per il termometro della curva A letture nel centro dello strato limoso, mentre per il termometro della curva B letture in corrispondenza di uno strato sabbioso.

L'andamento nel tempo delle temperature permette di confrontare il gradiente di temperatura riscontrabile in corrispondenza di differenti condizioni stratigrafiche.

La curva A evidenzia come uno strato limoso richieda un grosso apporto di frigorie in fase di congelamento per guadagnare una temperatura di appena - 10°C, ma per contro tenda a perdere il freddo accumulato in modo molto più lento rispetto allo strato di terreno sabbioso (curva B).

Il congelamento è dunque più difficoltoso nei terreni molto fini, ma è più stabile nel tempo.

Il grafico di figura 17 mostra invece l'evoluzione delle temperature, riscontrate lungo un termometro, durante la terza giornata dall'inizio della fase di congelamento e quindi al termine della fase stessa.

Si possono notare:

- le difficoltà incontrate nella zona più alta dove le sonde sono molto superficiali
- la maggior lentezza in corrispondenza dello strato limoso
- l'uniformità di aumento del grado di congelamento in funzione dei quantitativi di azoto immesso.

Infine si è voluto studiare in modo approfondito la *fase di decongelamento*, ossia il «decadimento» nel tempo delle strutture congelate.

Nel grafico di figura 18 sono riportati i diagram-

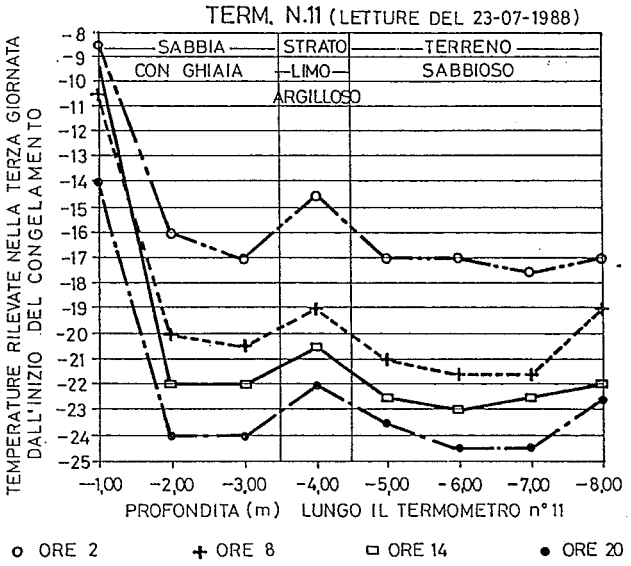


Fig. 17 - Diminuzione delle temperature in corrispondenza di vari strati di terreno a differenti quote, nella fase terminale del congelamento (terza giornata)

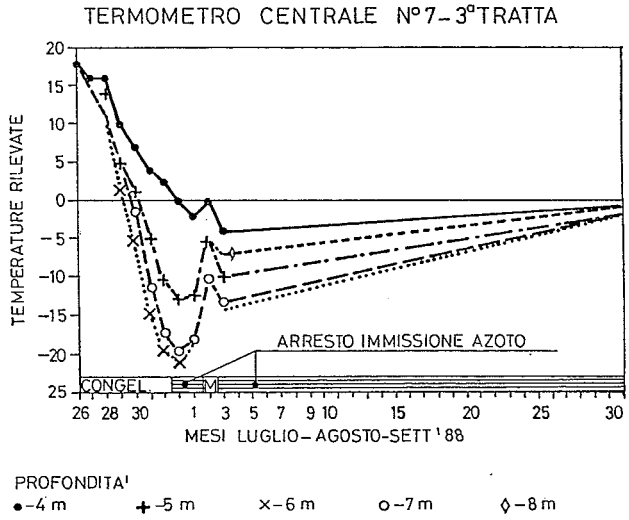


Fig. 18 - Studi di dettaglio sulla fase di decongelamento in vari tipi di terreno.

mi relativi alle temperature a varie profondità rilevate in un termometro centrale (il n. 7 della terza tratta).

Si può notare ancora una volta come lo strato limoso (a - 4 m, linea superiore) abbia raggiunto il congelamento con difficoltà, ma lo abbia mantenuto nel tempo come gli strati a granulometria più grossolana.

La temperatura di zero gradi viene raggiunta molto lentamente per tutti i terreni, dopo circa 25 giorni dall'arresto della immissione di azoto.

Nei grafici di figure nn. 19, 20 e 21 sono riportati gli studi eseguiti su due termometri dislocati nel muro laterale, i numeri T13 e T15: mentre il primo è stato realizzato secondo lo schema progettuale standard (10° d'inclinazione), il T15 è stato effettuato con una inclinazione di 14° 30' e quindi ha offerto la possibiltà di leggere temperature a distanze maggiori rispetto all'asse di congelamento.

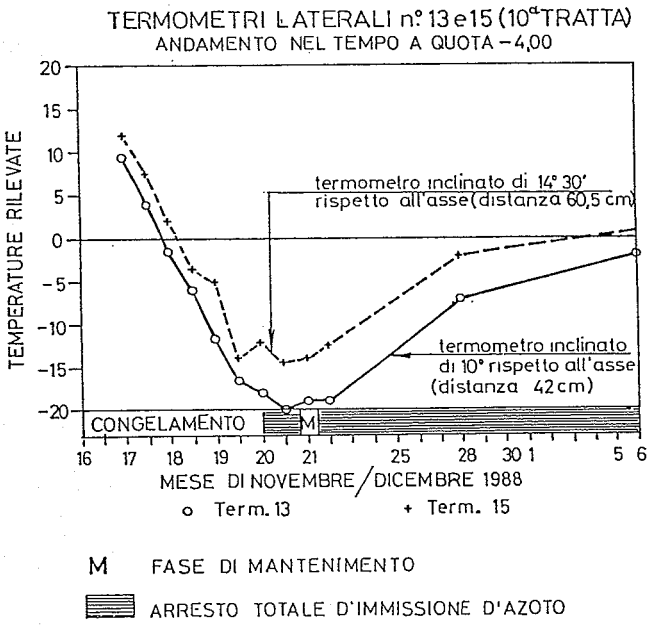


Fig. 19

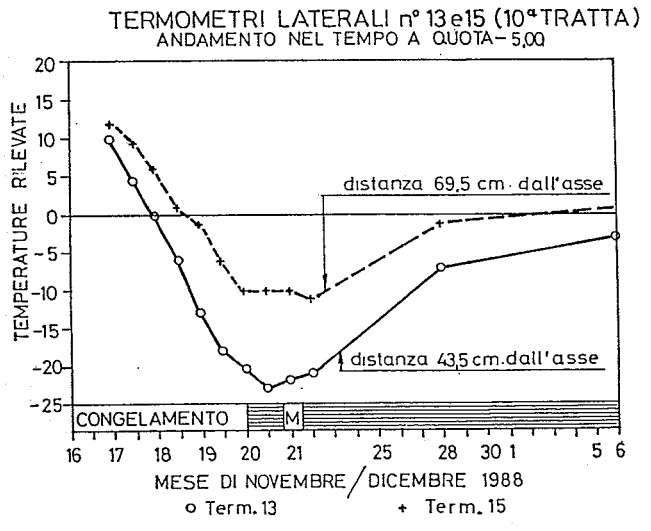
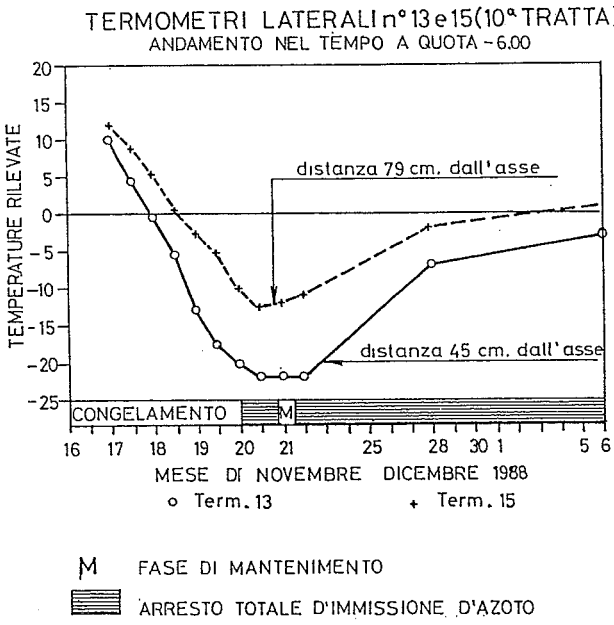


Fig. 20



Figg. 19-20-21 - Ulteriori studi sulla permanenza del congelamento nel tempo, a differenti distanze dall'asse delle sonde congelatrici.

Riportiamo nella Tabella I gli scostamenti teorici di T13 e T15 dall'asse di congelamento alle diverse profondità.

Dai diagrammi si può notare come ad una fase di rapido decadimento delle temperature (fase di omogeneizzazione di circa 4-6 giorni) segue una fase di decadimento più lento ed uniforme (10-15 giorni).

Naturalmente più ci si allontana dall'asse della struttura congelata, meno resiste il congelamento.

Comunque anche ad una distanza di 80 cm la temperatura permane sotto lo zero per almeno 10 giorni.

TABELLA I

Profondità lettura termometrica	Distanza dall'asse di congelamento	
	Termometro T13 (inclinato 10°)	Termometro T15 (inclinato 14°30')
– 4,00 m	42,0 cm	60,5 cm
– 5,00 m	43,5 cm	69,5 cm
– 6,00 m	45,5 cm	79,0 cm
– 7,00 m	46,5 cm	89,0 cm
–8,00 m	48,0 cm	99,0 cm

9. Considerazioni generali sui consumi di azoto liquido

L'esperienza vissuta al lotto 2B della MM consente di trarre alcune considerazioni che si ritiene possano essere utili per la progettazione sempre più precisa di questi interventi: interessante è l'aspetto tecnico ed anche quello economico del problema da risolvere.

A questo proposito diamo uno sguardo ai quantitativi di azoto impiegati, che sono ovviamente strettamente legati al costo dell'operazione.

A consuntivo il consumo totale di azoto liquido è stato di poco superiore ai 18.000.000 litri per congelare un volume di terreno pari a circa 11.800 mc.

Il valore medio specifico è risultato dunque di 1525 litri di azoto per ogni metro cubo di terreno trattato con questa metodologia.

Il dato in sè non ha grande significato perchè assomma la fase di congelamento con quella di mantenimento e quest'ultima è strettamente legata all'andamento e quindi alla durata delle operazioni di scavo e getto.

L'analisi dei differenti interventi praticati nel lotto abbinati alla metodologia di scavo, consente tuttavia di specificare meglio la distribuzione dei consumi.

a) *Congelamento totale:* in questo caso lo scavo è stato effettuato in avanzamento per campioni standard di circa 8 m di lunghezza ed è stato completato, con il getto dell'arco rovescio, in una settimana.

Il valore medio del consumo in fase di congelamento è stato di 1050 l/mc, mentre quello in fase di mantenimento è stato di 200 l/mc: per un totale dunque di 1250 l/mc.

Da notare che il consumo in fase di mantenimento è stato contenuto grazie alla rapidità di scavo.

b) *Congelamento parziale con avanzamento frontale*
Come già descritto lo scavo in questo caso è proceduto protetto dal congelamento solamente lungo i due piedritti ed è stato eseguito per campioni di 20-25 m di lunghezza.

Le relative lavorazioni «sotto congelamento» si sono completate con il getto dell'arco rovescio mediamente in due settimane; è poi seguita immediatamente la realizzazione dei piedritti (vedere Fig. 22).

Il valore medio del consumo di azoto in fase di congelamento è stato di 1100 l/mc, mentre quello in fase di mantenimento è stato pari a 350 l/mc: per un totale dunque di di 1450 l/mc.

Il consumo del mantenimento è risultato qui superiore a quello precedente a causa soprattutto del maggiore periodo di alimentazione.

c) *Congelamento parziale con avanzamento a ritroso*
È stato applicato nel manufatto di scavallamento per le gallerie da 4,70 m di larghezza.

Si è trattato anche qui di protezione limitata ai piedritti.

Lo scavo è stato eseguito in continuo con la fresa che operava a ritroso muovendosi sul piano alto del primo ribasso (Fig. 23).

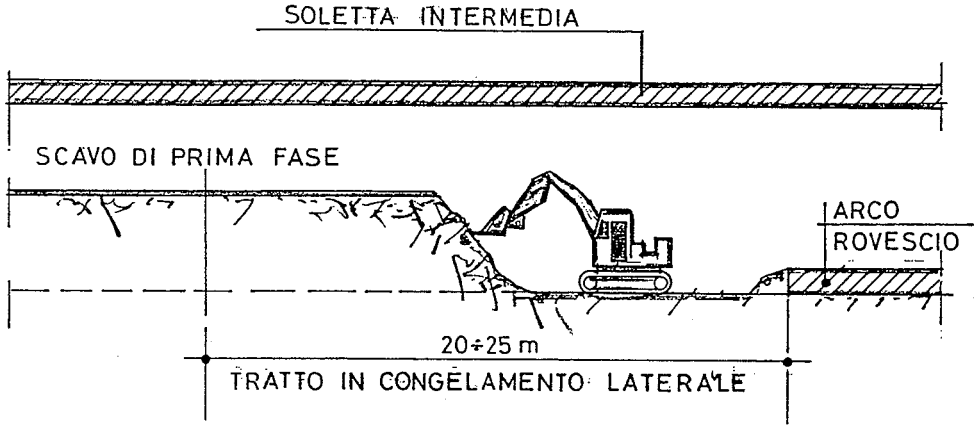


Fig. 22 - Avanzamento dello scavo frontale con protezione di due muri congelati lungo i piedritti.

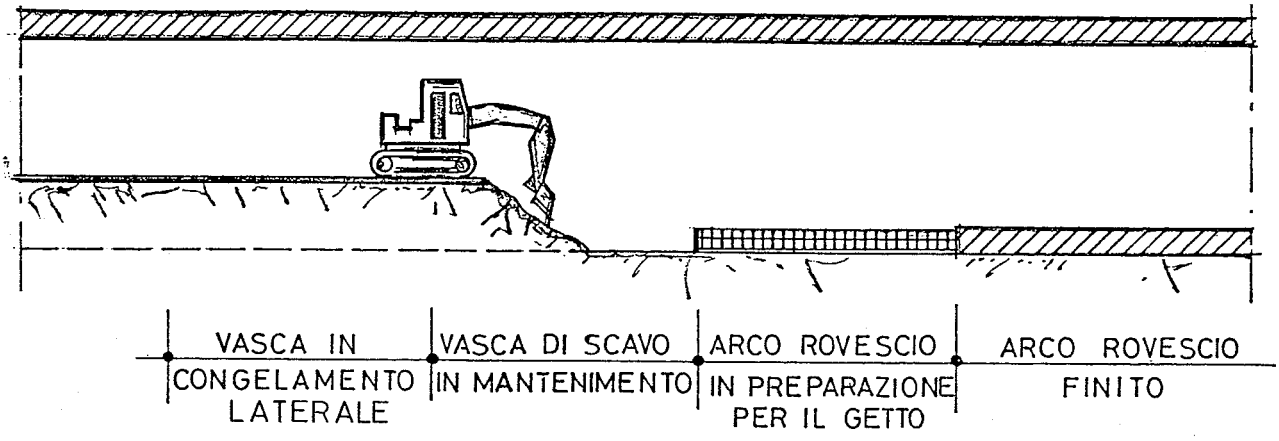


Fig. 23 - Avanzamento continuo a ritroso. La protezione con congelamento è stata limitata ai due piedritti laterali.

In questo caso sono state poste consecutivamente in congelamento più tratte: i getti dell'arco rovescio e dei piedritti sono stati eseguiti in avanzamento cercando di seguire lo scavo da vicino.

Il valore medio dei consumi di azoto in fase di congelamento è risultato di 1250 l/mc, mentre quello della fase di mantenimento è stato di 620 l/mc: per un totale dunque di 1870 l/mc.

Risulta evidente dall'analisi dei tre casi che la soluzione di congelamento laterale con scavo a ritroso ha comportato una grande dissipazione di «energia».

In questo caso infatti il consumo in fase di mantenimento è stato pari al 50% circa del consumo registrato in fase di congelamento; negli altri casi tale valore è limitato al 20-30%.

Il maggiore costo della soluzione è compensato da una maggiore sicurezza in quanto i getti possono seguire gli scavi quasi «a contatto».

Si può inoltre osservare come il congelamento totale (caso a) sia quello che comporta i consumi più limitati, sia nella fase di congelamento che in quella di mantenimento.

Ciò è dovuto all'effetto di massa che si realizza tutt'attorno alla porzione da scavare.

Invece è da rilevare come la sola parete laterale congelata (casi b e c) necessiti di un apporto di frigorie più elevato nelle due fasi, proprio perchè circondata dalla falda che «attacca» le strutture congelate da ogni lato con «effetto riscaldante».

Tutte queste considerazioni sono comparabili perchè riportano dati desunti da terreni di identica composizione granulometrica.

In conclusione si può affermare che la soluzione migliore da adottare deve essere scelta dopo un bilancio economico generale che tenga conto non solamente del consumo di azoto, ma anche della sicurezza e della tempistica di scavi e getti.

10. Difficoltà tecnologiche di intervento

Il congelamento è senza dubbio una tecnica di consolidamento ed impermeabilizzazione semplice e tale da assicurare un risultato certo.

Bisogna tuttavia tenere ben presente che esso richiede, sia in fase di progettazione sia in fase applicativa, l'apporto di conoscenze tecniche estremamente approfondite e la traduzione pratica di un know-how derivante da molteplici esperienze condotte in differenti situazioni.

Valgono a livello esemplificativo le seguenti considerazioni:

a) grande cura deve essere riposta nella scelta di tutti i materiali impiegati per far fronte in piena sicurezza alla fragilità causata dalle bassissime temperature in gioco.

Tutte le apparecchiature in genere, le tubazioni nel terreno ed aeree in particolare, sono sottoposte a forti sollecitazioni ed a sbalzi di temperatura di notevole entità.

In particolare per le sonde congelatrici si devono usare acciai speciali a basso tenore di carbonio, mentre per l'impianto di adduzione e di distribuzione dell'azoto si utilizzano acciaio inox e rame;

b) grande attenzione deve essere applicata nella realizzazione dell'impianto generale di scarico in atmosfera dell'azoto gassoso e dell'impianto specifico di distribuzione relativo a ciascuna tratta.

In particolare vanno curati sia in sede di scelta dei materiali, sia in sede di montaggio dell'impianto i collegamenti tra i diversi componenti per evitare il verificarsi di perdite di azoto.

Le *fughe di azoto* infatti possono dar luogo a diversi inconvenienti, a seconda che si manifestino

- *nell'impianto generale*: una perdita anche modesta di azoto può portare ad un impoverimento del contenuto di ossigeno dell'aria presente con possibilità di malori per coloro che si trovano nella zona interessata.

  Poichè un eccesso di azoto non viene rilevato direttamente dall'olfatto, è necessario predisporre un idoneo sistema di sicurezza che preveda l'impiego di rilevatori del tasso di ossigeno
- nelle sonde di congelamento: se la perdita di azoto si manifesta nel terreno che dovrà costituire la barriera impermeabile durante lo scavo, si possono avere effetti molto gravi.

Infatti la gassificazione diretta dell'azoto nel terreno origina la formazione di *claquages*, cioè di «canali» di scorrimento del gas, che impediscono al terreno coinvolto di congelare.

Viene pertanto meno la continuità del muro congelato con possibilità di importanti venute d'acqua durante gli scavi successivi.

In questi casi la «rimagliatura» del muro congelato è tuttavia possibile, ma non sempre è di facile realizzazione e comunque comporta operazioni assai complesse ed onerose

c) anche i termometri devono essere posizionati con accuratezza: la loro dislocazione nell'ambito del muro congelato deve essere nota con precisione, altrimenti la gestione dell'immissione dell'azoto potrebbe essere male «guidata»; inoltre l'alcool non deve assolutamente fluire nel terreno perchè a causa del suo basso punto di congelamento impedirebbe la formazione della struttura.

Da quanto sopra esposto si comprende come la scelta dei materiali e la perfetta sigillatura di tutte

le giunzioni siano elementi determinanti per la riuscita del trattamento senza sprechi ed oneri addizionali.

11. Controlli topografici nel corso del congelamento

Si è voluto approfittare di questo grosso intervento così diversificato per studiare più approfonditamente il fenomeno delle *variazioni del volume del terreno* sottoposto a congelamento.

In particolare al fine di valutare gli effetti di questo tipo di consolidamento ed impermeabilizzazione sul sistema terreno-fabbricati sono stati effettuati, durante le operazioni di congelamento, accurati controlli topografici di superficie, atti ad evidenziare tutti i fenomeni deformativi.

Dai risultati ottenuti si è avuta ancora una volta conferma che il metodo di congelamento del terreno con azoto liquido non produce sensibili rigonfiamenti del terreno e di conseguenza sollevamenti delle strutture sovrastanti, nel caso in cui l'ammasso congelato sia soggetto ad una opportuna controspinta.

Questo fatto era già stato verificato nel corso di altre sperimentazioni.

Accertato quanto sopra è parso allora di notevole interesse integrare gli studi e valutare le deformazioni indotte dal terreno in congelamento nel caso di assenza o comunque di modesta controspinta.

A tale scopo si è fissata una rete di caposaldi sul piano di lavoro appositamente ricoperto da una struttura piana, costituita da una soletta in calcestruzzo di circa 20 cm di spessore, per una lunghezza di 20 m.

Sono così state interessate 2 tratte di congelamento successive, ognuna delle quali è stata posta sotto attento controllo attraverso due sezioni strumentate (Fig. 24).

Le letture topografiche di livellazione condotte prima, durante e al termine dei congelamenti delle tratte A e B (vedi Tabella II) sono state organizzate secondo i diagrammi delle figure nn. 25, 26, 27 e 28 che rappresentano le deformazioni della platea rispettivamente: al centro della tratta A mediando i valori dei caposaldi 1-6, in corrispondenza dei caposaldi 7-8-9 della tratta B, in corrispondenza dei caposaldi 10-11-12 della tratta B ed in asse longitudinale della platea unendo i caposaldi 2-5-8-11.

Commentiamo ora brevemente l'evoluzione delle deformazioni riferendoci alle singole figure.

- Sezione a-a, figura n. 25.

Si può notare come all'inizio del congelamento della tratta A si sia riscontrato (a 8 ore) un assestamento della platea, che si è abbassata di qualche decimo di millimetro.

Ciò è dovuto probabilmente alla turbativa che il congelamento apporta all'acqua che impregna il terreno e tende a migrare all'esterno.

Poi inizia la fase di rigonfiamento che è abbastanza ridotto a 32 ore dall'inizio del congelamento (2 mm circa); il sollevamento aumenta e raggiunge quasi i 10 mm dopo circa 4 giornate di congelamento.

Desidero fare notare tuttavia che i tempi di immissione di azoto e mantenimento (oltre 100 ore) sono stati volutamente prolungati allo scopo di esaltare il fenomeno studiato.

Normalmente il grado di congelamento necessario viene ottenuto dopo 50 ore circa dall'inizio delle operazioni.

- Sezione b-b, figura n. 26

I caposaldi della tratta B (7-8-9) più vicini alla tratta A risentono degli effetti del congelamento di quest'ultima: il caposaldo 8 ad esempio si solleva di 3,9 mm.

Ciò è naturale tenuto conto della continuità della struttura della platea di supporto di tutti i caposaldi.

Immediatamente dopo inizia il congelamento sottostante alla tratta B, dunque quando il terreno verso A è ancora congelato.

I caposaldi si innalzano ancora, ma i valori devono essere depurati da quanto dovuto al vicino precedente congelamento.

Dunque al valore medio di innalzamento a 115 ore dei caposaldi 7,8,9, pari a 11,93 mm, deve essere tolto il tasso di innalzamento medio dovuto al congelamento delle 100 ore di A (3,10 mm), per cui si avrebbe un sollevamento di 8,8 mm, addirittura minore di quanto avvenuto relativamente alla tratta A.

- Sezione c-c, figura n. 27

Per quanto concerne i caposaldi 11 e 12 (il 10 è andato fuori uso) più lontani da A, il risentimento del congelamento iniziale è minimo, pari a 0,5 mm.

Il sollevamento massimo medio è pari a 9,9 mm e, depurato di quanto avvenuto in conseguenza al precedente congelamento A, diviene pari a 9,45 mm.

Anche questo valore dunque è inferiore ai 10 mm pur avendo insistito con il congelamento per 115 ore all'incirca.

- Sezione d-d, figura n. 28

Qui i dati sono organizzati in modo che si vedano le deformazioni della platea in senso longitudinale (sotto la tratta A e B) durante le due fasi di congelamento.

Vengono naturalmente confermati i valori precedenti.

Faccio ulteriormente notare che i dati relativi ai sollevamenti massimi della platea B sono influenzati dalla continuità della struttura della platea stessa, che ha cominciato a muoversi durante il congelamento della fase A e quindi i valori devono essere depurati come sopra già spiegato.

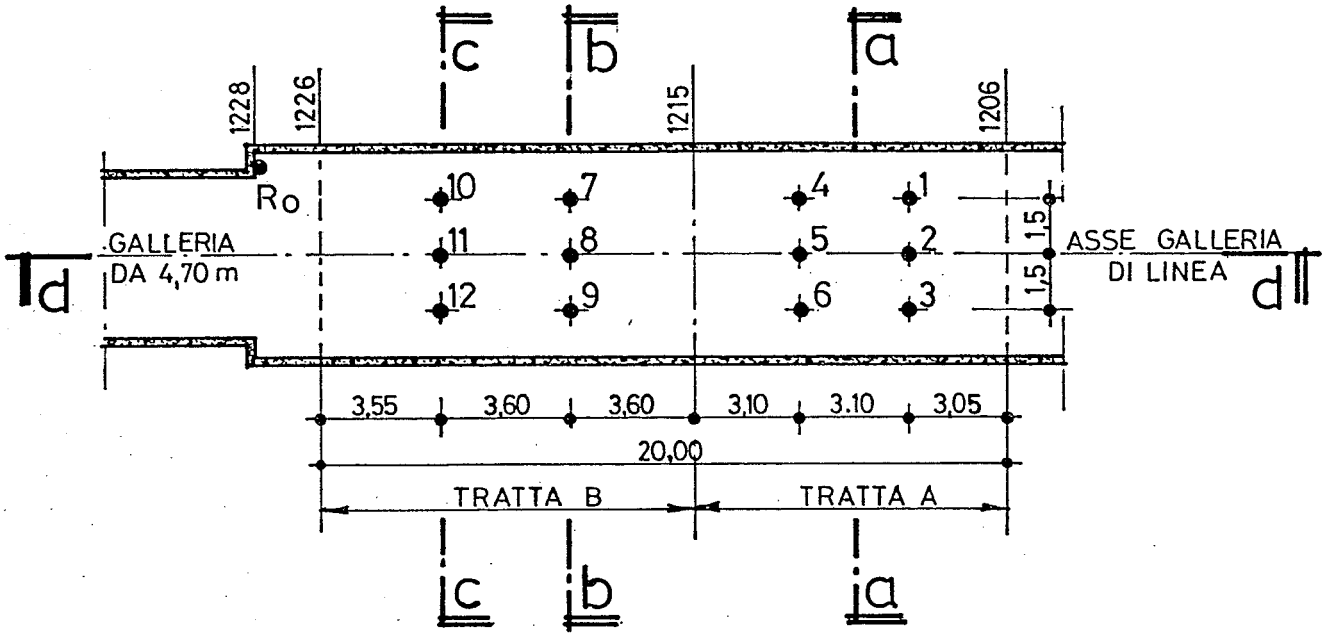


Fig. 24 - Planimetria dei caposaldi per i controlli di deformazione durante il congelamento delle tratte A e B.

TABELLA II - *Deformazioni rispetto alla lettura di zero, dei caposaldi topografici posti sulla platea in cls durante i due congelamenti sotto le tratte A e B*

Livellazioni successive	1	2	3	4	5	6
Data	05/11/88	10/11/88	11/11/88	14/11/88	18/11/88	21/11/88
Caposaldi topografici	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Ro	—	—	—	—	—	—
1	—	0	2	7,5	—	—
2	—	–0,2	2,7	10	—	—
3	—	0	2,4	9,6	—	—
4	—	–0,3	1	6	—	—
5	—	–0,5	1	8,2	—	—
6	—	–0,8	1,5	8,8	—	—
7	—	–0,4	0,1	2,3	5,3	11,3
8	—	–0,2	0,6	3,9	5,3	11,2
9	—	–0,2	0,4	3,1	6,8	13,3
10	—	—	—	—	—	—
11	—	–0,1	0,3	0,5	2,6	9,2
12	—	0	0,1	0,4	3,8	10,6
Ro	—	—	—	—	—	—

Liv. n. 1: lettura di "zero"
Liv. n. 2: eseguita dopo 8 ore da inizio congelamento tratta A
Liv. n. 3: eseguita dop 32 ore da inizio congelamento tratta A
Liv. n. 4: eseguita dopo 8 ore da fine congelamento tratta A con scavo in corso
Liv. n. 5: eseguita 43 ore dopo inizio congelamento tratta B
Liv. n. 6: eseguita 16 ore dopo fine congelamento tratta con B con scavo in corso

* *Nota*: punto 10 è andato fuori servizio prima della liv. n. 2

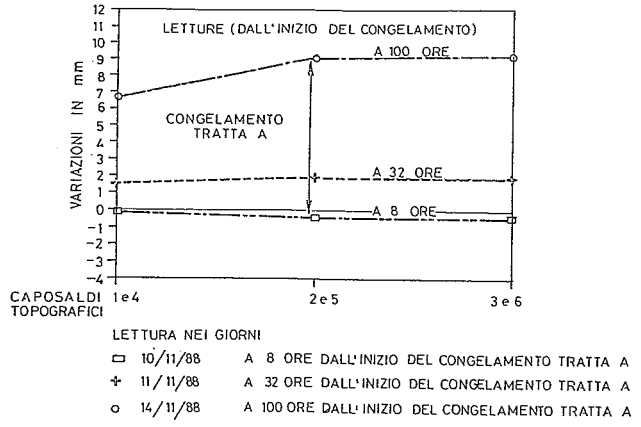


Fig. 25 - Congelamento delle tratta A. Si può notare il massimo sollevamento in centro.

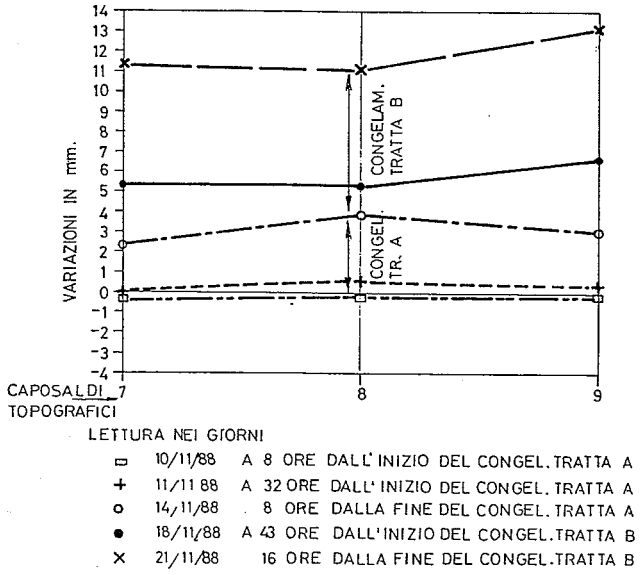


Fig. 26 - Congelamento delle tratte A e B. Si può notare il risentimento in B congelando A e poi il max sollevamento del caposaldo 9 (13,3 mm) dopo il congelamento in B.

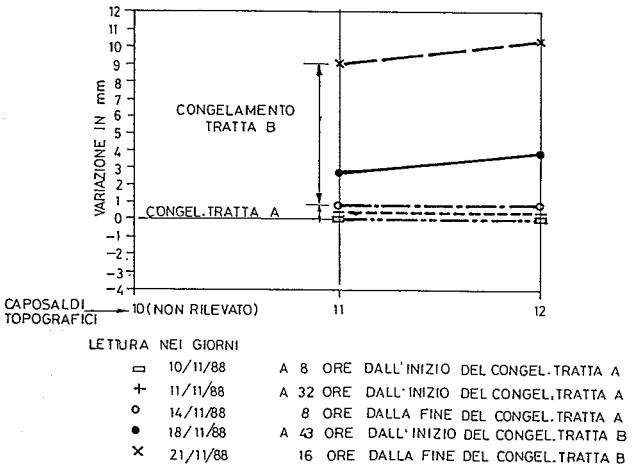


Fig. 27 - Congelamento delle tratte A e B. Il risentimento del congelamento di A sui caposaldi di B è qui minore, data la maggiore distanza.

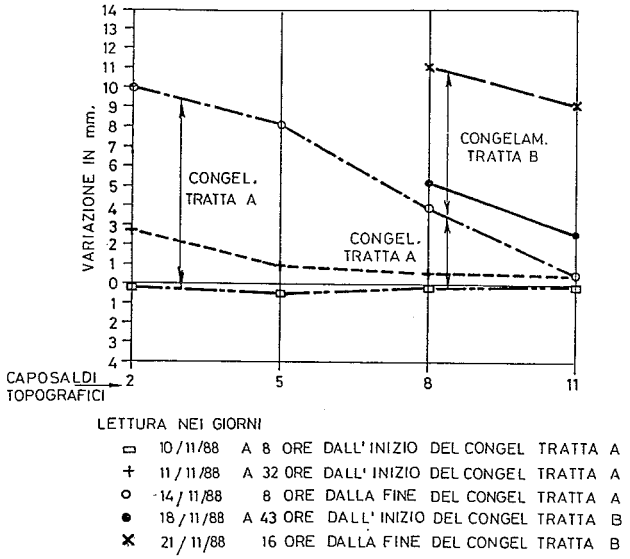


Fig. 28 - Congelamento delle tratte A e B. Sollevamenti in asse delle due tratte.

Conclusioni dei controlli deformativi

Da quanto sopra schematicamente riportato si possono desumere le seguenti osservazioni:

a) il congelamento con azoto liquido non apporta sensibili deformazioni alle strutture sovrastanti nel caso in cui il peso delle strutture stesse superi 1 kg/cm^2
b) quando il contrasto è inferiore, o addirittura nullo, intervengono dei fenomeni di rigonfiamento, che tuttavia sembrano essere sempre inferiori al valore di 10 mm, anche se l'immissione di azoto viene prolungata per un centinaio di ore.

A questo proposito è necessario precisare che nel caso ora esaminato la perforazione per la posa delle canne congelatrici è stata eseguita sotto un modesto battente di falda e si sono riscontrati alcuni fenomeni di rifluimento della frazione più fine del terreno.

In particolare alcune filtrazioni lungo le sonde, non completamente arrestate da interventi tipo «Joosten», hanno consentito la formazione in corrispondenza della superficie della soletta a contatto con il terreno, di un velo d'acqua che in fase di congelamento ha agito da «martinetto».

Questo fatto può in un certo senso avvallare il valore, sopra riferito, del rigonfiamento che dunque può essere considerato quale massimo nel caso di congelamento in assenza di controspinta.

12. Prove di laboratorio

Si è voluto anche approfittare di questo importante intervento di congelamento per tentare di definire meglio i valori della coesione raggiunti dal terreno alle differenti temperature.

Il prelievo di campioni di terreno congelato da sottoporre a prove di laboratorio è parso, fin dall'inizio delle operazioni, estremamente complicato, sia per l'interferenza con le operazioni di scavo, sia perchè il terreno alluvionale (misto ghiaia-sabbia) congelato tende a «sbriciolarsi» quando lo si sottopone ad azione meccanica.

Sfruttando tuttavia il fatto che la fase di scavo prevedeva anche la bonifica e l'asportazione dello strato limo-argilloso, si sono potute prelevare alcune «zolle» di tale materiale dalle quali sono stati ricavati alcuni campioni di diametro assai modesto (max 53,5 mm).

Questi sono stati sottoposti a prove di compressione semplice a diverse temperature.

I risultati delle prove ed i relativi diagrammi sono rappresentati nelle figure nn. 29,30 e 31.

Riportando i valori Rc di rottura in un diagramma Rc-T (vedi Fig. 32) è possibile per interpolazione definire una relazione di tipo lineare fra le due grandezze.

Nel nostro caso questa relazione può essere espressa dall'equazione

$$Rc = Rco + 0{,}028\ T\ (MPa)$$

dove

Rco = resistenza a compressione semplice in condizioni normali (MPa)

T = temperatura di congelamento del terreno (°C).

Inoltre il confronto tra i risultati ottenuti utilizzando campioni aventi $\varphi = 38$ mm e campioni aventi $\varphi = 53{,}5$ mm consente di constatare come per questi ultimi i valori di resistenza siano più alti.

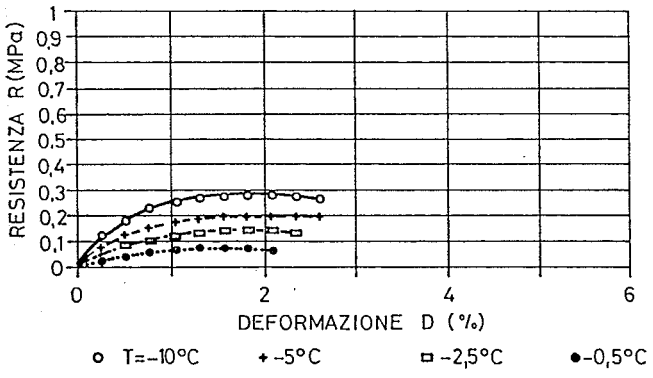


Fig. 29 - Diagrammi sforzo-deformazione di campioni di terreno congelato a differenti temperature (provini ∅ 38 mm), tra −10 ° e −0,5 °C.

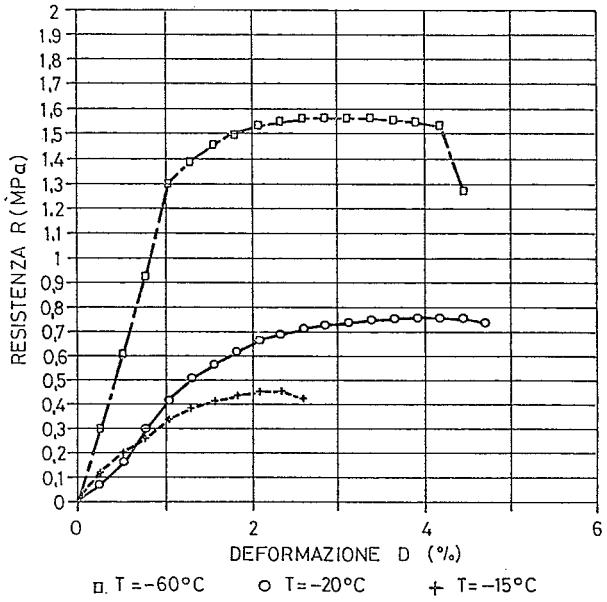


Fig. 30 - Diagrammi sforzo-deformazione di campioni di terreno congelato a differenti temperature (provini ∅38 mm), tra −60 °C e −15 ° C.

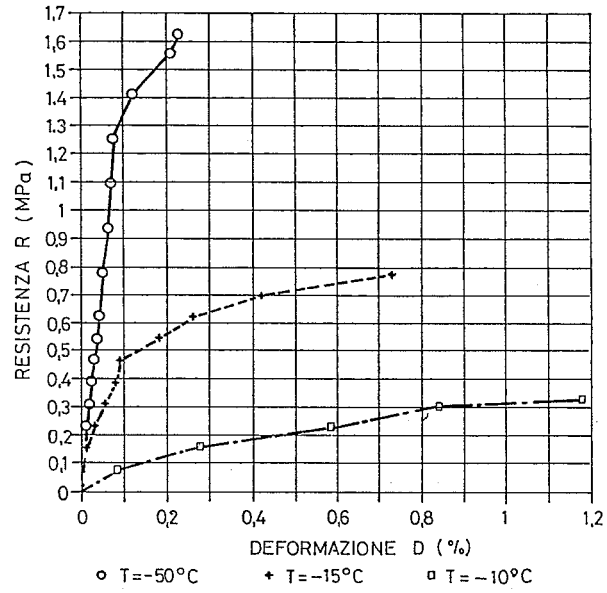


Fig. 31 - Diagrammi sforzo-deformazione di campioni di terreno congelato a differenti temperature (provini ∅ 53,5 mm).

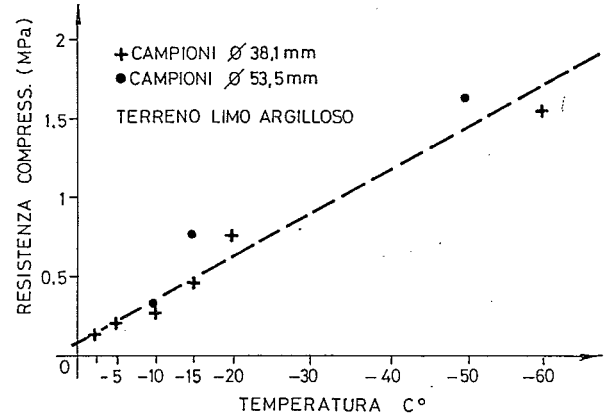


Fig. 32 - La resistenza a compressione di un terreno limo-argilloso in funzione della temperatura. Interpolazione dati di laboratorio.

Questo lascia intendere che a livello di ammasso congelato si possa contare certamente su resistenze a compressione molto più elevate.

I pochi dati a nostra disposizione non consentono però di esprimere quanto possa essere percentualmente l'incremento di resistenza rispetto ai valori di laboratorio.

Deve inoltre essere precisato che la zona particolare di campionamento - crosta superficiale dello strato limoso, interessata dal transito dei mezzi meccanici - ha certamente comportato l'utilizzo di materiale particolarmente disturbato.

Risulta tuttavia ora impossibile dire in che maniera tale «contingenza» giochi in termini di Rc.

Da elementi tratti da altre esperienze è possibile riferire che le resistenze di una sabbia congelata risultano di gran lunga superiori a quelle ora ritrovate nei limi della Crocetta (da 3 a 4 volte).

13. Dati consuntivi del cantiere di congelamento

Si riportano qui di seguito alcuni dati a consuntivo che possono dare un'idea del lavoro svolto.

- Galleria di linea a binari sovrapposti a congelamento totale 142 m
- Galleria da 4,70 a congelamento totale 29 m
- Galleria di linea a binari sovrapposti a congelamento laterale 95 m
- Galleria da 4,70 a congelamento laterale 88 m
- Volume di terreno congelato 11.800 m^3
- Consumo totale di azoto liquido (congelamento e mantenimento) 18.000.000 l
- Sonde congelatrici e termometri in opera 16.000 m
- Tempo medio di realizzazione «guscio di congelamento»
  - per tratte da 8-9 m in congelamento totale
  - per tratte da 20-25 m in congelamento laterale

  } 72/80 ore

Le fotografie nn. 1 e 2 mostrano un tratto di ribasso ed arco rovescio scavato in terreno congelato in attesa del getto.

Le sonde congelatrici laterali sono già disattivate.

Si nota bene il setto di terreno congelato in corrispondenza dell'inizio della successiva tratta in fase di congelamento.

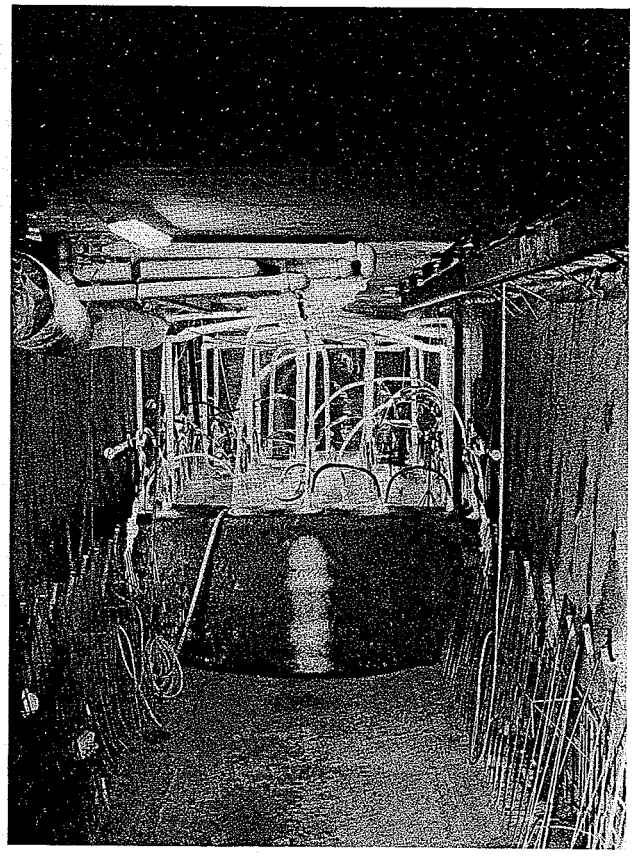


Foto n. 1 - Vista d'assieme di un tratto di ribasso in terreno congelato. L'arco rovescio ricoperto da magrone ed i due piedritti sono pronti per l'armatura ed il getto. Il tratto successivo di 8 m di lunghezza è in fase di congelamento.

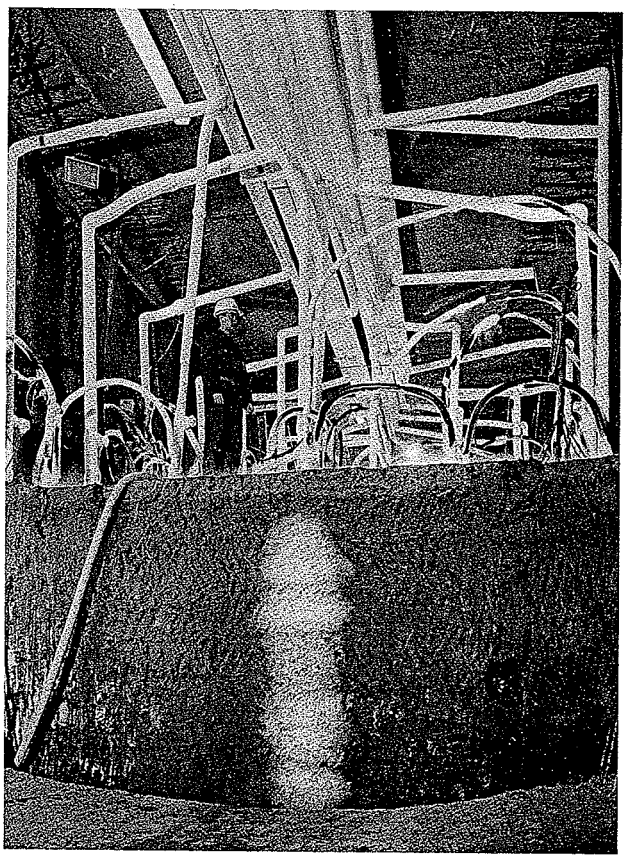


Foto n. 2 - Vista di dettaglio del setto di terreno congelato tra due tratti contigui. Si può notare, dall'impronta dei denti della fresa, l'omogeneità della consistenza raggiunta.

14. Conclusioni

Sulla base di quanto esposto è possibile concludere che ancora una volta la tecnica del congelamento si è dimostrata determinante per la risoluzione di un difficile problema di scavo di galleria immersa in falda ed in presenza di terreno non trattabile con normali iniezioni di miscele cemetizie e silicatiche.

L'adozione di diverse metodologie di intervento ha inoltre confermato la flessibilità del metodo e la possibilità di coniugare convenientemente le operazioni tradizionali di costruzione della galleria con quelle specializzate di congelamento.

Gli scavi hanno sempre potuto essere condotti in condizioni di sicurezza e secondo i tempi programmati, nonostante le notevoli difficoltà logistiche legate alla particolare configurazione del cantiere.

Con una attenta programmazione delle varie operazioni, condotte sia dall'Impresa generale che da quella specializzata, le interferenze si sono infatti ridotte al minimo dopo le prime esperienze e la galleria ha potuto avanzare con buona regolarità senza perditempi.

Come già accennato nelle premesse, tenuto conto della precisione geometrica che può essere raggiunta solamente con questa metodologia, è auspicabile che l'*«alternativa congelamento» venga d'ora in poi presa in considerazione dai progettisti, anche per situazioni più normali.*

La diffusione di frigorie è infatti molto facilitata in terreni ghiaiosi-sabbiosi o rocciosi, nell'ambito dei quali muri congelati impermeabili e di notevole resistenza possono essere ottenuti velocemente e con limitati consumi di azoto.

Personalia e ringraziamenti

- Committenza: Metropolitana Milanese S.p.A. - Strutture ed infrastrutture del territorio - linea 3, lotto 2B
  Direttore della linea: ing. Adolfo Colombo. Direttore del lotto: ing. Enrico Arini. Capo lotto: geom. Luigi Orsenigo.
- Impresa generale: Imprese Riunite Scarl: Lodigiani - Romagnoli - Tettamanti - Grassetto
  Direttore generale: ing. Federico Gervaso. Direttore tecnico: ing. Renato Peduzzi. Direttore dei lavori: ing. Francesco Rovereto. Capo cantiere: geom. Alberto Peverelli
- Impresa Specializzata: Rodio S.p.A.
  Responsabile del lotto: Dott. Fiorenzo Barbero. Direttore del cantiere: Dott. Piero Naratone. Capo cantiere: ing. Andrea Baronchelli
- Progettista dei consolidamenti del terreno, delle opere geotecniche e del congelamento: l'Autore.

Desidero ringraziare le Persone sopra indicate che hanno tutte collaborato fattivamente secondo le differenti competenze al lavoro descritto.

Un ringraziamento particolare rivolgo all'ing. Andrea Baronchelli che con la sua competente presenza quotidiana ha contribuito in modo determinante al successo dell'operazione.

BIBLIOGRAFIA

BALOSSI RESTELLI A. (1971) - *A mixed use of grouting and freezing by liquid nitrogen on the Brenner motorway*. 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. (1974/1975) - *Consolidation by freezing for the safe excavation of galleries through difficult soil. Present techniques and future developments.* Conferenza tenuta a Barcellona nel maggio 1974 e pubblicata su «Materiales y Maquinaria y Metodos para la Construction», feb.

BALOSSI RESTELLI A. (1980) - *Le fondazioni profonde del viadotto di Pietratagliata nella zona sismica di Pontebba.* «L'Industria delle Costruzioni», novembre.

BALOSSI RESTELLI A. (1988) - *Problems caused by the water table in lot 2B of line 3 of the Milan Subway.* Madrid.

BALOSSI RESTELLI A., COLOMBO A., GERVASO F., LUNARDI P. (1986) - *Tecnologie speciali per il sostegno di scavi nelle alluvioni di Milano in occasione della costruzione della linea 3 della Metropolitana Milanese.* International Congress on Large Underground Openings, Firenze.

BALOSSI RESTELLI A., GALLAVRESI F. (1976) - *Il congelamento del terreno ha risolto due difficili problemi di scavo in galleria.* «L'Industria delle Costruzioni», giugno.

BALOSSI RESTELLI A., PROFETA M. (1985) - *Autostrada Udine Tarvisio. Trattamenti speciali per fondazioni e difese fluviali.* «L'Industria delle Costruzioni», dicembre.

BALOSSI RESTELLI A., TONOLI G., VOLPE A. (1988) - *Ground freezing solves tunnelling problem at Agri Sauro, Potenza, Italy.* Fifth International Symposium on ground Freezing, Nottingham.

GALLAVRESI F. (1980) - *Ground freezing. The application of the mixed method (brine-liquid nitrogen).* 2nd International Symposium on Ground Freezing, Trondheim.

GIODA G., LOCATELLI L., GALLAVRESI F.(1992) - *Sul congelamento artificiale dei terreni.* «Rivista Italiana di Geotecnica», n. 3.

SUMMARY

The author decribes how the difficult excavation of a tunnel partially located under the water table has been satisfactorily carried out by freezing the soil with liquid nitrogen.

The site was situated in a densely populated area, right in the centre of Milan, corso Porta Romana, where the presence of buildings of different kind and age, added to the intense traffic, made the treatment extremely complicated.

In this article the author illustrates the different solutions adopted according to the methods of excavation, to the pouring of the definitive concrete lining, to the various shapes and thickness of the silt layer found in the deepest area of the excavations.

These had to be executed under a water head of 6 meters.

The most important technological aspects and the difficulties encountered are here described in order to encourage future technicians to adopt the most suitable technologies and devices in similar cases.

Being this site exceptionally wide, it was possible to dedicate a particular attention to the consolidation degree achievable in the frozen soil and to its deformation caused by the low temperature, both in the presence of the weight of the buildings and in the absence of any specific load. On other sites it has been possible

- to prove that in very dense soils (in weak rocks or in mixed gravel-sandy soils) the freezing speed is very high and it is possible to reach a good consolidation degree with lower quantities of liquid nitrogen
- to prove that ground freezing makes it possible to obtain waterproof, homogeneous and accurate geometric structures.

On account of that, the author firmly hopes that the freezing technique will be considered a much preferred alternative even in less difficult situations than the one described in this article.