

dott. ing. Achille Balossi Restelli
dott. ing. Francesco Gallavresi

IL CONGELAMENTO DEL TERRENO HA RISOLTO DUE DIFFICILI PROBLEMI DI SCAVO IN GALLERIA

Omaggio della



ING. GIOVANNI RODIO & C. S.p.A.
IMPRESA COSTRUZIONI SPECIALI

IL CONGELAMENTO DEL TERRENO HA RISOLTO DUE DIFFICILI PROBLEMI DI SCAVO IN GALLERIA

dott. ing. Achille Balossi Restelli *
dott. ing. Francesco Gallavresi **

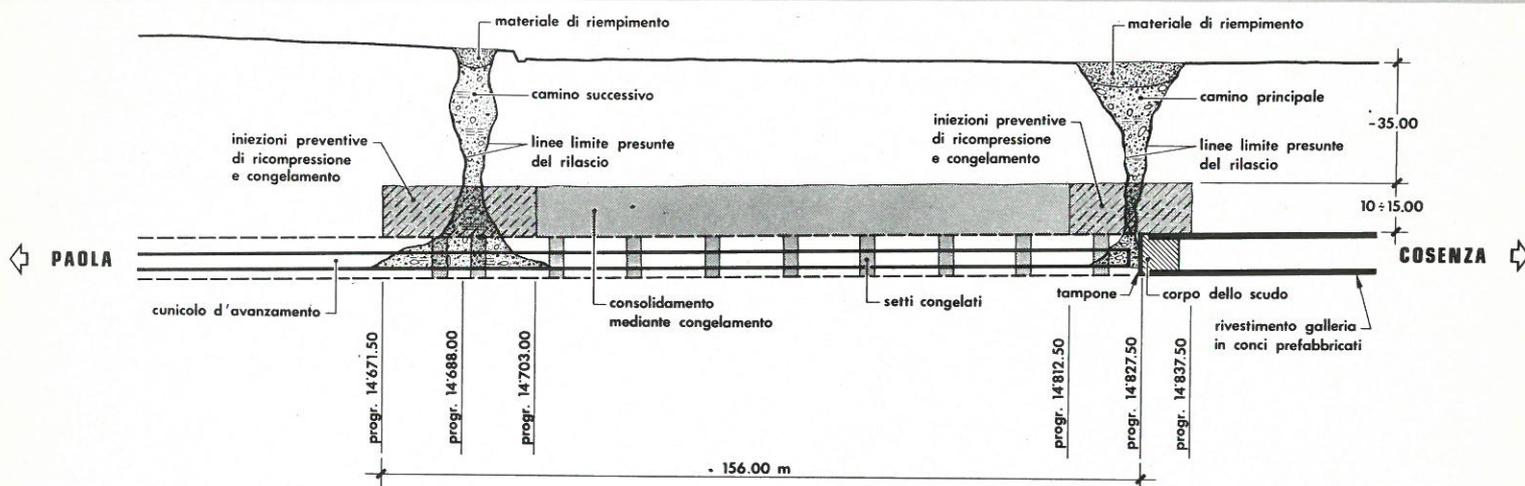
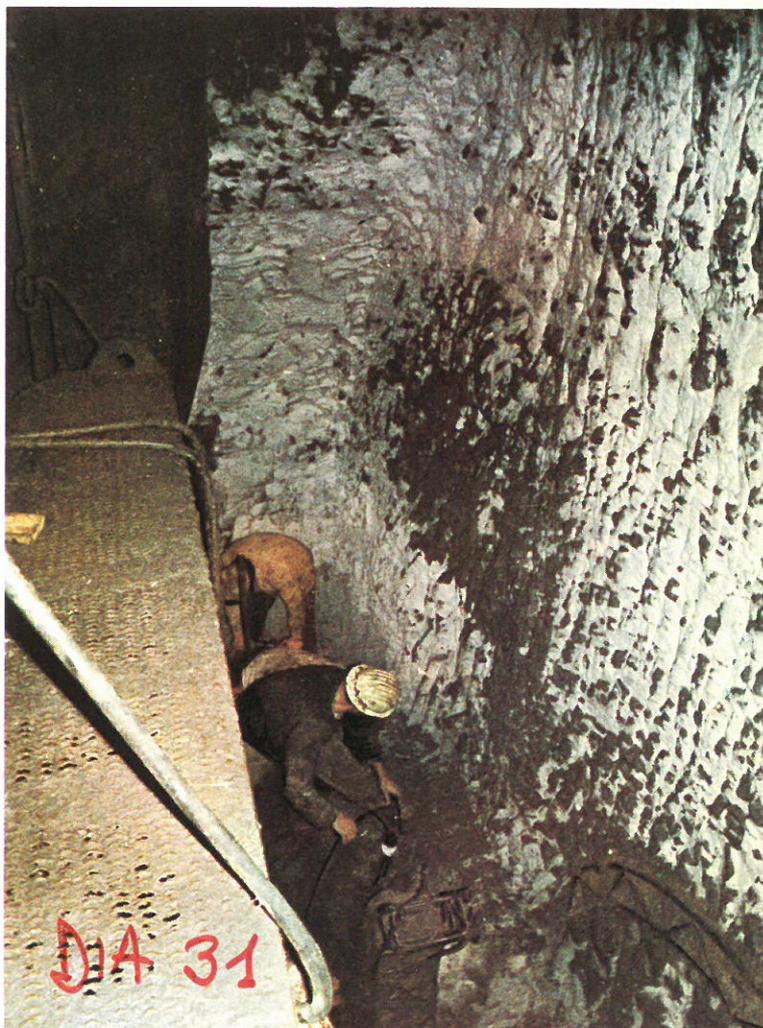


Fig. 1 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Sezione longitudinale in corrispondenza alla zona dei due incidenti. La figura mostra la situazione delle opere al momento dell'arresto dei fronti di scavo ed anticipa i trattamenti specializzati per il consolidamento del tratto disastrato

La tecnica del congelamento del terreno va diffondendosi sempre di più anche in Italia e spesso volte diviene determinante nella soluzione di problemi assai difficili.

In altre pubblicazioni (1) abbiamo esposto applicazioni molto particolari che si riferivano alla realizzazione di grandi e profondi pozzi eseguiti in terreni finissimi sotto falda; abbiamo inoltre presentato al Congresso di Barcellona del maggio 1974 una trattazione generale su questa tecnica.



Figg. 2, 3 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Fase di scavo della galleria in terreno congelato inglobante il cunicolo d'avanzamento riempito di materiale sfornellato. Si possono notare le centine deformate dall'incidente e l'ottimo stato di consistenza assunto dal limo (allo stato « semi-fluido » prima del congelamento)

* Ingegnere Consulente della Ing. G. Rodio & C. S.p.A.

** Ingegnere della Ing. G. Rodio & C. S.p.A.

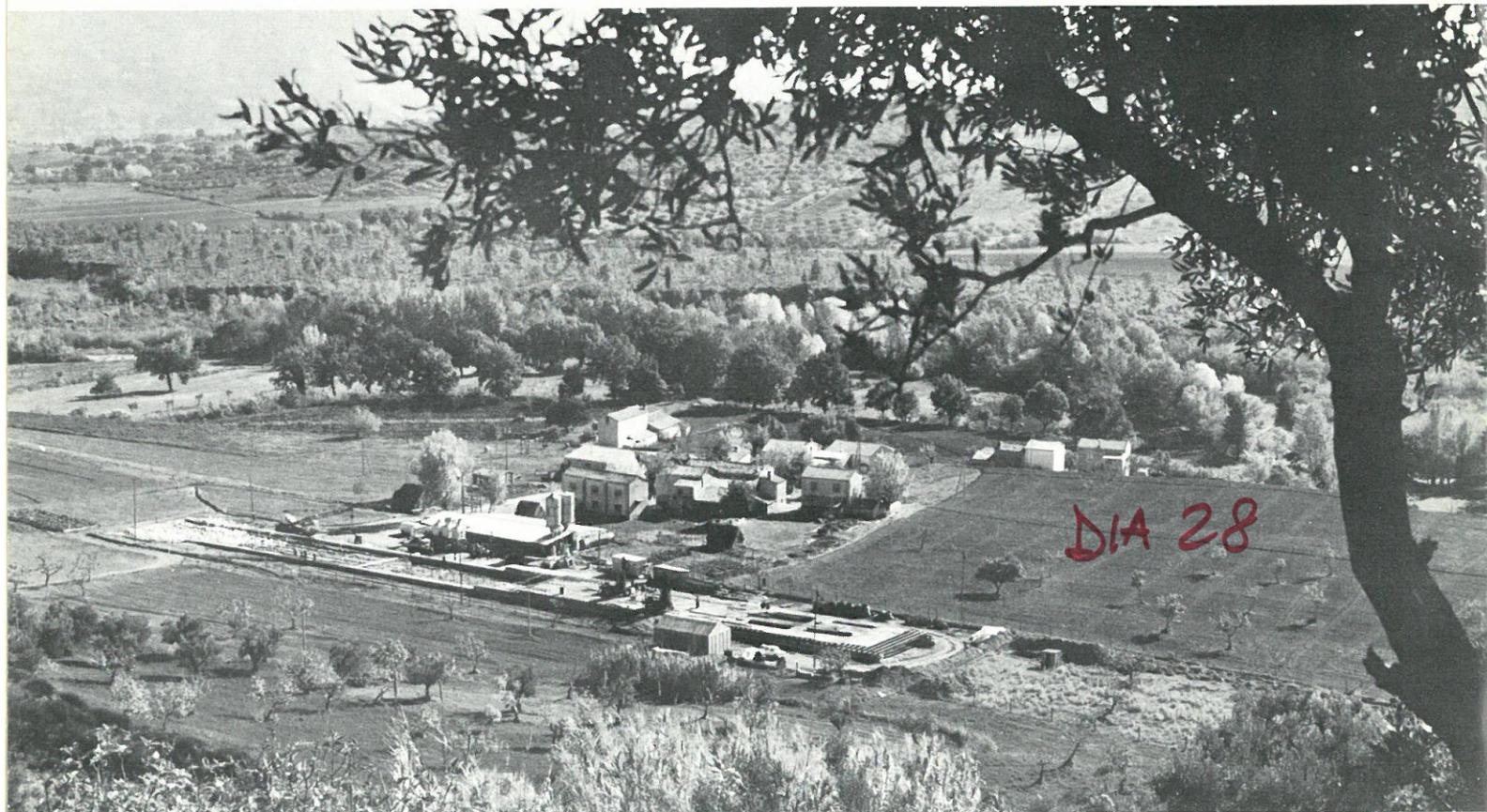


Fig. 4 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Visione panoramica del cantiere lungo il tratto di 150 m delimitato dai due « camini ». La zona verso Cosenza è già in fase di congelamento

Riteniamo utile esporre qui di seguito due interventi di congelamento impiegati, questa volta, per la ripresa di scavi in sotterraneo che per fenomeni di varia natura erano stati bruscamente interrotti da dissesti di notevole entità.

Interessante è constatare come la tecnica attuale del congelamento consenta interventi geometricamente molto precisi; a differenza di altri pur validi mezzi di consolidamento, il congelamento fornisce al progettista delle dimensioni e caratteristiche esatte del « muro » di protezione che si viene a costituire, per cui il fattore di sicurezza può essere tenuto più basso rispetto ai valori di norma adottati nei problemi geotecnici.

Per gli interventi qui descritti è stato sempre applicato il procedimento indiretto a ciclo chiuso (doppio scambio), il cosiddetto « congelamento a salamoia »; il procedimento diretto ad « azoto liquido » è stato scartato per i seguenti motivi:

— alle attuali condizioni di mercato il costo sarebbe risultato molto superiore;

— la maggior spesa d'altra parte non sarebbe stata giustificata da esigenze tecniche particolari; infatti non era necessario in nessuno dei casi considerati raggiungere elevate resistenze meccaniche del terreno congelato, né vi era alcuna ragione di intervenire con trattamenti di congelamento rapido non essendovi sensibili movimenti di falda.

(1) — Un'applicazione mista d'iniezioni e congelamento con azoto liquido sull'Autostrada del Brennero. (L'Industria delle Costruzioni, n. 26, 1971).

— La tecnica del congelamento dei terreni per risolvere un delicato problema geotecnico sulla S.S. 36. (L'Industria delle Costruzioni, n. 38, 1973).

— Congelación de los terrenos. (Materiales, Maquinaria y Métodos para la Construcción, Barcelona, n. 119, 1975).

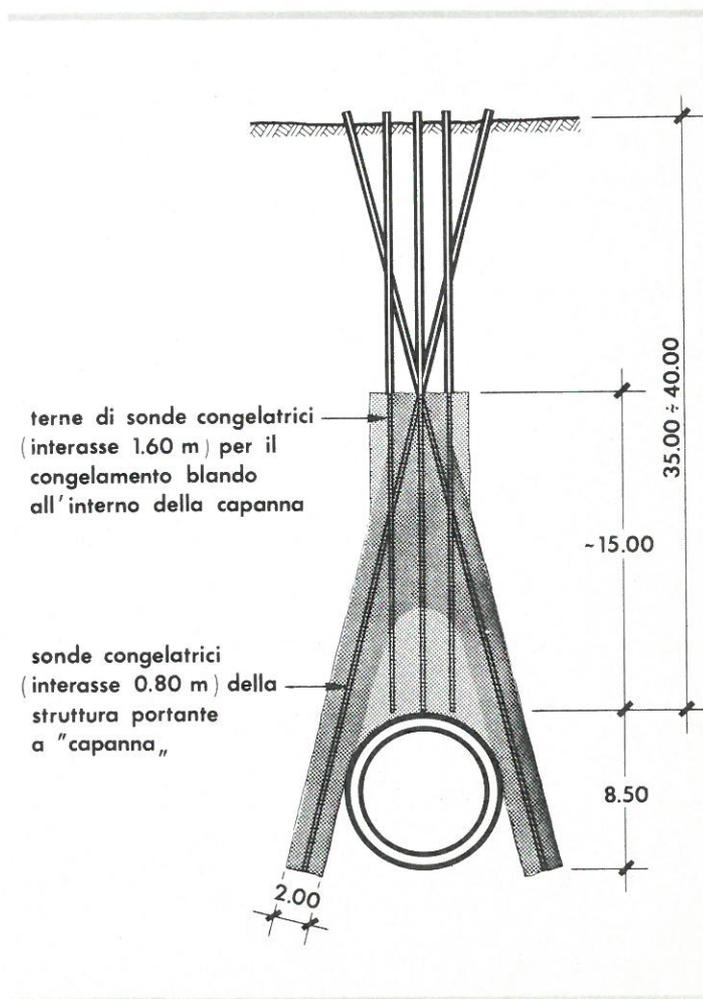


Fig. 5 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Sezione trasversale tipo del trattamento di congelamento

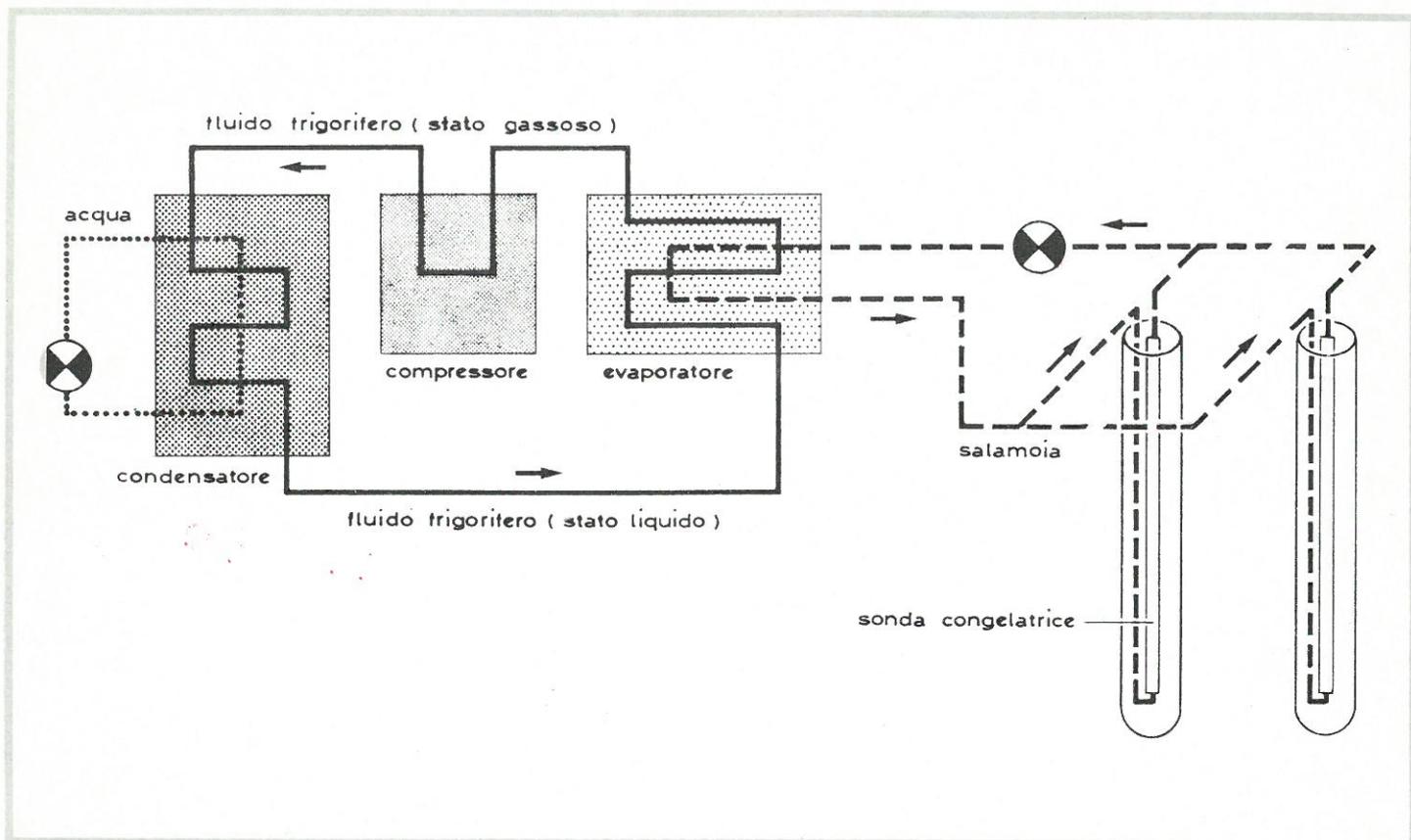


Fig. 6 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Schema dell'impianto frigorifero e dei circuiti. Procedimento indiretto. Ciclo chiuso (doppio scambio termico)

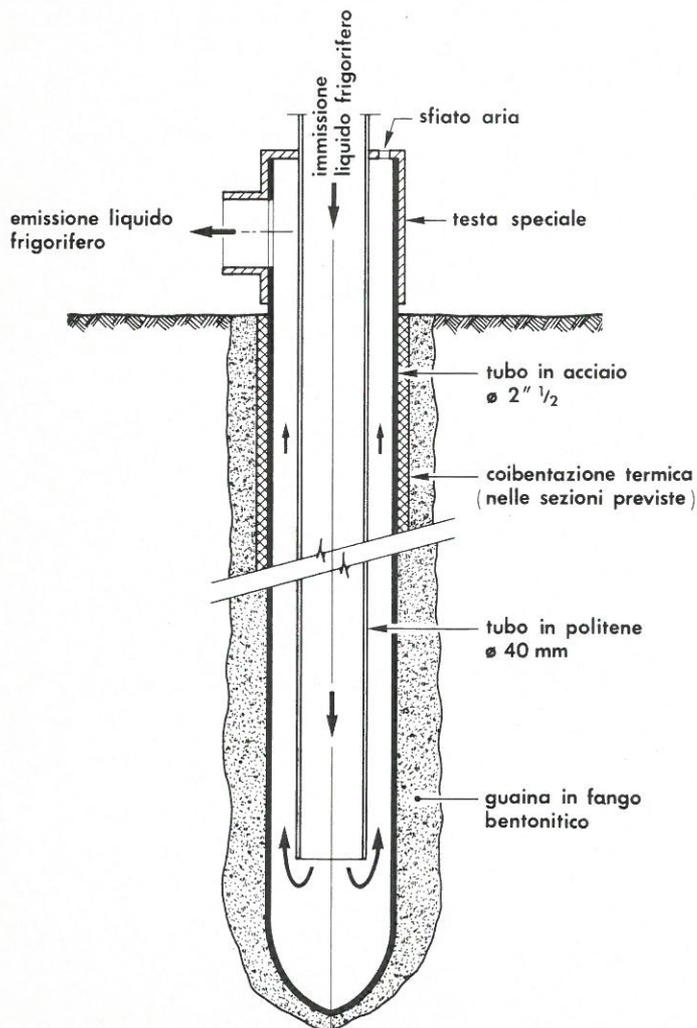


Fig. 7 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Dettaglio di una sonda congelatrice posta in opera nel terreno

LA GALLERIA FERROVIARIA PAOLA-COSENZA *

La galleria per il tratto di competenza dell'Impresa Farsura è stata affrontata con due sistemi di scavo differenti:

— a partire da qualche centinaio di metri dall'imbocco lato Cosenza, è stato impiegato uno scudo circolare di diametro di 8,50 m ed il terreno rivestito immediatamente mediante conci prefabbricati;

* Progetto: Ministero dei Lavori Pubblici - Ufficio Speciale per le Nuove Costruzioni Ferroviarie.

Ente Appaltante: Ministero dei Lavori Pubblici - Ufficio Speciale per le Nuove Costruzioni Ferroviarie.

Impresa esecutrice: Farsura S.p.A., Milano-Roma.

Lavori specialistici: Rodio S.p.A. - Casalmaiocco, Milano (in subappalto dalla Impresa Farsura).

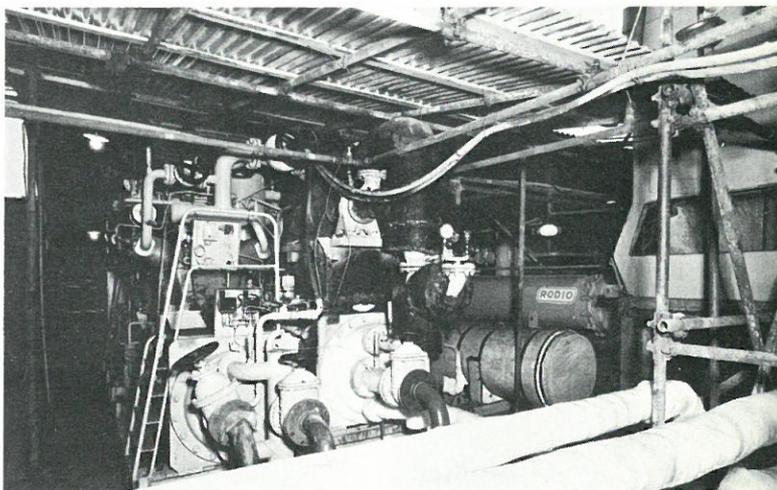


Fig. 8 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Vista parziale della centrale frigorifera, composta da 4 gruppi compressori per una potenza totale installata di 750 kW. In basso si possono notare le testate di due scambiatori termici con i termometri sui tubi di entrata e di uscita della salamoia



Fig. 9 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Le torri di raffreddamento dell'impianto frigorifero

spesso trasportavano la frazione più fine degli strati sovrastanti dando origine a fornelli sempre più frequenti che venivano con grande fatica contenuti in dimensioni compatibili con la sicurezza.

La situazione ha continuato a peggiorare tanto che alla progressiva 13 + 0,12 è stato sospeso l'avanzamento a tutta sezione; si è proceduto con la realizzazione di un cunicolo di sezione ridotta (rivestito con centine reticolari e spritz-beton) che è penetrato con varie vicissitudini nei limi sabbiosi, spesso allo stato semiliquido, fino a qualche metro di distanza dall'avanzamento dello scudo (Fig. 1 - sezione longitudinale).

A questo punto, come già detto, alla progressiva 14 + 827,50 lo scudo ha dovuto sospendere l'avanzamento a causa di un importante sfornellamento che non ha potuto essere contenuto e si è trasformato in « camino » coinvolgendo il terreno fino in superficie per gli oltre 35 m di copertura.

Si è registrato un abbassamento del suolo di 7 ÷ 8 m, essendo il diametro dell'imbuto di 20 m in superficie circa.

Nel cunicolo la situazione diventava allora di estrema pericolosità; il lavoro veniva anche qui sospeso con l'abbandono della fresa utilizzata per lo scavo.

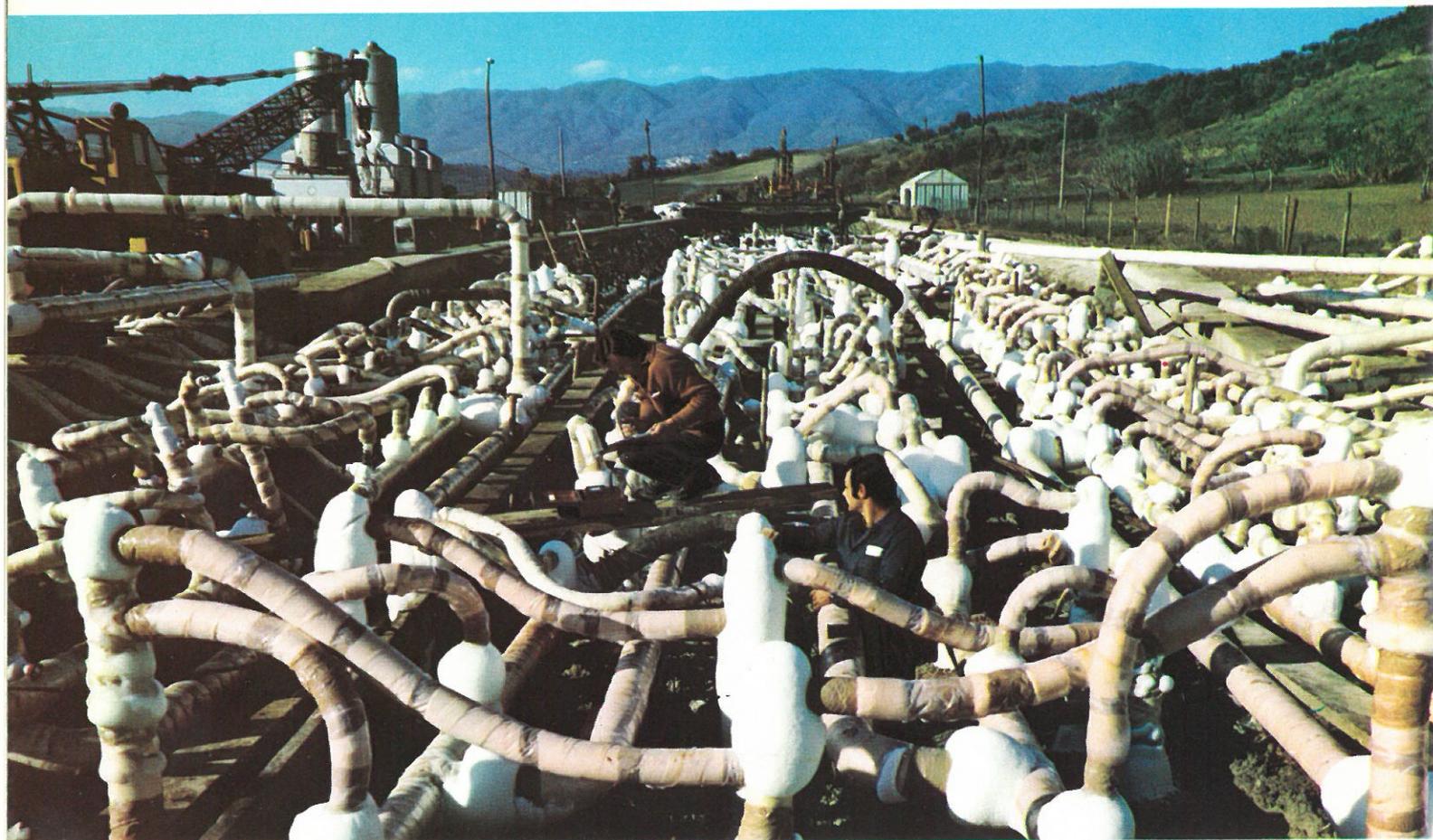


Fig. 10 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Dettaglio dei circuiti in fase di congelamento nella zona del camino lato Cosenza. Due tecnici stanno rilevando la temperatura del terreno tramite la sonda termometrica calata in appositi fori riempiti con alcool. Notare l'ottima coibentazione dei collettori principali e di tutti i tubi di collegamento tra le teste delle varie sonde congelatrici (queste ultime non coibentate perché dotate di saracinesche per la regolazione del flusso di salamoia)

— a partire da un pozzo verticale, d'altezza 130 m circa posto a 3200 m dal limite del lotto lato Paola, l'avanzamento è avvenuto mediante l'applicazione di un sistema tradizionale con centine e spritz-beton.

Mentre lo scudo ha proceduto in generale con buona regolarità fino al punto dell'incidente (progressiva 14 + 827 circa), lo scavo dal lato Paola incontrava notevoli difficoltà a causa delle formazioni di terreno instabile incontrate: venute d'acqua di sensibile portata

Dopo qualche tempo si verificava all'indietro un secondo camino, con sfornellamento del cunicolo già eseguito e fortunatamente abbandonato, a circa 140 m di distanza dallo scudo, alla progressiva 14+688 circa.

L'evoluzione progressiva dello sfondamento del cunicolo lungo il tratto isolato non ha potuto essere controllata in quanto nella zona intermedia il fenomeno non si è mai esteso fino in superficie: è certo tuttavia



Fig. 11 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - La piattaforma di lavoro, costituita da putrelle metalliche accostate poggianti su due muri in c.a. correnti ai lati della zona dissestata. Le 2 sonde perforatrici (Hausser HBM 12) lavorano così in piena sicurezza e con la precisione necessaria

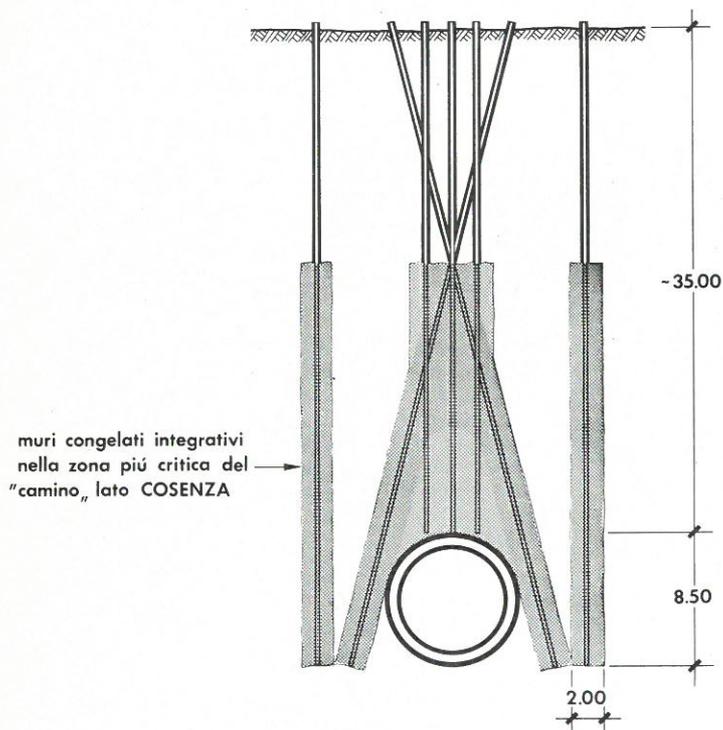


Fig. 12 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Sezione trasversale in corrispondenza della parte centrale del dissesto, lato Cosenza. Il limo, qui allo stato praticamente fluido, ha richiesto un trattamento supplementare di rinforzo

che la maggior parte del cunicolo sia stata coinvolta dal fenomeno perché durante il successivo scavo sono venute man mano alla luce le centine reticolari completamente deformate (Figg. 2 e 3).

La figura 4 fornisce una visione panoramica del tratto delimitato dai due incidenti; la zona di estrema pericolosità si estendeva per oltre 150 m.

Fig. 14 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Particolare di una sonda congelatrice appena messa a nudo sul fronte di scavo. Osservare la notevole consistenza del terreno limoso congelato: nelle zone dei due camini sono state necessarie operazioni di alleggerimento mediante martelli perforatori per consentire l'avanzamento dei taglianti dello scudo (malgrado la notevole capacità di spinta dello scudo stesso)

Fig. 13 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Il fronte di scavo completamente congelato nel corpo del camino lato Cosenza. Si possono notare i taglianti dello scudo ed una sonda congelatrice ancora in posto



Si è ritenuto impossibile riprendere gli scavi senza l'ausilio di un sistema che fosse in grado di assicurare il lavoro, conferisse cioè al terreno — che aveva la consistenza di un fango semiliquido — l'autoportanza necessaria per lo scavo con lo scudo e la posa dei conci prefabbricati dell'anello di rivestimento definitivo.

La scelta del trattamento più idoneo

Dopo un approfondito esame della situazione si è deciso di adottare un trattamento di consolidamento mediante congelamento.

La preminente presenza di frazione di terreno molto fine immerso in falda (limo-limo sabbioso) faceva ritenere dubbia la riuscita di un intervento con iniezioni anche impiegando gel di silice; ne sarebbe comunque risultato un costo superiore.

D'altra parte l'iniezione di resine molto penetranti, del tipo resine fenoliche, avrebbe raggiunto costi ingiustificati, malgrado il carattere permanente che simile intervento avrebbe assunto.

Ragioni tecniche dunque ed economiche hanno guidato la scelta definitiva.

La geometria dell'intervento

La posizione della galleria e la morfologia della zona sovrastante hanno consentito l'esecuzione di un trattamento a partire dalla superficie.

In figura 5 abbiamo riportato in sezione la disposizione dei tubi congelatori. Come si può notare il trattamento ha comportato:

1) la costituzione di una *struttura portante* di terreno congelato « a capanna », ottenuta con due muri congelati di larghezza 2,00 m, paralleli all'asse della galleria ed intersecantisi a 15 m sopra la chiave della galleria.

Le sonde congelatrici, inclinate di 20° circa rispetto alla verticale, sono state poste ad un interasse di 0,80 m.

2) il *congelamento blando* del volume di terreno compreso tra la calotta e la « capanna » portante, allo scopo di impedire distacchi di porzioni di terreno durante lo scavo.

Questo secondo effetto è stato ottenuto mediante terne successive di sonde congelatrici poste ad interasse di 1,60 m.

Queste sonde centrali sono state prolungate per tutta la superficie di scavo ogni 16 m in modo da costituire dei « setti » congelati e così prevenire riflussi di materiali dal fronte: sono state identicamente prolungate nelle zone dei due camini.

Per una riuscita sicura del congelamento è stato necessario eseguire un trattamento di ricomprensione del terreno mediante iniezioni cementizie per una certa porzione attorno ai due « camini » (Fig. 1).

La tecnologia dell'intervento

Come già riferito è stato adottato il metodo di congelamento cosiddetto « a salamoia »: procedimento indotto a ciclo chiuso (doppio scambio).

La figura 6 riporta lo schema dell'impianto e la figura 7 un dettaglio della sonda congelatrice, costituita da un tubo in ferro esterno di 2"1/2 ed uno interno di pvc da 40 mm di diametro.

Nelle sonde congelatrici viene fatto circolare in modo continuo un fluido (soluzione di CaCl_2) mantenuto dai gruppi frigoriferi ad una temperatura di -25°C circa.

Le sonde sono state alloggiare in fori eseguiti a rotazione con circolazione di fango bentonitico.

Le figure 8 e 9 mostrano particolari dell'impianto

frigorifero, mentre la figura 10 riporta un panorama generale dei circuiti in fase di congelamento.

Le modalità dell'intervento

La potenzialità dei gruppi congelatori è stata predisposta in funzione della velocità di avanzamento dello scudo stabilita in 2,4 m/giorno (pari alla posa di tre anelli completi del rivestimento prefabbricato).

Tenuto conto del tempo occorrente per la costituzione dei muri congelati progettati (mediamente 20 giorni) è stato necessario tenere sotto congelamento simultaneo un tratto di 48 m di galleria.

In fase di regime, man mano che lo scudo avanzava, venivano giornalmente staccate le sonde congelatrici interessanti la zona attorno al fronte di scavo e contemporaneamente inserite sonde nuove per 2,40 m oltre la porzione di 48 m di lunghezza già sotto congelamento.

Sono occorsi quattro gruppi frigoriferi per una potenza installata totale di 750 kW.

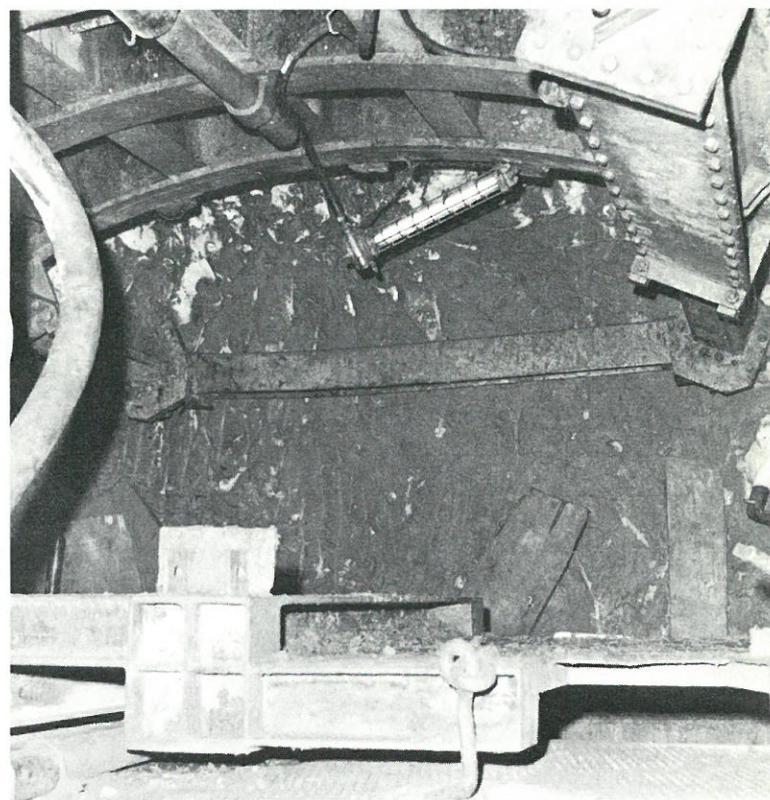


Fig. 15 - Galleria Ferroviaria Paola-Cosenza - Lo scudo in avanzamento nella zona del camino lato Paola

Il controllo delle temperature del terreno è stato effettuato mediante l'uso di sonde termoelettriche calate sistematicamente entro fori appositamente attrezzati e predisposti nei punti più significativi.

La temperatura più alta del terreno, ai lembi dei muri congelati, nei punti cioè più lontani dalle sonde, è stata di $-3,5^\circ\text{C}$ (dopo 20 giorni di congelamento).

Il cantiere - Fasi esecutive

A causa della precaria stabilità del terreno è stato necessario realizzare in superficie una struttura di sostegno delle attrezzature di perforazione in modo da assicurare un regolare svolgimento dei lavori.

In pratica sono state costruite due travi in cemento armato correnti ai due lati della zona da trattare, distanti fra loro 15 m: queste travi, come mostra la figura 11, reggevano delle putrelle in ferro che venivano spostate dove era necessaria la piattaforma di lavoro.

Malgrado le precauzioni adottate, nel corso delle prime perforazioni lato Cosenza, si è registrata una ripresa dell'azione di sfornellamento con un nuovo sensibile abbassamento del piano campagna e conseguente rottura in un punto delle due travi in cemento armato. Qualche sonda congelatrice già in opera si è rotta ed ha dovuto essere sostituita. Il fatto che il solo disturbo di perforazioni eseguite con circolazione di fango bentonitico pesante abbia reinnescato il cedimento dimostrava quanto fossero esatte le sensazioni di instabilità della zona ed in fondo dava piena giustificazione all'intervento massiccio di consolidamento mediante congelamento.

Per un tratto di una decina di metri, lato Cosenza, ritenuto particolarmente pericoloso, si è provveduto a rafforzare la struttura congelata con l'esecuzione di due muri laterali addizionali, come è mostrato in figura 12.

Se si prescinde da questo fatto anomalo iniziale, il cantiere è poi proceduto normalmente secondo quanto era stato previsto.

Lo scavo

L'avanzamento dello scudo è stato lento nel periodo iniziale, attraverso tutta la zona del fornello lato Cosenza, a causa della notevole resistenza offerta dal terreno che qui è stato congelato per tutta l'altezza del fronte (Figg. 13 e 14).

Lo scudo è quindi proseguito in ottime condizioni di sicurezza: il terreno ai limiti dello scavo era stato appena interessato marginalmente dal congelamento (estremità laterale dei muri congelati). Ai taglianti dello scudo non era perciò necessario imporre spinte eccezionali; d'altra parte nessun rifluimento di materiale è stato mai registrato ed il fronte è sempre apparso praticamente asciutto.

La velocità d'avanzamento ha subito raggiunto il valore di regime previsto in 2,4 m/giorno.

Durante lo scavo degli ultimi 60 m la velocità è stata incrementata tanto da raggiungere un valore medio di 3 m/giorno, velocità non compatibile con quella d'avanzamento del congelamento.

In prossimità del fornello lato Paola si verificava un modesto rifluimento di materiale al contatto tra il

muro laterale in formazione (mancavano 6 giorni al completamento del tempo di congelamento previsto) ed un setto congelato trasversale.

Lo scudo ha di conseguenza dovuto attendere qualche giorno per consentire alle strutture congelate di raggiungere l'uniformità e la resistenza necessarie: ha quindi proseguito e superato senza problemi il secondo fornello (Fig. 15) che era stato preventivamente protetto da due setti trasversali congelati e da iniezioni a rapida presa (a base di cemento e piccoli quantitativi di silicato di sodio).

In conclusione, possiamo in generale dire che ancora una volta il congelamento ha dimostrato la sua utilità per risolvere una situazione di estrema precarietà: teniamo tuttavia a sottolineare come in certi casi, soprattutto in quelli in cui non si può più contare sulla collaborazione del terreno (troppo rilassato), il conseguimento della sicurezza assoluta conferita dalle strutture congelate richieda l'impiego di tecnologie perfezionate nel corso di numerose esperienze: altrimenti il successo dell'operazione potrebbe anche venire a mancare.

LA GALLERIA AUTOSTRADALE S. GIOVANNI *

collegamento tra le autostrade Messina-Catania e Messina-Patti - Lotto A Bordonaro

Lo scavo delle due canne costituenti la galleria a quattro corsie di marcia veniva effettuato con il sistema tradizionale:

- scavo di calotta
- posa centine
- spritz-beton
- rivestimento calotta
- a distanza, esecuzione piedritti ed arco rovescio.

Sono stati aperti quattro fronti: i due attacchi sul lato verso Catania ed i due corrispondenti sul lato verso Palermo.

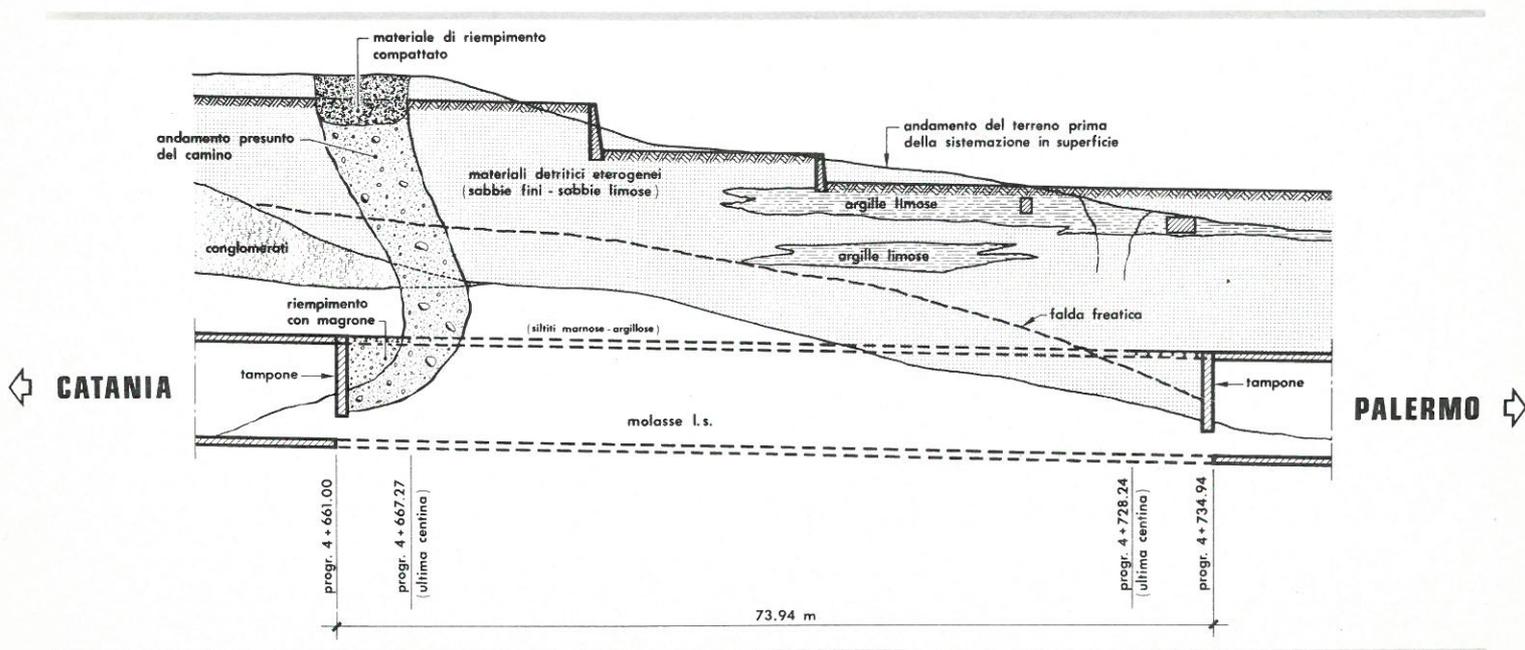
* Progetto: Technital S.p.A. (Verona).

Ente Appaltante: Consorzio per l'autostrada Messina-Palermo (Messina).

Impresa esecutrice: Lenzi S.p.A. - Granarolo Emilia (Bologna).

Lavori specialistici: Rodio S.p.A. - Casalmaiocco, Milano (in subappalto dalla Impresa Lenzi).

Fig. 16 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista destra. Profilo longitudinale con ricostruzione stratigrafica dei terreni interessanti lo scavo



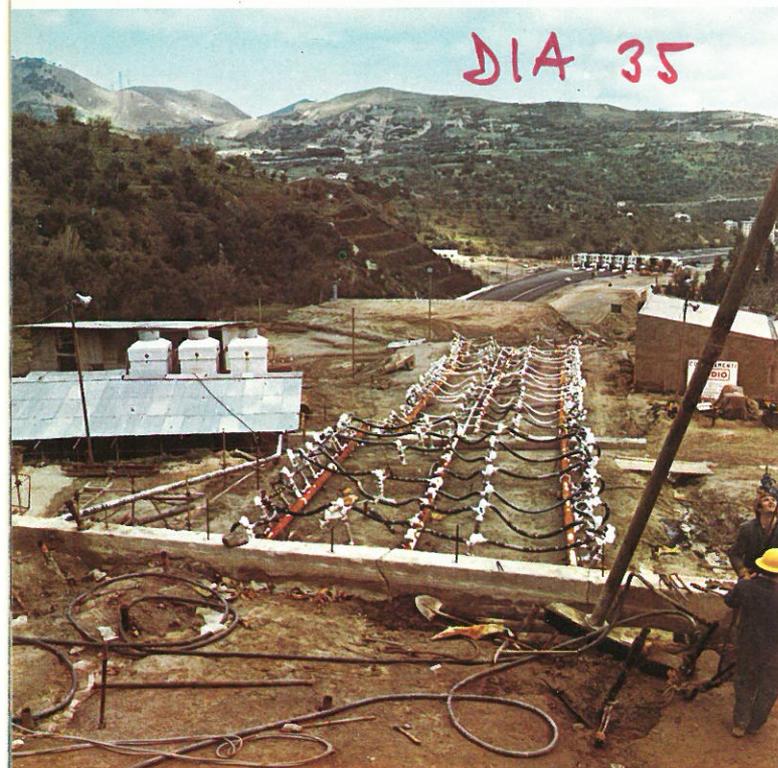


Fig. 17 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Vista panoramica del cantiere lato Palermo. Sulla sinistra la centrale frigorifera con le torri di raffreddamento, sulla destra il trattamento di congelamento in atto lungo la zona di pista destra verso lo sbocco della galleria (congelamento di regime « a capanna »)

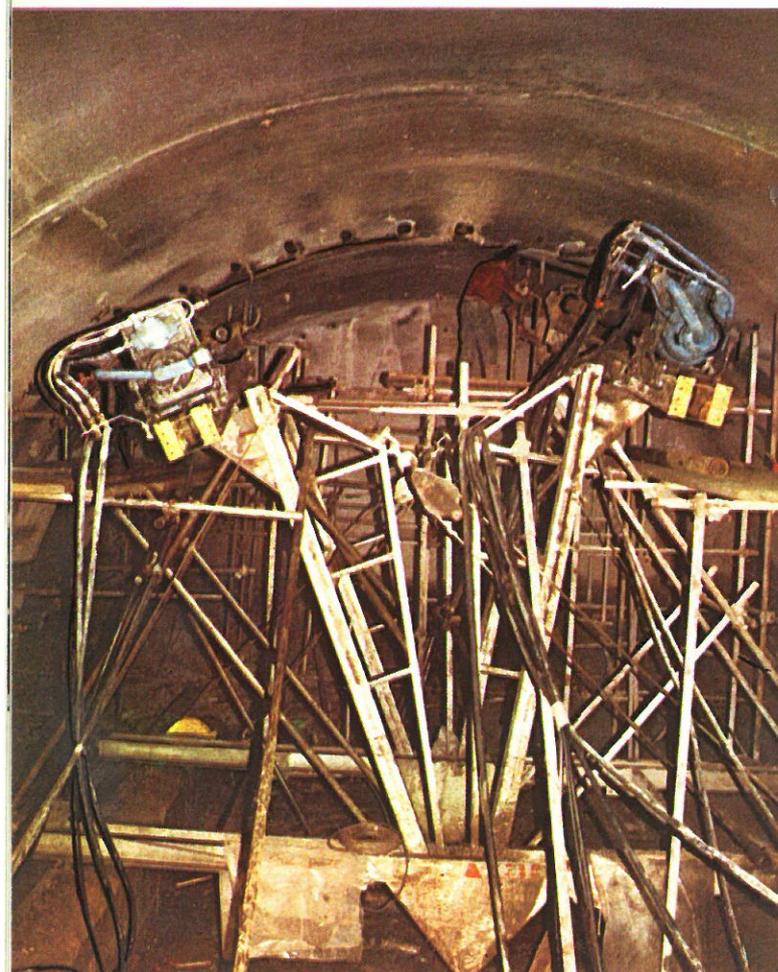


Fig. 18 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Trattamento di congelamento « a parapigioggia » eseguito in pista sinistra: le due sonde in fase di perforazione, sostenute da una struttura rotante, appositamente costruita per poter ottenere una veloce e precisa disposizione dei fori suborizzontali

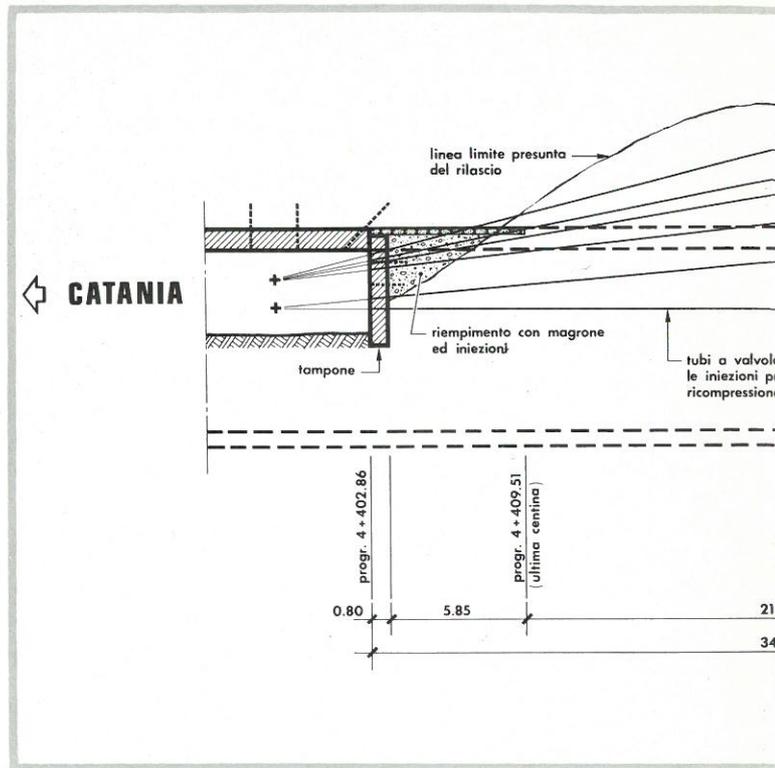
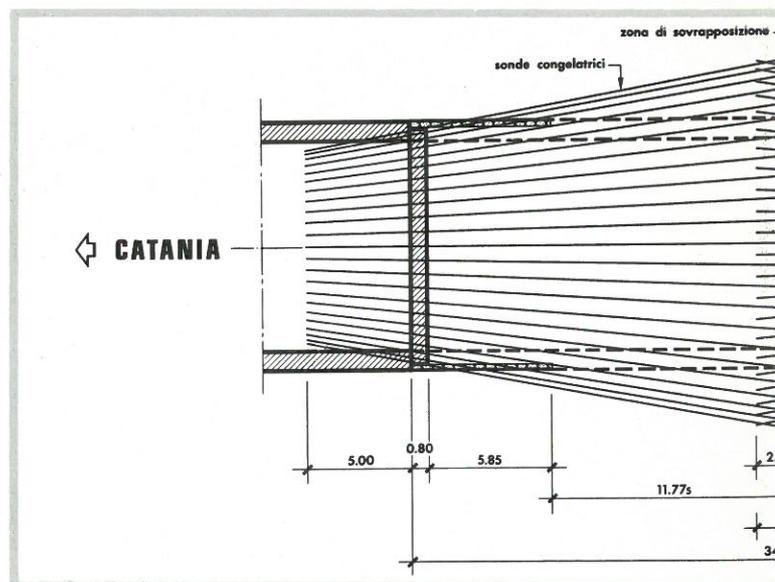


Fig. 19 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista sinistra, sezione longitudinale

Fig. 20 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista sinistra, disposizione



a) Per quanto concerne la *canna sinistra* (di monte) lo scavo ha proceduto normalmente, senza incidenti di rilievo, nei due sensi attraverso le alternanze siltitico-arenaceo-marnoso-argillose che caratterizzano la parte medio-alta della formazione delle « molasse l.s. » e, per una tratta centrale di limitata lunghezza, attraverso il sovrastante trasgressivo complesso conglomeratico, a grado di cementazione variabile, immerso in falda.

Quando i due fronti distavano fra loro 26 m circa, veniva intercettata una facies conglomeratica poco cementata e incoerente, con forte concentrazione d'acqua, che richiamava, come conseguenza della brusca variazione dello stato tensionale indotta dallo scavo, un fornello di entità tale da non poter essere contenuto, per cui si sospendevano i due avanzamenti.

Il fenomeno, anche in considerazione dei locali rap-

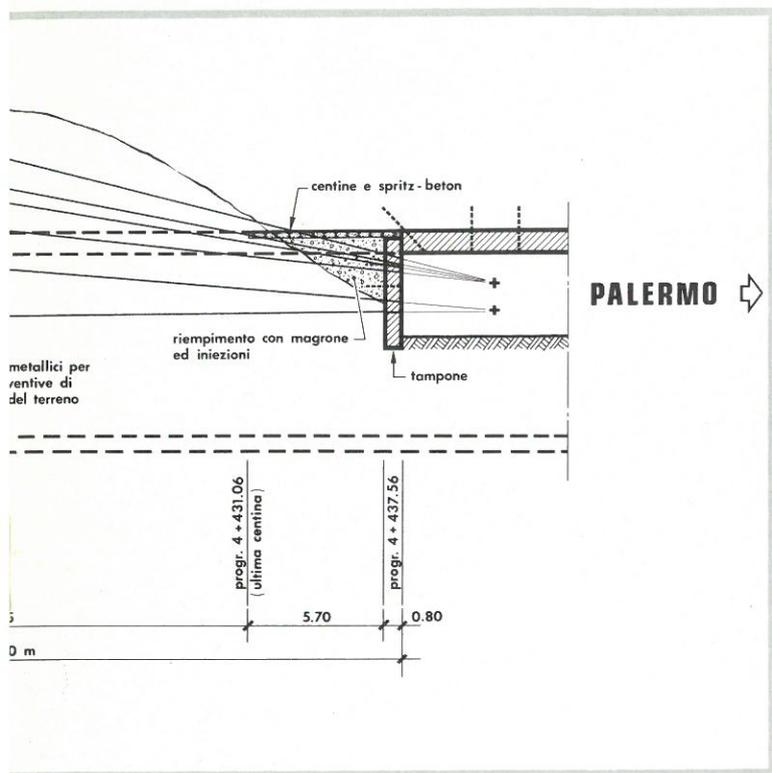
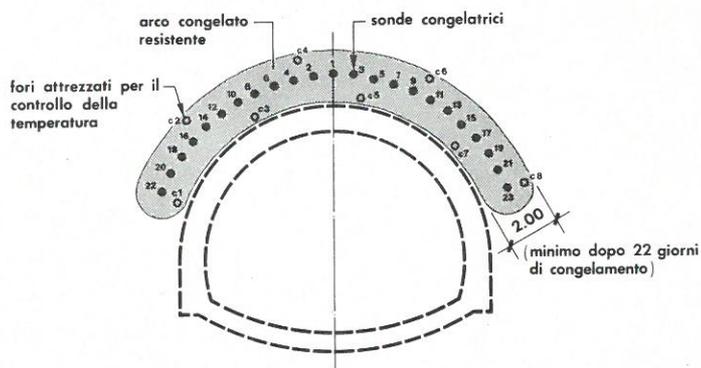


Fig. 21 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista sinistra: sezione trasversale che mostra la situazione delle sonde congelatrici e dei fori termometrici a 6 m circa oltre il muro tampono



itudinale nella zona del dissesto. Situazione all'inizio del trattamento

« a parapiooggia ») in pianta delle sonde congelatrici

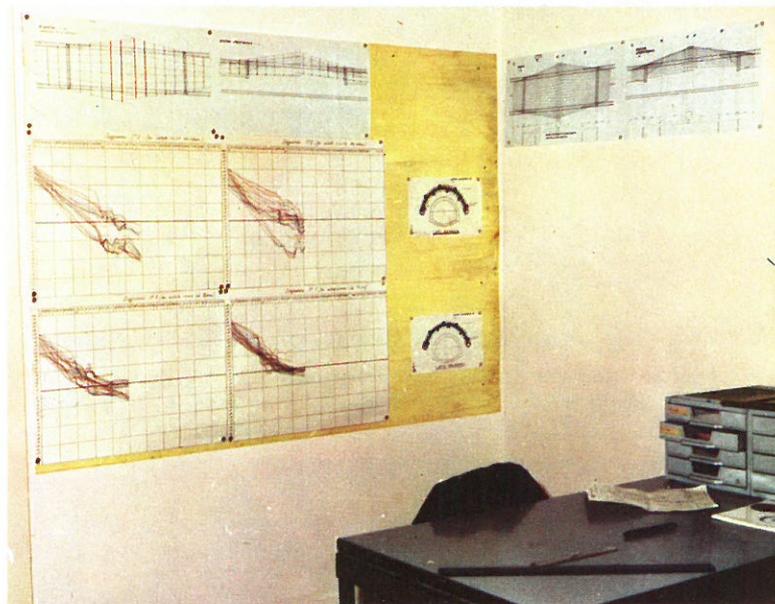
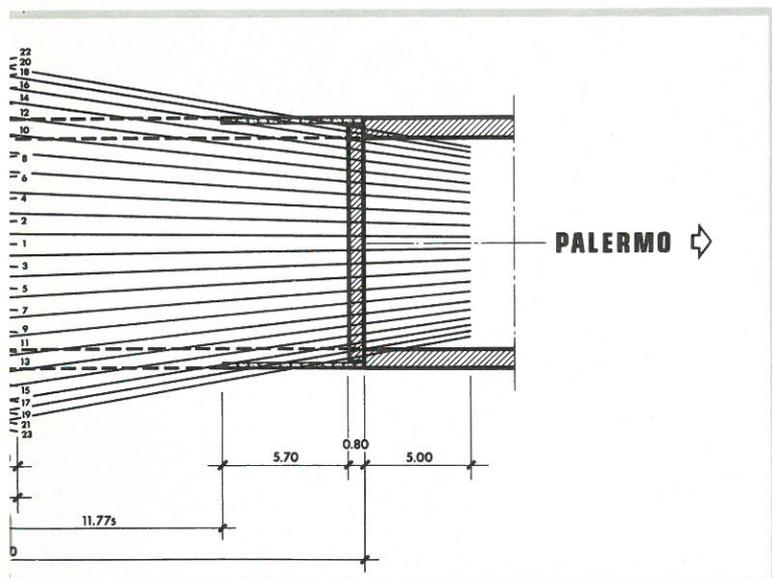


Fig. 22 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Diagrammi degli abbassamenti della temperatura del terreno in funzione del tempo; ogni linea rappresenta l'evolversi della temperatura in un determinato punto del masso in fase di congelamento. Sono state tenute sotto controllo 16 sezioni a varie distanze dai due tamponi

porti geometrici di giacitura tra i conglomerati ed il substrato molassico, si ripercuoteva lateralmente fino ad interessare il rivestimento della calotta della canna adiacente che si lesionava in modo preoccupante e doveva essere rinforzato con un reticolo orizzontale di travi provvisorie (costruite all'altezza dell'imposta della calotta).

b) Per quanto riguarda la *canna destra* (di valle), a seguito di ripetuti cedimenti nei pressi dell'imbocco lato Palermo e di tentativi di stabilizzazione mediante strutture in cemento armato eseguite in superficie (la copertura di terreno essendo di 10 m circa), si decise di abbandonare tale fronte e proseguire esclusivamente dal lato Catania.

Lo scavo ha qui proceduto con una certa regolarità nella formazione molassica compatta fino ad una settantina di metri circa di distanza dal fronte opposto.

A questo punto il « tetto » di silti variamente marnose ed argillose, localmente plastificate ed allentate, ma pur sempre dotate di una certa coesione, si riduceva sensibilmente di spessore nei confronti dei sovrastanti depositi conglomeratici e detritici incoerenti e cedeva in seguito alle sollecitazioni dovute allo scavo. Il fronte veniva pertanto invaso da materiali eterogenei fluenti provenienti dai sedimenti di copertura ed il fenomeno si ripercuoteva fino in superficie con la formazione di un « camino » (diametro 8 m circa e profondità approssimativamente 7 m). Vedere profilo longitudinale, Fig. 16.

Intervento proposto e sue finalità

Sondaggi geognostici eseguiti in precedenza denunciavano con assoluta certezza la non iniettabilità

DIA 34

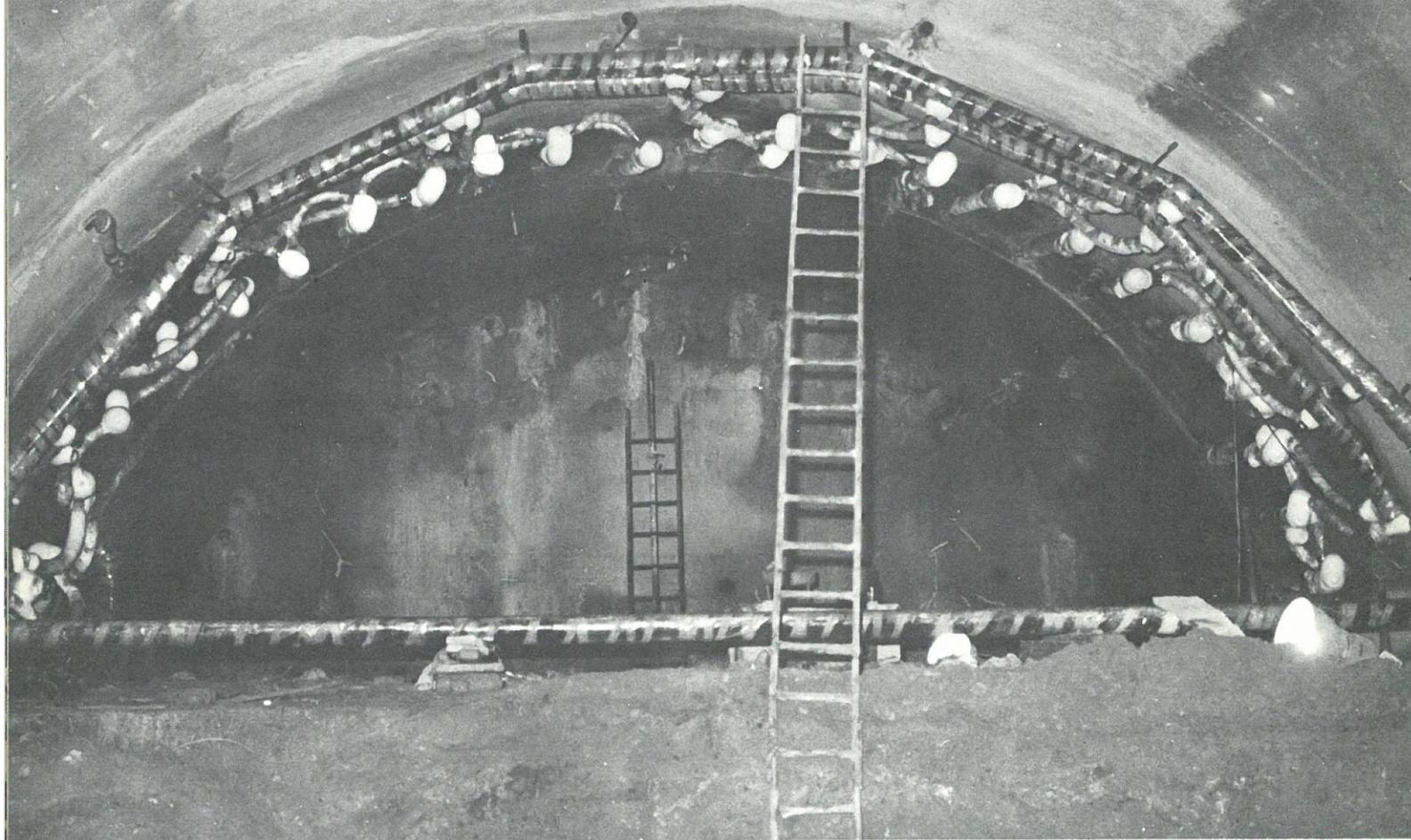
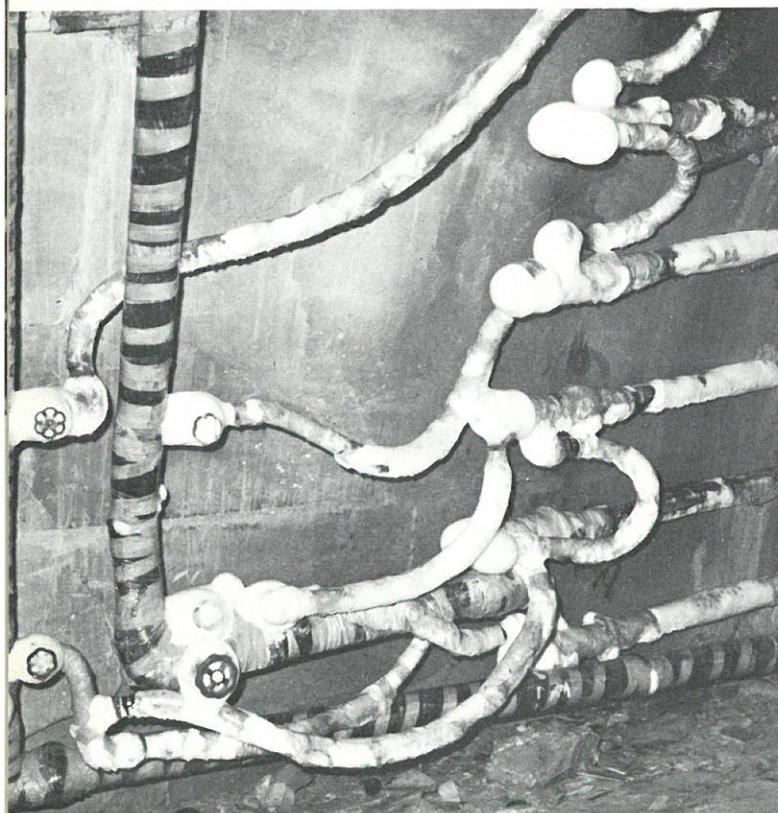


Fig. 23 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista sinistra: il congelamento in azione su uno dei due tamponi. Si notano i grossi collettori di distribuzione della salamoia coibentati e le teste di tutte le sonde congelatrici



delle formazioni interessanti la galleria: non era possibile cioè creare mediante iniezioni un arco di terreno consolidato omogeneamente, tale da consentire nelle zone franate la prosecuzione degli scavi con la necessaria sicurezza.

Si sarebbe potuto solamente eseguire un tentativo di trattamento ad alta pressione (in gergo, trattamento a « claquage ») che avrebbe comportato un notevole dispendio di materiale di iniezione senza tuttavia fornire una sufficiente garanzia di successo.

Per questi motivi e per soddisfare la richiesta della Direzione Lavori e dell'Impresa di poter condurre gli scavi, sia nella canna destra che in quella sinistra, ad una velocità media di 1 m/giorno è stato proposto un consolidamento mediante congelamento « a salamoia », preceduto da iniezioni di ricomprensione con miscele cementizie nei punti più delicati.

Come verrà meglio descritto in seguito il trattamento di canna destra ha seguito schemi tradizionali, quello di canna sinistra è risultato particolarmente interessante dal punto di vista tecnologico perché per la prima volta in Italia si è costituito un arco congelato portante a partire dal fronte della galleria (congelamento « a parapioggia »).

Fig. - 24 Galleria S. Giovanni (Messina) - Dettaglio della figura n. 23 (zona in basso a sinistra): sono bene evidenziati i due grossi tubi di mandata e di ritorno della salamoia ed i raccordi tra le sonde. Notare l'ottima azione coibente dell'armaflex utilizzato

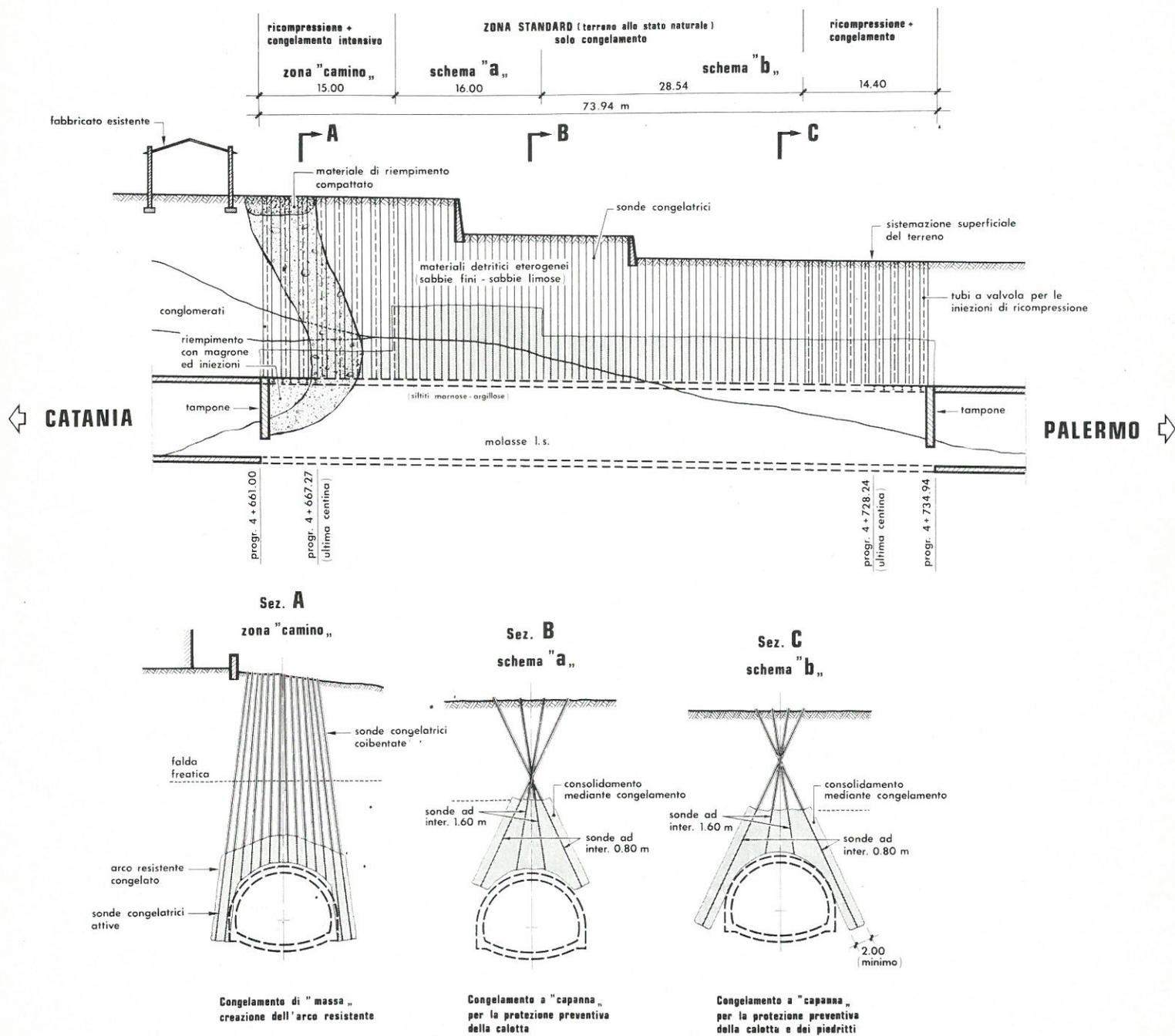


Fig. 25 - Galleria S. Giovanni (Messina) - I differenti schemi di congelamento applicati nelle diverse zone, in funzione dello stato di decompressione del terreno

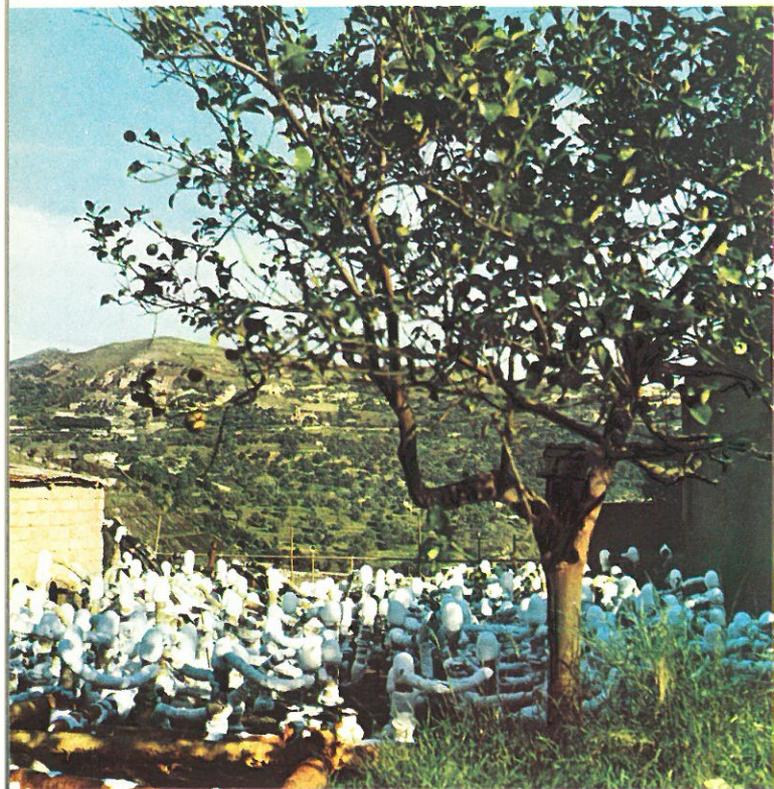


Fig. 26 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista destra. Congelatori in azione nella zona del «camino» (trattamento intensivo: vedere sezione A della figura 25)

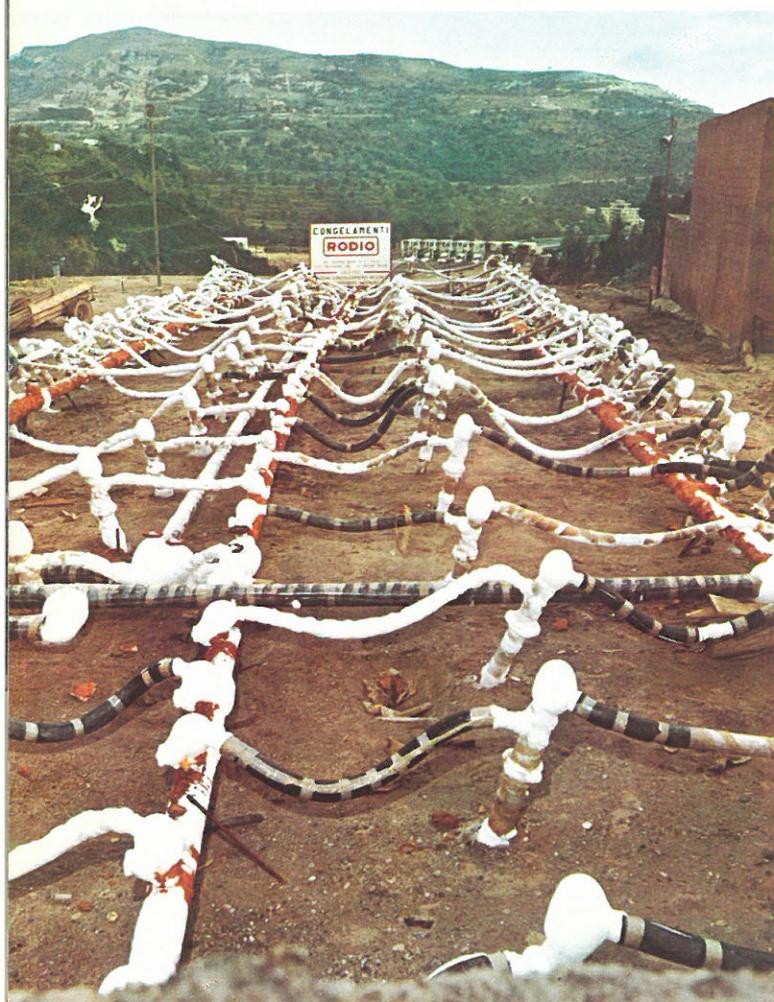


Fig. 27 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista destra. Visione panoramica del congelamento nella zona dove è stato applicato lo schema a «capanna» (figura n. 25: sezioni B e C)

Tecnologia degli interventi

Sono stati utilizzati due gruppi frigoriferi, l'uno posto nei pressi dell'imbocco lato Catania di potenza 200 KW per l'esecuzione del congelamento di canna sinistra, l'altro di uguale potenza installato sopra il breve tratto di galleria già costruita dal lato Palermo per il trattamento dall'esterno di canna destra (Fig. 17).

Il metodo di perforazione, le sonde congelatrici, i circuiti di salamoia sono stati tenuti identici a quanto già adottato per la galleria Santomarco (ferrovia Paola-Cosenza).

Dobbiamo solamente segnalare che il trattamento a parapioggia di canna sinistra ha richiesto:

- accorgimenti particolari per limitare il più possibile le deviazioni dei fori entro i quali disporre le sonde;

- l'uso del « preventer » nel corso delle perforazioni per evitare il possibile rifluimento di materiale fino al fronte, impedire cioè il reinnescimento dell'azione di sfornellamento;

- l'adozione di centratori per sostenere il tubo interno delle sonde congelatrici;

- l'applicazione di un nuovo sistema per il controllo delle temperature: sondine termoelettriche dotate di testore metallico a pattini capace di registrare per contatto la temperatura lungo gli otto tubi distribuiti nel masso da congelare (in prossimità dei lembi esterni ed interni).

La figura 18 mostra la speciale struttura rotante di sostegno delle due sonde per l'esecuzione dei fori suborizzontali del « parapioggia ».

Schemi degli interventi

Descriviamo ora brevemente gli interventi di congelamento così come sono stati eseguiti: è necessario riferire separatamente sul trattamento di canna sinistra e su quello di canna destra perché le due situazioni differiscono notevolmente sia dal punto di vista geometrico sia da quello geotecnico.

La pista sinistra

È stata la prima in ordine di tempo ad essere affrontata.

In figura 19 è riportata la situazione nella zona dell'incidente, tra le progressive 4+402,86 e 4+437,56 dove si sono potuti impostare i due muri tampone in calcestruzzo contrastati dai rivestimenti di calotta completati.

Come si può notare lo scavo era andato oltre le progressive sopra riferite, ma il crollo occorso quando i due fronti distavano 26 m circa coinvolgeva alcune centine ed il prerinvestimento di spritz-beton per qualche metro all'indietro da ambo le parti. In definitiva il tratto isolato dai muri tampone risultava lungo 34,70 m, per cui veniva deciso di impostare un doppio trattamento conico a partire dai due fronti.

Nella figura precedente è segnata la disposizione dei tubi a valvole introdotti per le iniezioni di ricompressione del terreno franato.

Le iniezioni di miscele a basso costo sono state ritenute indispensabili per i seguenti motivi:

- la notevole decompressione del terreno nel corpo del fornello, la probabile presenza di vuoti rendeva praticamente impossibile una perforazione precisa (minime deviazioni) e conseguentemente una corretta disposizione delle sonde congelatrici;

- la diffusione delle frigorifiche nell'intorno della sonda non è regolare e soprattutto è molto lenta se la densità del terreno è scarsa e se vi è presenza di acqua libera.

Le operazioni di iniezione si sono svolte regolarmente, si è cioè sempre raggiunta una pressione di circa 15 atmosfere: la ricompressione ha comportato l'impiego di un quantitativo di miscela pari a circa il 30% del volume di terreno interessato.

La miscela era così composta:

cemento	50 kg
acqua	100 kg
bentonite	5 kg

La figura 20 mostra in pianta la disposizione delle sonde congelatrici, mentre la figura 21 riporta la situazione del trattamento di congelamento 6 m circa davanti al muro tampone. L'interasse massimo delle sonde (a 16 m dal tampone) è stato tenuto pari ad 1 m, un poco superiore nella zona di 2 m di sovrapposizione dei trattamenti.

Lo spessore del muro congelato, controllato attraverso i fori termometrici, è risultato sempre superiore a 2 m dopo 22 giorni di circolazione di salamoia.

In figura 22 si possono notare i diagrammi degli abbassamenti della temperatura media del terreno in funzione del tempo, registrati a varie distanze dal tampone attraverso gli 8 fori per il controllo della temperatura predisposti ad una distanza di 80 cm circa dall'asse di congelamento (i diagrammi superiori si riferiscono all'imbocco lato Catania, quelli inferiori all'imbocco lato Palermo).

La figura 23 riporta la disposizione delle teste delle sonde e dei circuiti della salamoia in corrispondenza di uno dei due muri tampone: un dettaglio dei grossi tubi primari e degli attacchi alle singole sonde è mostrato in figura 24.

L'andamento del congelamento, seguito continuamente attraverso le letture dei termometri, si è svolto secondo le previsioni (a parte qualche anomalia dovuta alla deviazione dei fori di controllo rispetto alle canne congelatrici): la temperatura iniziale del terreno era compresa tra 12°C e 15°C.

— Tempo di congelamento fronte lato Catania (iniziato per primo): 22 giorni

— Tempo di congelamento fronte lato Palermo: 23 giorni.

Lo sfalsamento tra i due trattamenti era di soli otto giorni: lo scavo eseguito a partire dal lato Catania verso Palermo ha potuto iniziare dunque in piena sicurezza dopo 23 giorni dall'inizio del pompaggio di salamoia.

La pista destra

La figura 16, come già visto, rappresenta la situazione di canna destra nella zona dei dissesti, in prossimità dello sbocco lato Palermo.

Come spiegato precedentemente, questo tratto di galleria è stato interessato da fenomeni di rilassamento di notevole gravità a causa del costante approfondimento delle alternanze siltitico-arenaceo-argillose della formazione molassica.

Un vero e proprio crollo con fuoriuscita di molto materiale ed acqua dal fronte si è verificato non appena posata la centina alla progressiva 4+667,27 (21 m di copertura): si è riusciti a costruire un muro tampone in calcestruzzo 6 m circa all'indietro.

Da osservazioni locali di vario tipo si è dedotto che la lunghezza del tratto interessato dalla decompressione fosse di 15 m oltre il tampone.

Dalla parte opposta il fronte era già da tempo stato sospeso ed un tampone in calcestruzzo era stato realizzato alla progressiva 4+734,94: la situazione di decompressione, anche se con conseguenze meno appariscenti in superficie, si presentava del tutto simile all'altro fronte (zona decompressa di lunghezza 15 m circa).

Rimaneva quindi una zona intermedia di 45 m circa di lunghezza dove il terreno permaneva al suo stato naturale, non essendo stato disturbato da fenomeni esterni di nessun genere.

Tale tratto, in base alle risultanze dei sondaggi e della ricostruzione geologica dell'andamento del substrato siltitico-argilloso, è stato suddiviso in due parti agli effetti del trattamento di sostentamento ritenuto comunque indispensabile:

— un tratto « a » più interno, di 16 m di lunghezza, dove il « tetto » di siltiti al di sopra della chiave di calotta era stimato di spessore superiore a 4 m: necessità quindi di fornire un semplice aiuto all'arco naturale resistente;

— un tratto « b » più esterno dove tale « tetto » si riduceva man mano fino a scomparire totalmente: necessità quindi di affidare totalmente i carichi ad un arco resistente « artificiale » realizzato mediante congelamento.

Le condizioni sopra descritte hanno determinato lo schema dei differenti trattamenti riportati sulle sezioni longitudinali e trasversali (Fig. 25).

Si possono così distinguere, da Catania verso Palermo, nel senso della progressione del congelamento:

1) la zona camino

Sono state qui previamente eseguite delle iniezioni cementizie di ricompressione attraverso tubi a val-



Fig. 28 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista destra. Lo scavo nel punto centrale del « camino », dove il crollo ha travolto le centine. Si può notare il terreno molto ben consolidato dal congelamento: la sabbia gialla fluita dagli strati più superficiali fino in galleria è ora perfettamente asciutta

vola posti in opera a partire dalla superficie (file di fori ogni 2 m).

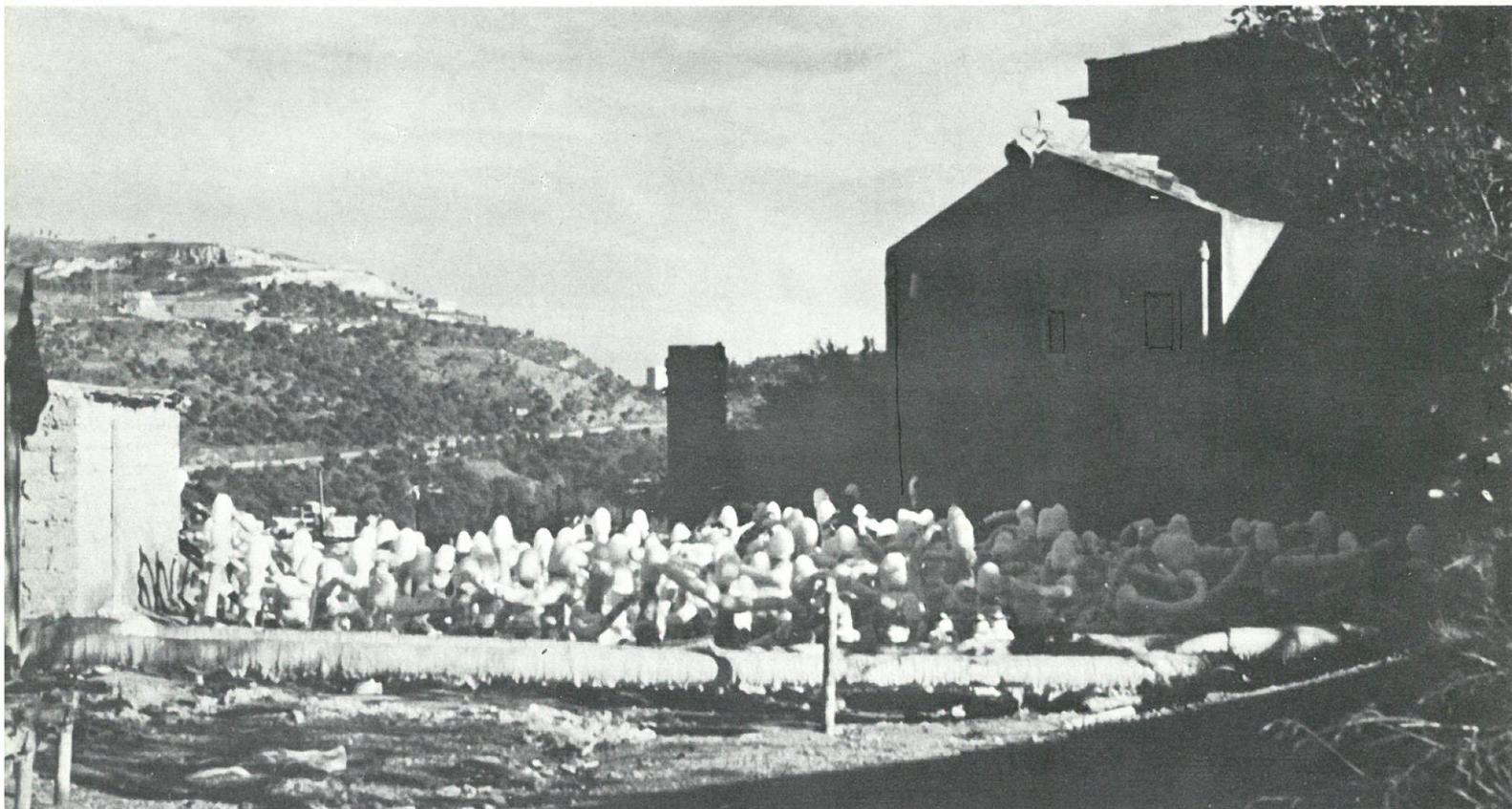
Il quantitativo di miscela assorbito è risultato pari a circa il 18% del volume di terreno trattato.

Un congelamento del tipo intensivo è stato poi realizzato secondo lo schema esposto in figura 25 (sezione A).

Le sonde congelatrici subverticali sono state poste

Fig. 30 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista destra. Si vuole far rilevare la semplicità dell'intervento preventivo nella zona oltre il camino, dove nel terreno non ancora disturbato la sicurezza dello scavo è stata assicurata da un trattamento blando (malgrado la situazione fosse assai delicata dal punto di vista geotecnico)

Fig. 29 - Galleria S. Giovanni (Messina) - Pista destra. Si vuole far rilevare la complessità dell'intervento nella zona del «camino», dove per superare in sicurezza le conseguenze del crollo si è dovuto intervenire in modo massiccio



in opera ad interasse di 1 m l'una dall'altra; nella parte superiore, al di sopra dell'arco da congelare, si è realizzata una coibentazione dei tubi congelatori mediante un rivestimento di fogli bitumati caricati con inerti ed amianto.

La circolazione di salamoia è iniziata attraverso le sonde più vicine al muro tampone ed è poi proseguita gradualmente verso Palermo; all'inizio dello scavo erano sotto congelamento 15 file di sonde per un totale di 5.000 ml circa (dei quali 3.000 ml coibentati) interessanti una lunghezza di 15 m circa di galleria. La figura 26 mostra i congelatori in azione nella zona del camino.

2) La cosiddetta « zona standard » (terreno ancora allo stato naturale)

Non sono state qui eseguite iniezioni.

Il congelamento ha comportato la costituzione di una struttura portante « a capanna » del tutto simile a quella già realizzata alla galleria Santomarco.

I due muri laterali congelati paralleli all'asse della galleria ed intersecantisi a 10 m circa sopra la chiave di calotta hanno comportato l'inserimento di sonde ad interasse di 0,80 m, mentre il congelamento del volume di terreno compreso tra la calotta e la « capan-

na » è stato ottenuto con serie di due sonde poste ad interasse di 1,60 m.

Per il tratto « a », prima definito, il congelamento è stato limitato alla zona attorno alla calotta, come è mostrato in figura 25 (sezione B).

Per il tratto « b » invece i muri laterali sono stati approfonditi in modo da proteggere anche la zona dei piedritti, come è mostrato in figura 25 (sezione C).

3) La zona decompressa lato Palermo

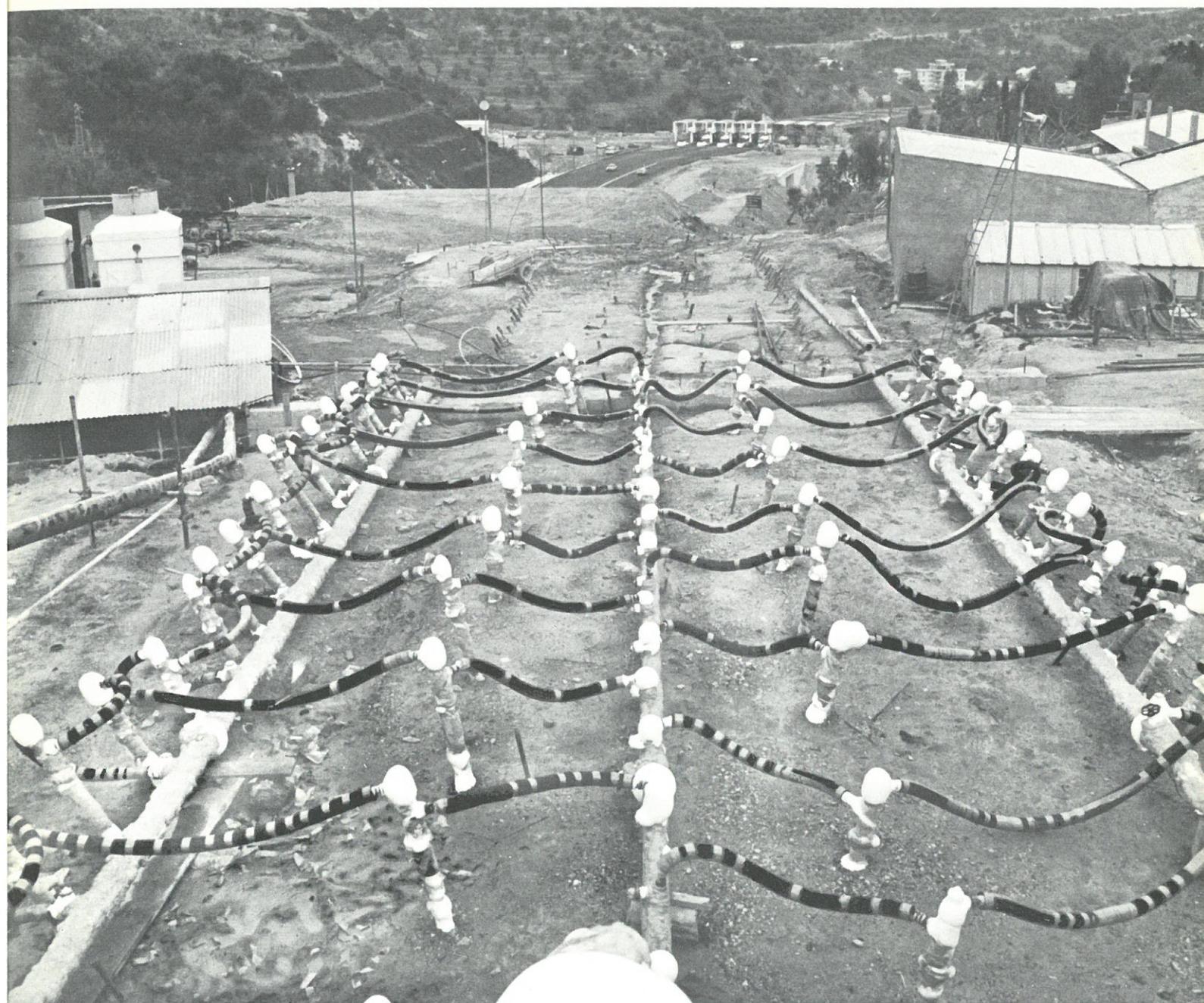
Sono qui state eseguite iniezioni preventive di ricomprensione attraverso tubi a valvole.

Per quanto concerne il congelamento è stato proseguito identicamente il trattamento a « capanna » adottato per il tratto « b » adiacente.

Il congelamento della zona standard e della successiva è proseguito da Catania verso Palermo con regolarità, di pari passo con lo scavo, ad una velocità di 1 m/giorno: il franco di terreno congelato davanti al fronte di scavo è stato tenuto di 15 m come minimo.

Il tempo di circolazione di salamoia per completare il congelamento è risultato di 23 giorni.

La figura 27 fornisce una visione panoramica del



congelamento in atto dove è stato applicato lo schema a « capanna ».

Considerazioni conclusive

Le operazioni di scavo si sono svolte regolarmente ed in sicurezza anche nelle zone più tormentate. In figura 28 si può notare il terreno molto ben consolidato ed impermeabilizzato dal congelamento proprio nel punto centrale del « camino » di canna destra: una delle centine coinvolte dal crollo appare completamente distorta ed immersa in parte nelle siltiti argillose, in parte nel materiale giallo sabbioso fluito con acqua in galleria dagli strati superficiali sovrastanti.

Gli scavi hanno generalmente incontrato terreno asciutto. Solamente in canna sinistra si è innescata una piccola venuta d'acqua in corrispondenza del rene sinistro di calotta: le preoccupazioni sono tuttavia scomparse quando si è chiarito che l'acqua proveniva dal terreno retrostante la zona congelata, attraverso un vecchio tubo di drenaggio che era stato messo in opera prima del crollo.

La velocità media di avanzamento è risultata di 0,80 m/giorno in pista sinistra, superiore al metro/

giorno in pista destra, dove evidentemente la zona di regime ha comportato operazioni più rapide (terreno congelato solo oltre i bordi dello scavo). Il sistema di avanzamento con posa di centine, rete e spritz-beton si è dimostrato ancora una volta il più adatto per situazioni di questo genere.

Ci sembra infine interessante far notare la notevole differenza che intercorre fra un trattamento eseguito per ricostituire una situazione già compromessa da un crollo ed un trattamento preventivo di protezione di uno scavo in terreno anche molto infido.

Una palese dimostrazione si può avere raffrontando la complessità dei circuiti di congelamento relativi al « camino » di pista destra mostrati in figura 29 e per contro la semplicità dello schema adottato per il trattamento preventivo nella zona di « regime » rappresentato in figura 30.

Come noto, la situazione di questo tratto di galleria si presentava molto delicata: lo strato di siltiti variamente marnose ed argillose a copertura della calotta si faceva sempre più sottile e quindi scompariva del tutto ad una trentina di metri dal tampone lato Palermo, per fare posto a terreno fino incoerente impregnato d'acqua.

È stato sufficiente il trattamento blando della figura 30 per assicurare la formazione dell'arco resistente attorno alla galleria e consentire uno scavo continuo e sicuro.

Ciò è possibile quando il terreno non ha subito

disturbo: un piccolo intervento, di costo relativamente modesto, garantisce un'omogenea distribuzione degli sforzi attraverso quegli archi resistenti che il terreno nell'intorno di uno scavo tende naturalmente a costituire.

riassunto

Viene qui dimostrato come il congelamento possa essere determinante nella soluzione di difficili problemi geotecnici.

In particolare sono descritti due trattamenti di congelamento del terreno, eseguiti con il sistema del ciclo chiuso a « salamoia », che hanno consentito la prosecuzione in sicurezza degli scavi di due gallerie: tali scavi avevano dovuto essere precedentemente interrotti a causa di crolli di notevole entità.

Gli autori fanno anche rilevare come sia più facile e meno costoso un intervento di congelamento « preventivo » da attuarsi ovviamente quando si ha modo di prevedere in tempo utile la precarietà dell'equilibrio della calotta della galleria in costruzione.

Importante è anche notare che le strutture congelate sono sempre risultate molto precise dal punto di vista geometrico ed omogeneo il grado di consolidamento ottenuto, indipendentemente dalla consistenza e granulometria del terreno naturale.

résumé

L'article montre comme la technique de la congélation du sol peut jouer un rôle essentiel dans la solution de problèmes géotechniques difficiles.

En particulier on décrit deux traitements de congélation du sol exécutés au moyen de circulation de saumure, qui ont permis de poursuivre en toute sécurité le percement de deux tunnels: les travaux avaient été précédemment suspendus à cause de remarquables éboulements qui s'étaient produits.

Les auteurs font aussi remarquer comme une intervention « préventive » est plus facile et moins onéreuse à réaliser quand on peut prévoir en temps utile les défauts d'équilibre de la voûte du tunnel à construire.

Il est aussi important de remarquer que les structures congelées se sont toujours révélées très précises en ce qui concerne leur géométrie et que la consolidation a été atteinte d'une façon très homogène, indépendamment de la consistance et de la granulométrie du terrain naturel.

summary

In this article the Authors show how the soil freezing technique may play a decisive role in solving difficult geotechnical problems.

In particular, two cases of soil freezing performed by "brine close cycle" method are described, which allowed to carry on safely with the excavation of two tunnels. Tunnelling had to be discontinued because of remarkable cave-ins.

Besides the Authors point out how it is easier and less expensive to carry out preliminary soil freezing whenever it is possible to foresee unstable condition of the tunnel under construction.

It is to be noticed that the geometry of the frozen soil portion is always in accordance with the design and the degree of consolidation obtained is quite homogeneous irrespective of the consistency and grain size of the natural soil.

zusammenfassung

Hier wird gezeigt, dass das Einfrieren entscheidend für die Lösung schwieriger geotechnischer Probleme sein kann.

Insbesondere werden hier zwei Verfahren des Einfrierens des Bodens gezeigt, die mit dem System des geschlossenen Kreisprozesses mit « Salzsole » durchgeführt wurden, die die sichere Fortführung der Ausgrabungen von zwei Tunneln gestatteten: diese Ausgrabungen mussten in der Vergangenheit infolge von umfangreichen Einbrüchen eingestellt werden.

Die Verfasser unterstreichen, dass ein « vorsorgliches » Einfrieren und weniger kostspielig ist, wenn abgesehen werden kann, dass die Kappe des zu bauenden Tunnels ein unsicheres Gleichgewicht besitzt.

Es ist hier besonders zu bemerken, dass die eingefrorenen Strukturen stets geometrisch sehr genau und der Grad der Festigung unabhängig von der Beschaffenheit und dem Kornaufbau des natürlichen Bodens waren.

resumen

Aquí se demuestra como el congelamiento puede ser determinante para la solución de difíciles problemas geotécnicos.

Se describen en particular, dos tratamientos de congelamiento del terreno, realizados con el sistema del ciclo cerrado a « salmuera » que han permitido el seguro proseguimiento de las excavaciones de dos túneles que había sido necesario interrumpir a causa de derrumbes de notable entidad.

Los autores ponen en relieve la facilidad y el menor costo de una intervención de congelamiento « preventivo » a actuarse obviamente, cuando se tenga la posibilidad de preveer con tiempo útil la precariedad del equilibrio de la parte superior de la galería en construcción.

Hay que notar también que las estructuras congeladas han resultado siempre muy precisas desde el punto de vista geométrico y homogéneo el grado de consolidación obtenido, independientemente de la consistencia y granulometría del terreno natural.