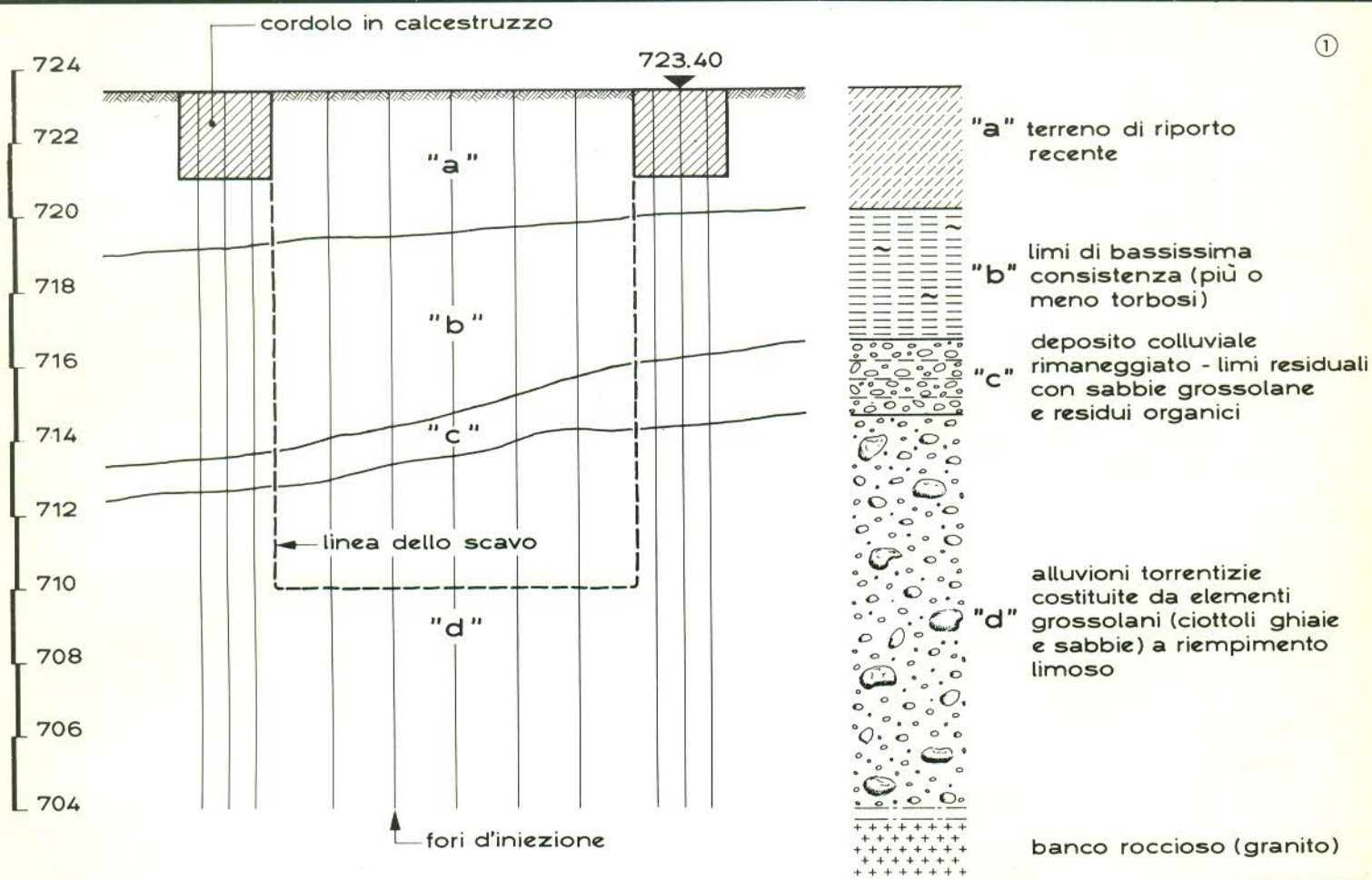


UN'APPLICAZIONE MISTA D'INIEZIONI E CONGELAMENTO CON AZOTO LIQUIDO SULL'AUTOSTRADA DEL BRENNERO

dott. ing. Achille Balossi Restelli



Stratigrafia tipo del terreno in corrispondenza delle pile del viadotto

L'attraversamento del lago artificiale di Fortezza da parte dell'autostrada del Brennero ha presentato problemi ardui relativamente alle fondazioni delle pile ed imposto soluzioni di notevole interesse tecnico.

Per la prima volta in Italia si è ricorso all'impiego di azoto liquido per il congelamento del terreno.

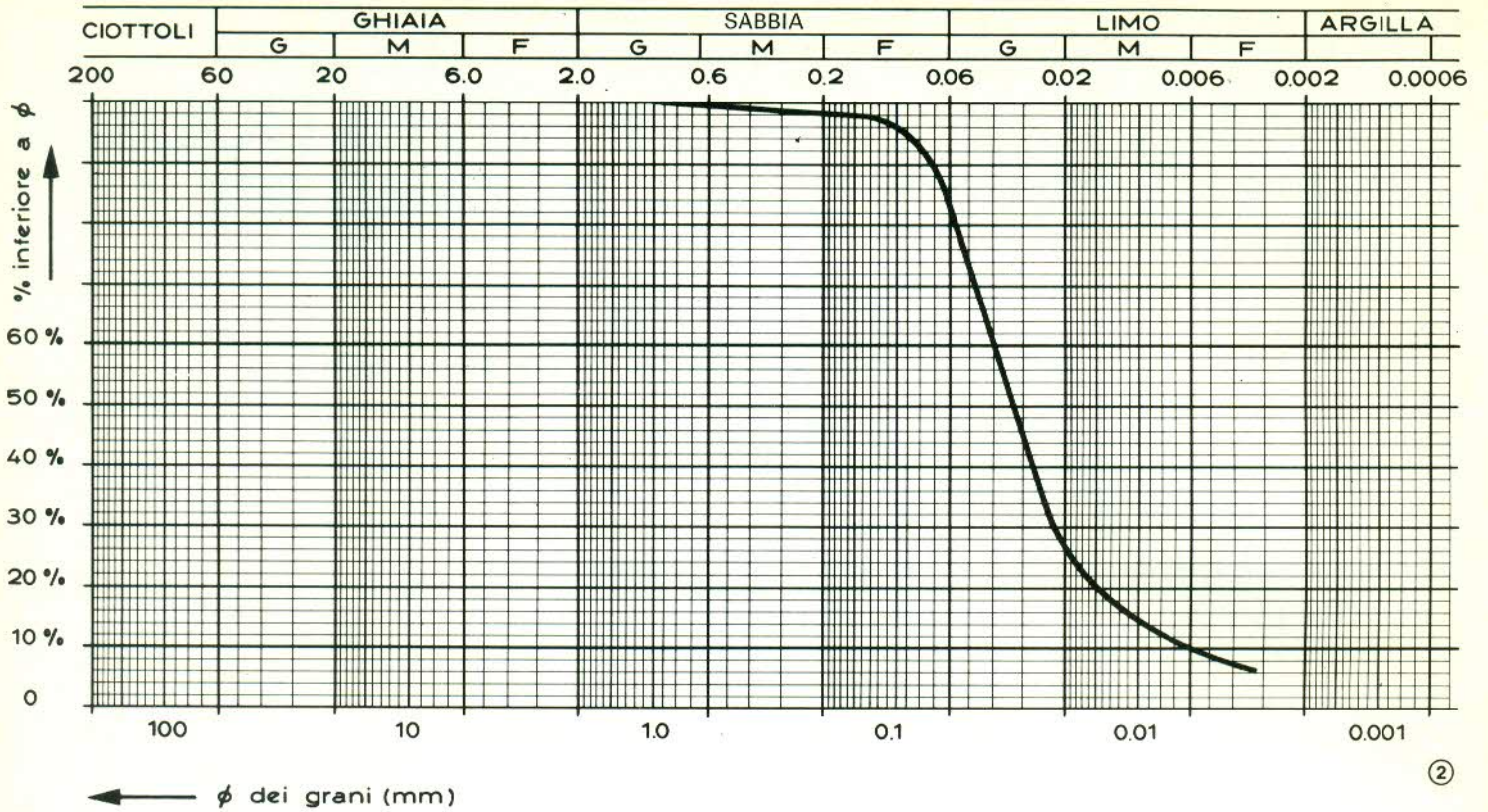
Lunga e complicata sarebbe la descrizione delle varie fasi che hanno preceduto l'esecuzione del trattamento definitivamente impiegato; il progetto delle fondazioni in alveo delle pile ha subito numerosi cambiamenti per un susseguirsi di situazioni sfavorevoli dovute più che altro alla variabilità delle condizioni idrogeologiche del bacino artificiale.

L'Isarco è infatti un fiume con altissima percentuale di « trasporto solido »; lo sbarramento di Fortezza provoca una diminuzione di velocità della corrente (tale velocità si annulla totalmente in prossimità della diga quando non vi è prelievo).

Tutto questo comporta un accumulo di elementi fini (sabbie fini, limi), per effetto di decantazione, sotto forma di veri e propri banchi anche di notevole spessore.

L'Enel provoca con frequenza annuale degli svasi rapidi in modo che l'acqua uscendo in velocità dagli scarichi della diga di Fortezza asporti almeno in parte il limo accumulatosi durante la precedente stagione.

La situazione del terreno che forma il bacino cambia dunque continuamente; generalmente i banchi di limo più lontani dal richiamo del flusso d'acqua, cioè quelli depositatisi in diverse fasi nelle zone laterali del lago, non possono essere asportati ma vengono trascinati in maniera caotica verso il centro del lago scorrendo gli uni sugli altri fino a che ritrovano uno stato di nuovo equilibrio più o meno stabile.



Curva granulometrica del limo. Campione estratto durante gli scavi dal banco di deposito limoso. Terreno tipo « b »

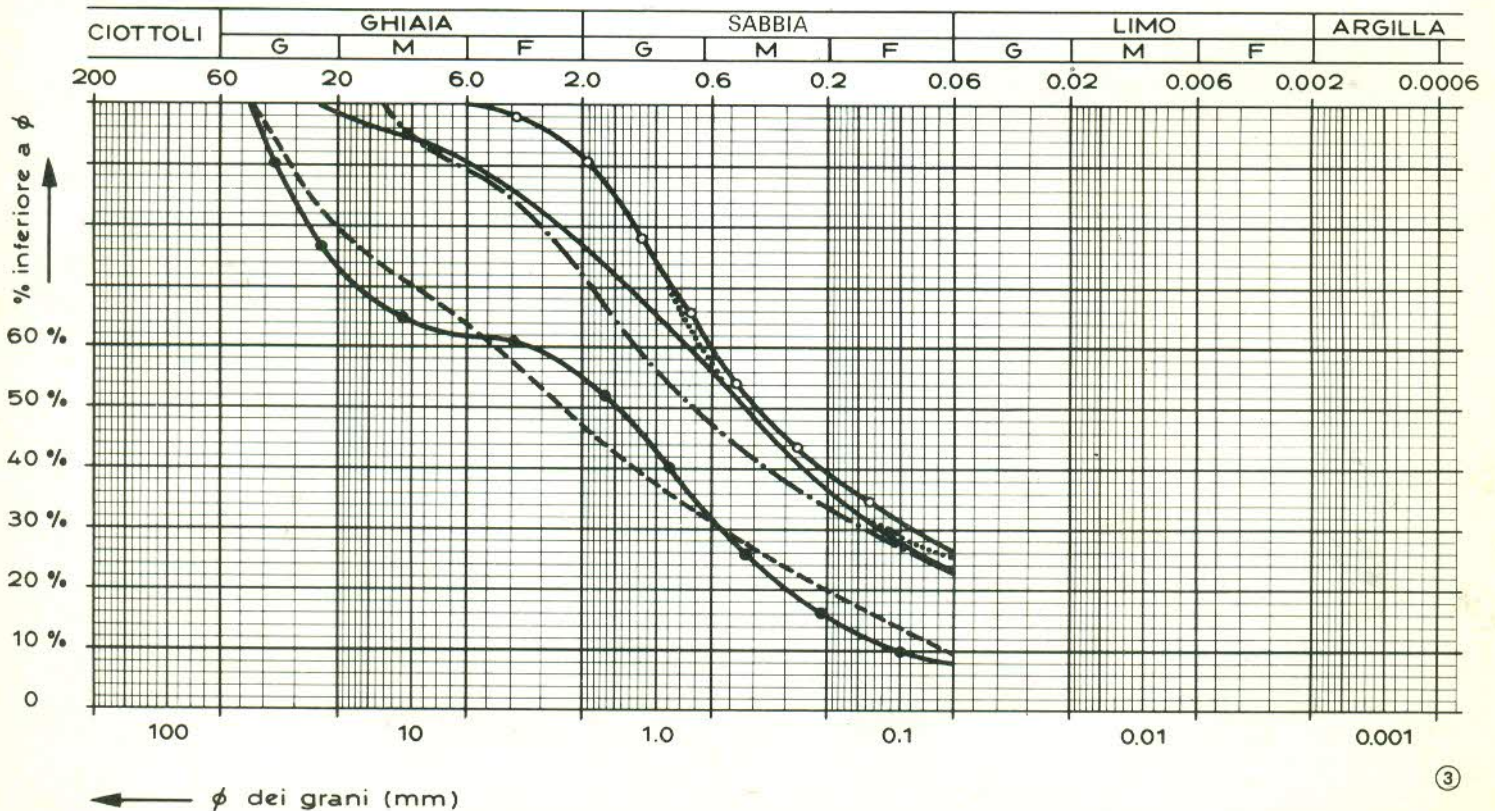
Le pile nn. 10, 9, 8, 7, 6, 5 vengono a cadere in zone dove il fenomeno dei depositi successivi di strati limosi è notevolmente accentuato; le pile nn. 4, 3, 2 sono più direttamente interessate dall'alveo attuale dell'Isarco. Gli scavi delle fondazioni devono attraversare, oltre ai banchi limosi, le sottostanti alluvioni molto « sporche », ossia cariche di frazioni fini, che

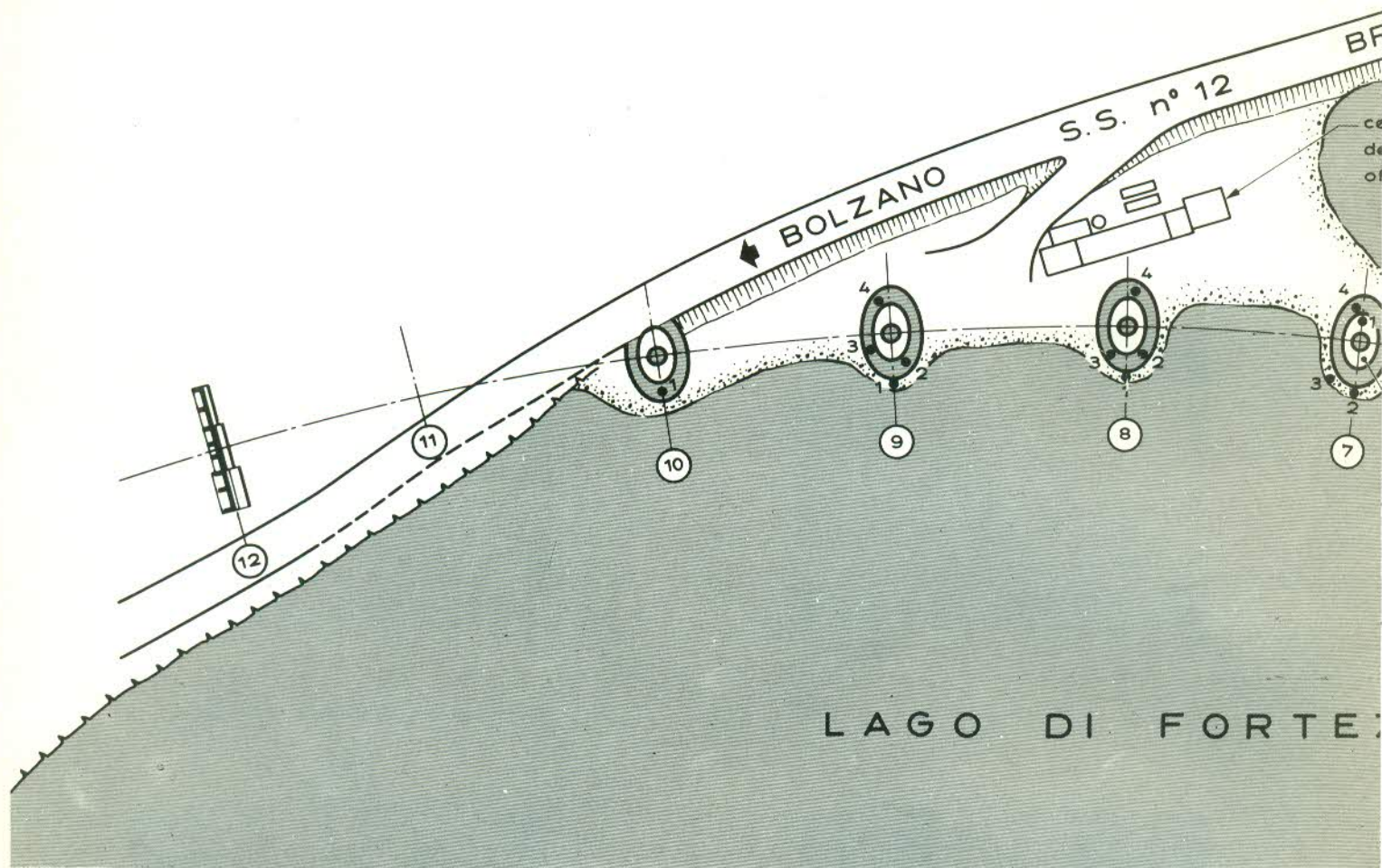
impediscono una impregnazione omogenea con miscele d'iniezioni (a base di cemento o gel di silice).

TIPO DI TERRENO

Tenuto conto della complicata meccanica della formazione degli strati di terreno nella zona sottostante il lago di Fortezza, vediamo ora come si è presentata

Curve granulometriche dei terreni tipo « c » e « d ». Campioni estratti da carotaggi eseguiti alle pile nn. 7 e 8 a varie profondità tra i 10,00 m e 15,00 m. Si può notare in generale l'alta percentuale di frazione fina





Planimetria delle pile del viadotto sul lago di Fortezza e disposizione degli impianti del cantiere

la stratigrafia del terreno interessato dalle fondazioni delle pile al momento dell'inizio dei lavori.

Sulla figura n. 1 è stata riportata la sezione tipo in corrispondenza di una pila con la sequenza dei vari tipi di terreno, evidenziati dai sondaggi di studio in un primo tempo, successivamente incontrati durante gli scavi.

Sotto il cordolo in calcestruzzo (con sommità a quota 723,40 s.m., una ventina di cm sopra la quota di massimo invaso del lago) si trovano generalmente nell'ordine:

— terreno tipo **a**: si tratta del riporto utilizzato per la costruzione dei rilevati provvisori di lavoro. Nelle zone interessate dalle iniezioni questo materiale è stato selezionato in modo da avere una granulometria adatta per una buona impregnazione con miscele normali;

— terreno tipo **b**: è il famoso limo di deposito di bassissima consistenza; basti pensare che l'umidità naturale è risultata molto prossima a quella tipica del « limite liquido ». La figura n. 2 riporta la curva granulometrica del limo;

— terreno tipo **c**: immediatamente sotto i depositi fini lacustri stanno i terreni « colluviali » che co-

stituivano la crosta superficiale prima che venisse costruita la diga. Si tratta di materiale formato principalmente da sabbia più o meno grossolana con ciottoli, mescolata con argilla giallastra e residui organici (vegetazione antecedente all'invaso);

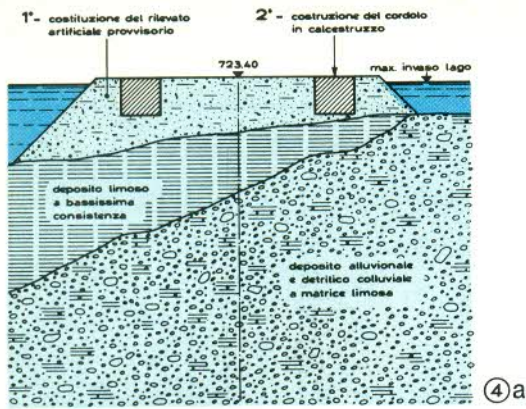
— terreno tipo **d**: sono le alluvioni fluviali mescolate con grosse scaglie e materiale più minuto di frana che hanno man mano riempito il solco vallivo. Tale terreno, come già accennato, appare sempre decisamente « sporco », ossia i vuoti sono riempiti da frazioni finissime, limo-argillose, che hanno costituito un grosso problema dal punto di vista della impermeabilizzazione.

Sulla figura n. 3 sono riportate alcune curve granulometriche delle formazioni « c » e « d ».

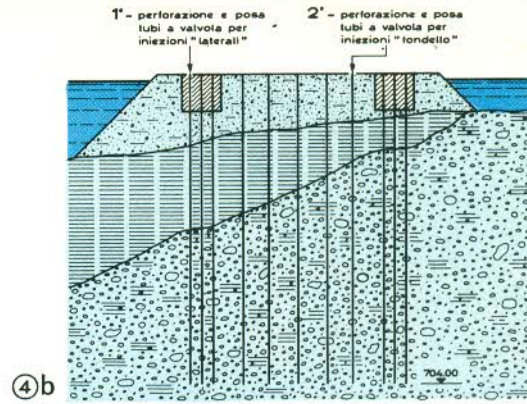
— roccia di base: si tratta di un banco di granito molto compatto di durezza notevole. Si perfora facilmente a rotopercolazione; a rotazione è necessario procedere con corone a diamanti.

La roccia è stata raggiunta sotto la pila n. 9 a 11 m di profondità (valore medio essendo il profilo roccioso inclinato), sotto la pila n. 3 a 16,00 m circa (la profondità massima verso l'Isarco è di 17,30 m). Sotto le pile n. 10 e n. 2 la roccia è invece abbastanza vicina alla superficie.

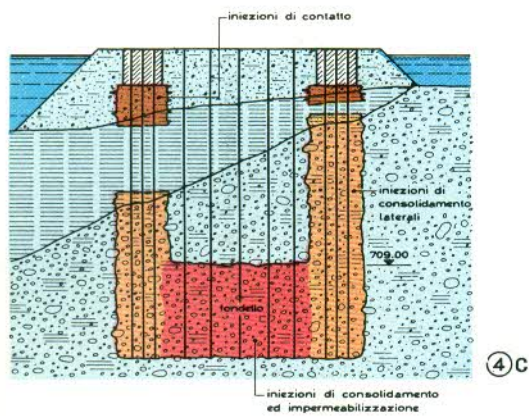
I FASE



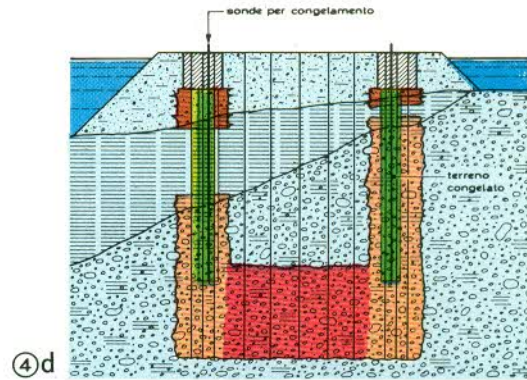
II FASE - Perforazione



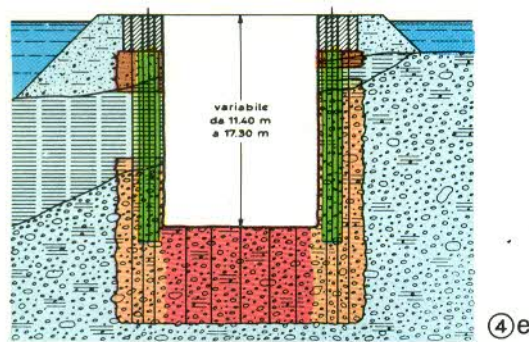
III FASE - Iniezioni



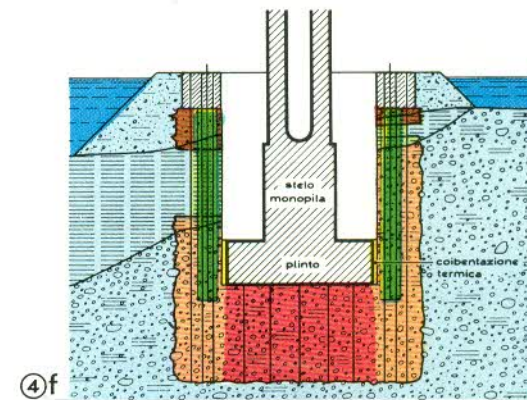
IV FASE - Congelamento



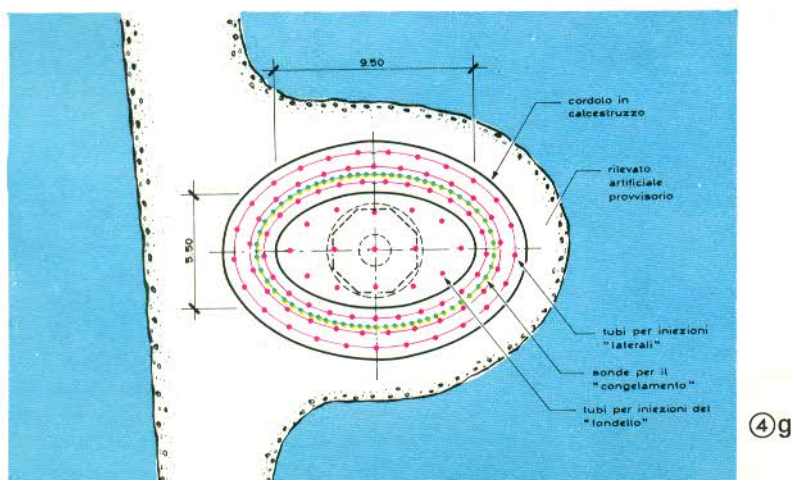
V FASE - Scavo (mantenimento del congelamento)

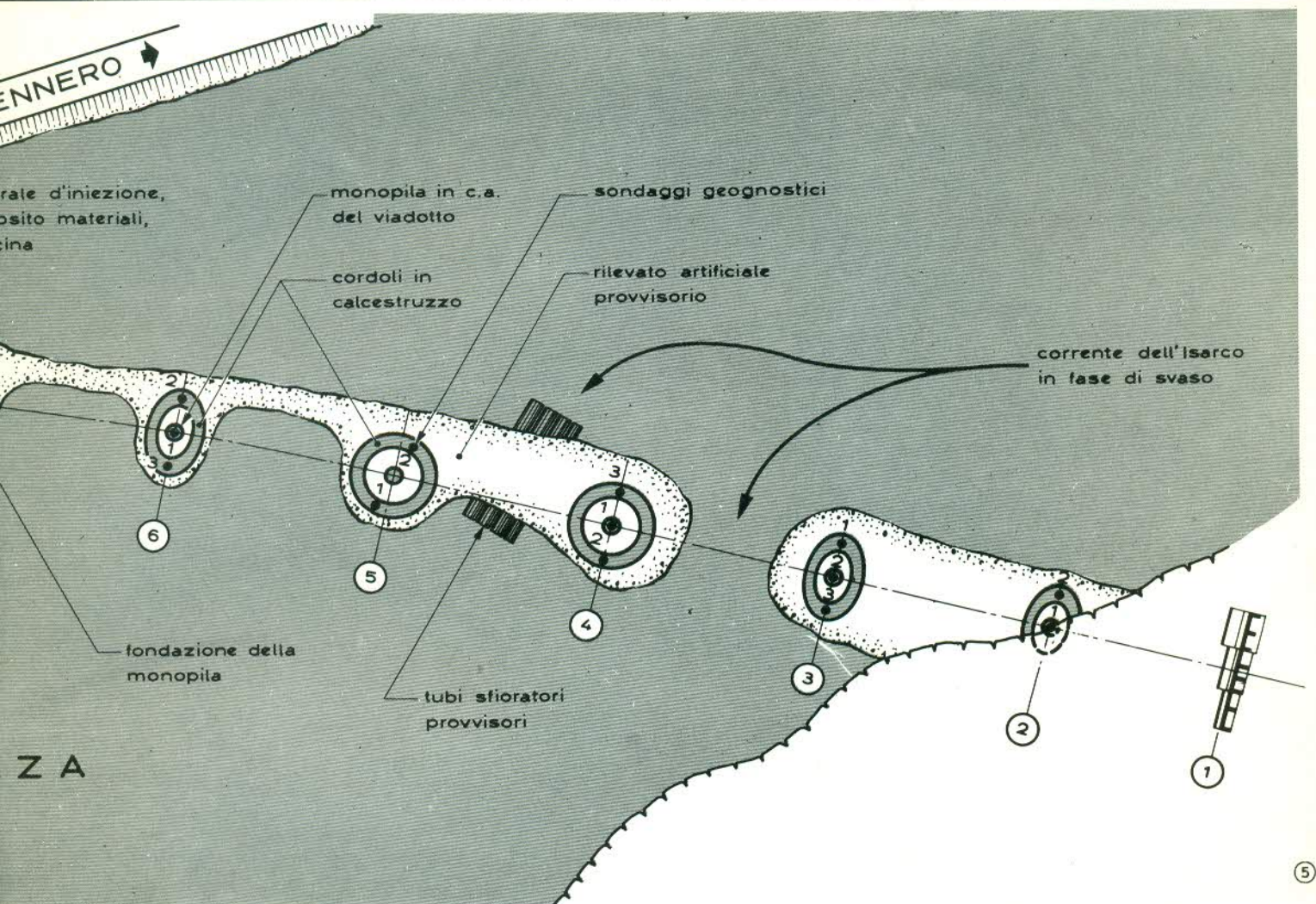


VI FASE - Getto pinto e monopila



Pianta di monopila con fondazione ellittica





INIETTABILITA' DEI TERRENI

Riferendosi alla classificazione del paragrafo precedente possiamo dire che una vera e propria impregnazione, tale da garantire un buon consolidamento ed una completa impermeabilizzazione, può essere ottenuta solamente:

— nel terreno tipo **a** (riporto), utilizzando miscele a base di cemento-bentonite e gel di silice;

— nel terreno tipo **d** (più difficilmente nel « **c** »), utilizzando nell'ordine miscele a base di cemento-bentonite, gel di silice e resine fenoliche; queste ultime per garantire l'impermeabilità avendo esse la possibilità di penetrare nella frazione più fina di materiale.

Impossibile risulta invece il trattamento con iniezioni del terreno tipo **b**. Il limo a bassa consistenza non resisterebbe alla benché minima pressione e si aprirebbe secondo fessure variamente disposte; entro queste fessure verrebbe a disporsi la miscela iniettata che avrebbe modo di disperdersi in forma lamellare in zone anche molto lontane dal punto di iniezione senza apportare nessun contributo al miglioramento delle caratteristiche di consistenza del limo.

E' necessario anche aggiungere:

— che il trattamento del terreno tipo **c** con i si-

stemi tradizionali, anche con l'impiego di resine fluidissime, appare piuttosto aleatorio a causa dell'alta percentuale di frazione limosa;

— che comunque il trattamento dei terreni **c** e **d** con cemento, gel di silice e resine fenoliche risulta molto costoso e d'altra parte non conferisce garanzia assoluta.

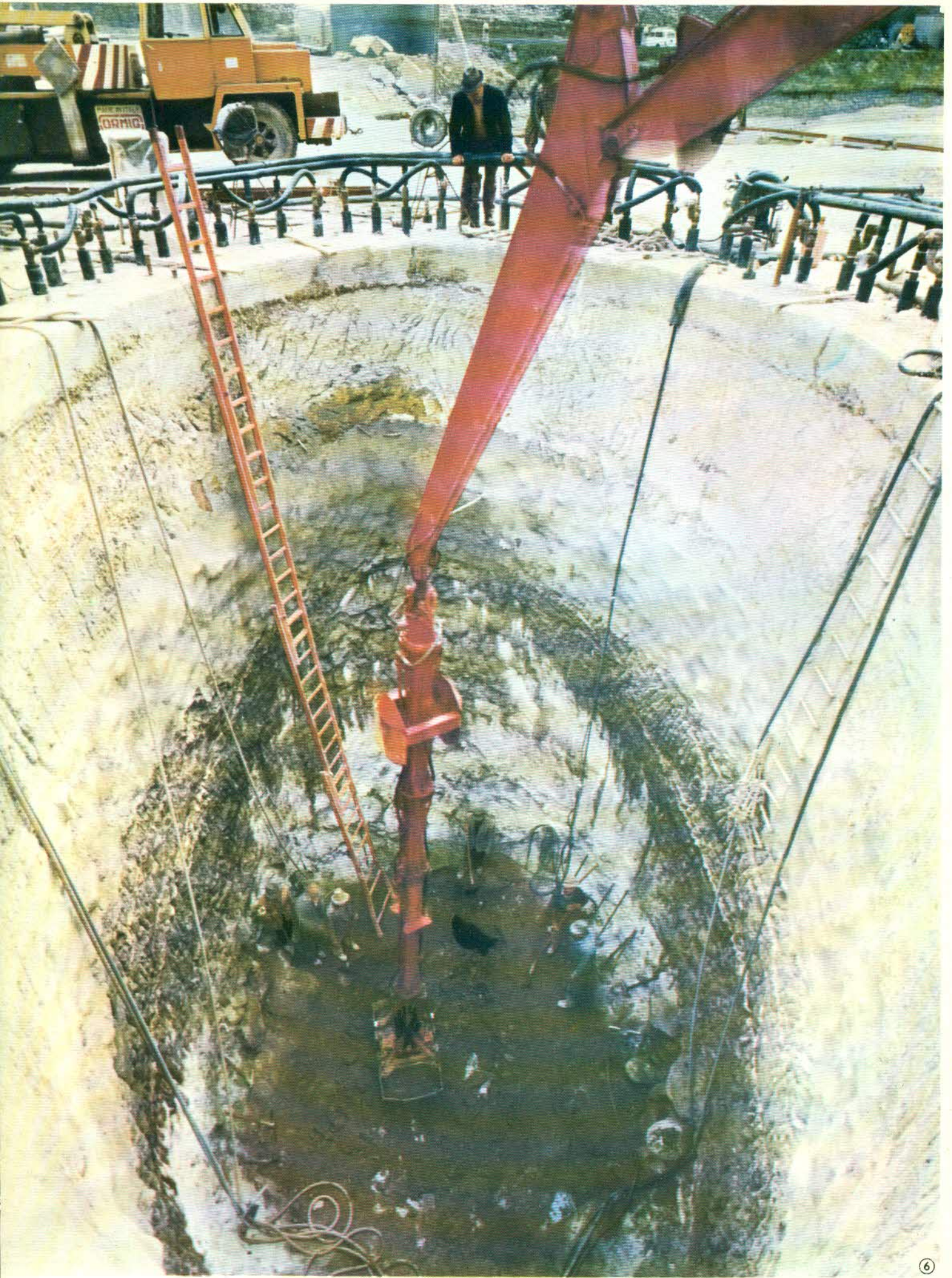
Tenuto conto di tutto quanto sopra esposto si è deciso di articolare il progetto come è schematicamente riferito nel paragrafo che segue.

IL PROGETTO

Lo schema adottato

Alla Rodio è stato affidato dall'Impresa appaltatrice del viadotto di Fortezza (la Lino e Ito Del Favero S.p.A.), in accordo con l'Ente appaltante (Autostrada del Brennero S.p.A.) ed i progettisti dell'opera (Ingg. Bruno e Lino Gentilini), il compito di trattare il terreno di fondazione delle pile in modo da:

— consentire lo **scavo all'asciutto** in condizioni di stabilità (sotto carico idraulico) di tutta la porzione di terreno compresa tra la quota di massimo invaso del lago (sommità del rilevato di lavoro 723,40 m/s.m.) e la superficie d'appoggio del plinto della pila



posta a quota tale da evitare il pericolo di scalzamento. La quota di tale superficie varia al variare della posizione delle pile: per le pile nn. 6, 7, 8 è stata fissata la 712 m/s.m., mentre per le nn. 5 e 4 la 710 m/s.m.; la n. 9, la n. 3 e la n. 2 poggiano su roccia. Anche la forma dello scavo varia a seconda della superficie d'appoggio del plinto: si tratta di un'ellisse con assi 9,50 m e 5,50 m per le pile nn. 10, 9, 8, 7, 6, 3 e 2, di un cerchio con diametro 10,00 m per le pile nn. 5 e 4;

— ottenere un **consolidamento** delle alluvioni al di sotto del piano di posa del plinto in modo che il carico massimo trasmesso dalla pila possa essere sopportato dal terreno con un coefficiente di sicurezza medio di circa 5. Il carico specifico, nelle condizioni più sfavorevoli ed in corrispondenza del lembo più esterno delle fondazioni ellittiche, può raggiungere un valore prossimo ai 18 kg/cm².

Alla luce dei risultati dei sondaggi geognostici l'ufficio tecnico della Rodio ha dovuto scartare la soluzione, in un primo tempo prevista, di trattamento del terreno con sole iniezioni: anche l'impiego di resine molto costose non avrebbe infatti potuto dare garanzie di sufficiente impermeabilizzazione e di con-

solidamento omogeneo. Si è allora pensato ad un **trattamento misto di iniezioni e di congelamento** per il raggiungimento delle finalità richieste. Le varie fasi di lavorazione sono schematizzate nella figura n. 4 e qui brevemente descritte.

Fase I - Costruzione rilevato e cordolo

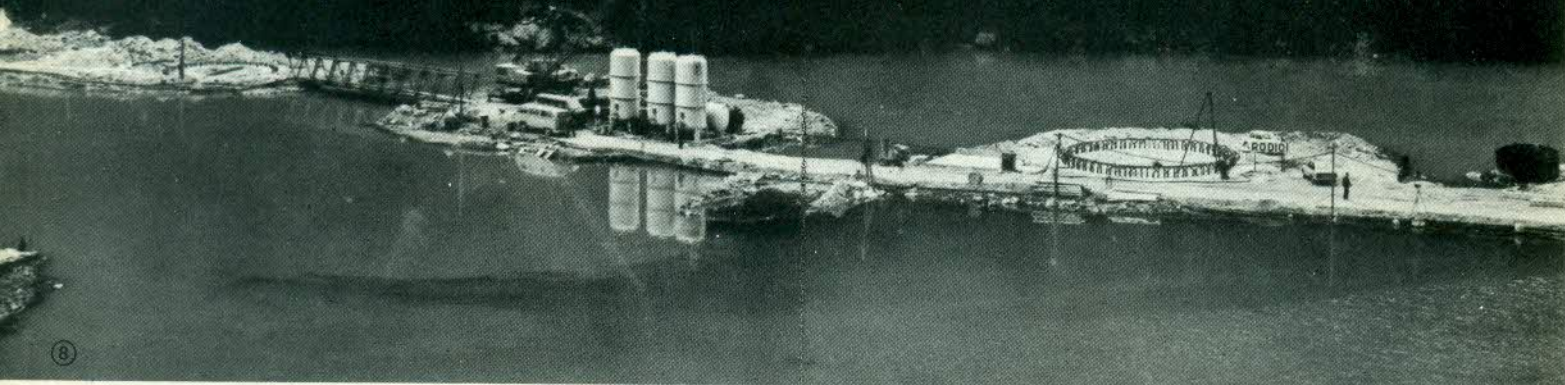
In primo luogo è necessario creare un piano di lavoro in corrispondenza di ogni pila; questo viene realizzato mediante l'accumulo nel lago di materiale in modo da formare un rilevato artificiale provvisorio che collega le pile fra loro con allarghi in corrispondenza di ogni pila. La planimetria in fig. 5 e la fig. 8 danno un'idea della situazione del cantiere attraverso il lago. Bisogna fare notare che a causa della grande quantità di limo depositato il fondale del lago risulta quasi sempre prossimo alla quota di massimo invaso (3 ÷ 4 m in media); come si può notare il deflusso delle acque dell'Isarco avviene attraverso un varco nel rilevato lasciato tra le pile n. 4 e n. 3 ed attraverso 4 grossi tubi posti in opera tra le pile n. 4 e n. 5.

Nel corpo del rilevato in corrispondenza delle pile viene realizzato un cordolo in calcestruzzo avente le seguenti caratteristiche:

(A sinistra) scavo in atto in una pila ellittica: il braccio snodato porta al fondo la benna mordente. Si notano in alto le sonde congelatrici e lungo le pareti dello scavo il limo ottimamente congelato

Martelli a rotopercolazione durante la perforazione alla pila n° 4





Panoramica del cantiere attraverso il lago. Si notano a partire da destra: lo stelo della pila n° 9, la pila n° 8 già completata di pu'vino, i ferri di ripresa della n° 7, il gambo già gettato della n° 6, il grande anello circolare di congelamento della pila n° 5, le ope-

— larghezza 2,50 m: tale da contenere le 3 corone di fori d'iniezione e quella relativa alle sonde per il congelamento;

— altezza 2,00 m: necessaria per avere la possibilità di creare un buon contatto con il terreno mediante iniezioni a debole pressione e per dare al cordolo stesso una buona resistenza, indispensabile durante lo scavo;

n. 7). Nei fori vengono poi installati i tubi a valvola per iniezioni; le valvole nei fori relativi al « fondello » sono installate solamente negli ultimi 6,00 m dei tubi, essendo questi ultimi ciechi nella parte superiore.

Fase III - Iniezioni

Con l'abituale tecnica delle iniezioni « a volume »



Particolare dello scavo al limite del terreno congelato. In alto si nota uno strato di limo già refillato con le punte dei martelli; in basso in una lente sabbiosa la parte ghiacciata penetra nella zona da scavare. Da notare la regolarità della superficie limite del terreno congelato

— superficie interna identica per forma e dimensioni a quella del plinto di fondazione di ciascuna pila.

Nel cordolo vengono già predisposti dei fori rivestiti con tubi di plastica in corrispondenza delle perforazioni per le iniezioni laterali.

Fase II - Perforazioni per iniezioni

Vengono realizzate a rotopercolazione con potenti martelli a circolazione di fango bentonitico (vedi foto



Un operaio sta staccando con un martello demolitore delle scaglie di limo congelato. Siamo nella parte estrema del muro di ghiaccio: qui la temperatura del terreno è compresa tra i -10°C e 0°C

(che prevede l'immissione nel terreno di quantitativi funzione della granulometria dei diversi strati incontrati, funzione pure delle differenti miscele utilizzate) si procede al trattamento dei banchi alluvionali incoerenti. Le iniezioni previste possono essere così schematizzate:

a) Iniezioni laterali

— nei terreni tipo a, c, d si introducono mi-



razioni di scavo e di mantenimento del congelamento relative alla n° 4 ed infine, oltre il varco dell'Isarco, le sonde congelatrici della pila n° 3

scele a base di cemento-bentonite; la finitura con gel di silice viene eseguita nella sola corona centrale, iniettata dopo quelle esterna ed interna;

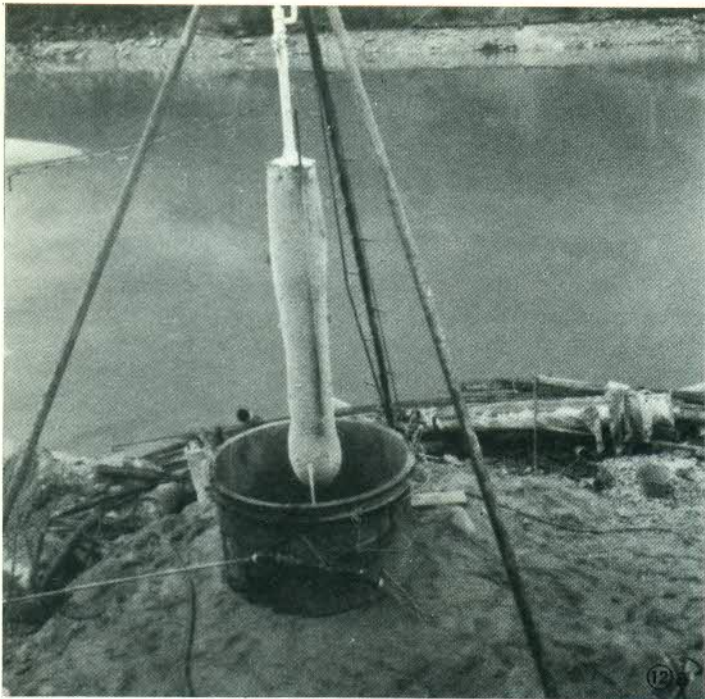
— generalmente nessuna iniezione è prevista nel banco dei limi di recente deposito (terreno tipo **b**);

Vibropercussore al lavoro nell'interno dello scavo di una pila; superato lo strato di limo è necessario frantumare i grossi blocchi delle alluvioni sottostanti

b) Iniezioni del tappo di fondo (« fondello »)

— si tratta normalmente di alluvioni del tipo **d**. In questo caso, dovendosi ottenere un'impermeabilizzazione perfetta senza l'ausilio del congelamento, si devono iniettare nell'ordine miscele di cemento-ben-





Prove eseguite in cantiere per la ricerca del raggio di diffusione delle frigorie in vari tipi di terreno. (a sinistra) Apparecchiatura di prova: in un grande tubo interrato si sono congelati differenti terreni con diverse umidità. Qui si nota una sonda congelatrice estratta al termine della prova avvolta da terreno congelato; si può anche vedere il tubetto riempito di alcool per il controllo della temperatura. (a destra) Bulbo di ghiaccio dopo una prova in semplice acqua

tonite, gel di silice ed in ultimo resine fenoliche a bassissima viscosità. Le iniezioni del tappo di fondo vengono sempre effettuate dopo l'ultimazione di quelle laterali.

Fase IV - Congelamento

Come si può notare sulle figure schematiche qui riportate, il muro di terreno congelato viene realizzato in modo da occupare tutta l'altezza compresa tra il cordolo ed una quota di 1,00 m inferiore a quella di fondo scavo.

Il congelamento interessa dunque non solamente il terreno tipo « b » ma anche tutti gli altri terreni posti lateralmente alla zona da scavare.

A tale soluzione si è giunti dopo avere constatato che le sole iniezioni di cemento e gel di silice non potevano garantire l'impregnazione omogenea delle alluvioni molto cariche di fango e quindi avrebbero avuto modo di verificarsi sifonamenti al di sotto del muro di ghiaccio.

La soluzione alternativa di iniettare in queste zone resine fenoliche è stata scartata perché ad un costo di poco inferiore al congelamento (già in atto nel banco dei limi) non corrispondeva una uguale sicurezza soprattutto dal punto di vista della stabilità della struttura resistente sotto carico idraulico.

Fase V - Scavo (e mantenimento del congelamento)

Lo scavo viene eseguito in vari modi a seconda del terreno da asportare; esso procede libero, senza alcuna armatura di sostegno.

Nel limo si procede rapidamente con l'uso di un escavatore attrezzato con braccio snodato, allungabile fino a 12,00 m, che porta al fondo una benna mordente.

In prossimità della superficie limite, lo scavo deve essere rifinito con l'uso di martelli demolitori perché il terreno ghiacciato generalmente interessa per qualche decina di centimetri la zona da scavare, come mostrano chiaramente le foto n. 9 e n. 10.

Nel terreno alluvionale sottostante, lo scavo è molto più lento: in aiuto ai martelli pneumatici vengono

utilizzate delle darde oleodinamiche per la frantumazione dei grossi blocchi.

Si impiega anche un potente vibropercussore (con punte perforanti di 10 cm di sezione) montato su uno speciale escavatore calato in fondo al pozzo (vedi foto n. 11).

Il materiale viene caricato a mano su una grossa benna azionata da una gru.

Mentre lo scavo procede la temperatura del terreno deve essere sempre mantenuta, nella zona di « muro utile », al di sotto di -10°C : come sarà meglio specificato più avanti, questo si ottiene con l'invio ogni 30 ore circa di un certo quantitativo di azoto nel circuito di congelamento.

Particolare di un campione di fango bentonitico congelato attorno ad una sonda congelatrice





⑬a

Mezzi di approvvigionamento dell'azoto liquido in attesa di scaricare il gas nei serbatoi di cantiere, durante un'operazione di congelamento e, in basso, i serbatoi, sotto vuoto spinto, per l'immagazzinamento in cantiere dell'azoto: in primo piano si vede un silos verticale ed in fondo la grande cisterna da 40.000 l



⑬b



⑬c

Un'autocisterna sta scaricando l'azoto nei silos. In primo piano vediamo un particolare dell'anello di distribuzione alle sonde congelatrici. Ottima appare la coibentazione delle tubazioni: i tubi verticali brinati sono gli scarichi dell'azoto gassoso

Fase VI - Getto della monopila

Una volta ultimato lo scavo, viene montata in opera l'armatura del plinto e dello stelo della monopila. Segue il getto. Lungo la superficie di contatto tra il plinto ed il terreno viene sistemato uno strato di coibente termico (polistirolo espanso) che ha la doppia funzione di proteggere il muro di terreno congelato che potrebbe essere intaccato dal calore di presa e di consentire il normale svolgimento della reazione di presa del cal-

Vista d'assieme di un anello di distribuzione dell'azoto durante un congelamento



⑭

Il grande anello circolare della pila n° 5 in fase di montaggio





Vista di un tratto di parete di scavo in terreno congelato. Si fa rilevare l'uniformità del congelamento in terreni di natura molto diversa: limi con trovanti sopra, alluvioni e detriti di frana nella parte sottostante



cestruzzo malgrado le basse temperature della zona esterna.

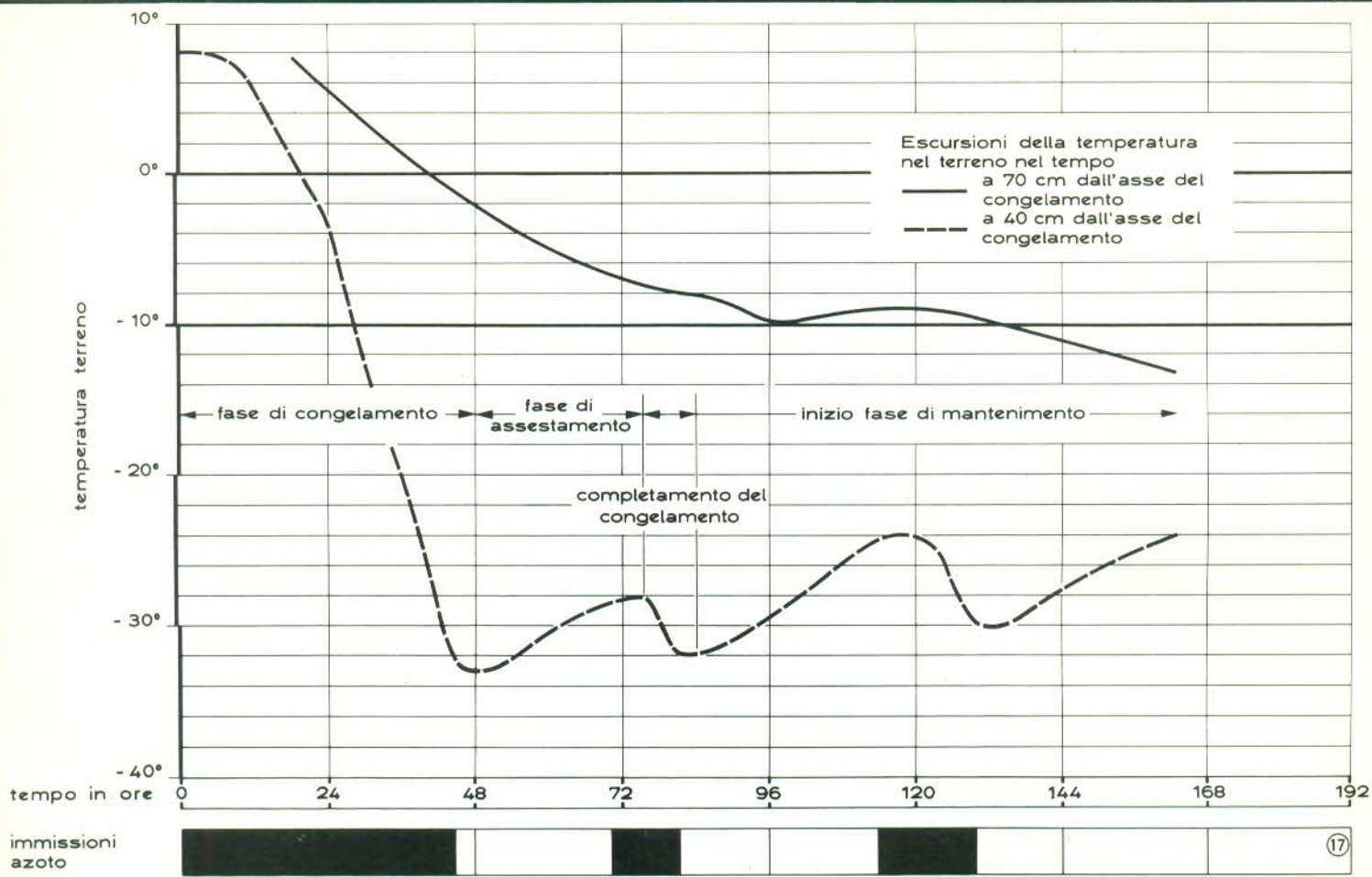
DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELL'OPERAZIONE CONGELAMENTO

Ciò premesso passiamo ad una descrizione più particolareggiata della fase di congelamento, dell'operazione cioè più delicata ed interessante per via della novità e dell'importanza decisiva assunta per la soluzione del difficile problema.

a) Le prove ed i calcoli

Prima di varare definitivamente il progetto abbiamo voluto eseguire delle prove, sia in laboratorio che in terreno simile a quello di Fortezza.

Attraverso queste prove abbiamo avuto modo di:
 — mettere a punto i materiali occorrenti per il congelamento: sonde congelatrici, raccordi speciali, tipi di saldatura resistenti a basse temperature, tipi e qualità dei materiali di coibentazione;



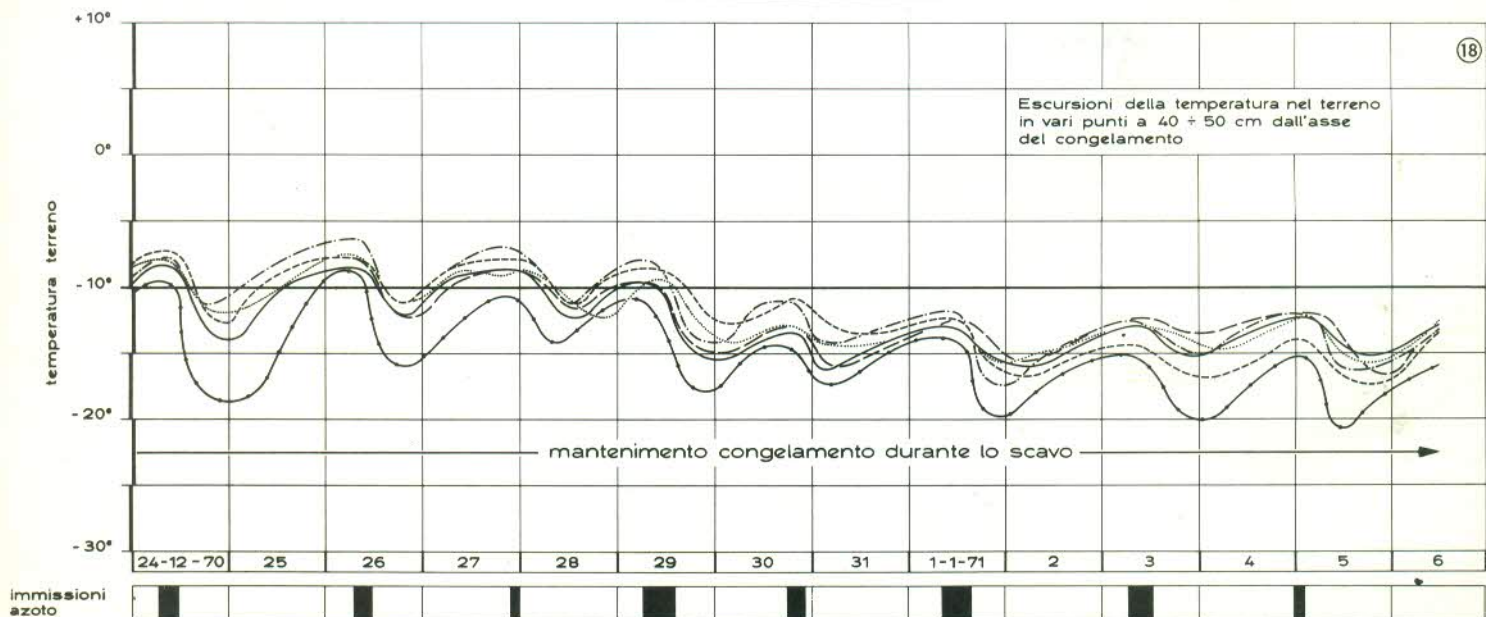
Temperatura del terreno durante il congelamento

- conoscere i quantitativi necessari di azoto per congelare il terreno e raggiungere determinati livelli di temperatura sotto lo zero; valutare i quantitativi di azoto per il mantenimento del congelamento nel tempo;
- stabilire la resistenza di rottura a compressione ed a trazione del terreno congelato; i valori di tali grandezze variano al variare della temperatura, del tipo

di terreno e del suo tenore in acqua. Sono state eseguite prove a compressione su provini di limo congelato e prove tipo « brasiliana ».

Per dare un'idea dei risultati ottenuti possiamo dire che, nel caso del limo di Fortezza con alto tenore d'acqua (praticamente limo saturo), il carico di rottura ad espansione laterale libera è superiore ai 55 kg/cm² per una temperatura di circa -10° C.

Diagramma tempo-temperatura del terreno durante gli scavi



Particolare di terreno limoso congelato lungo lo scavo di una pila; si nota anche, in alto a destra di colore chiaro, una sacca di fango bentonitico (formatosi durante le perforazioni) perfettamente congelato e stagno



Elemento molto importante è la notevole deformazione plastica che interviene prima della rottura (deformazione pari al 20% dell'altezza del provino).

Le foto nn. 12 a, b, c mostrano alcune prove eseguite in cantiere per stabilire la diffusione delle frigorie in diversi tipi di terreno.

Dal punto di vista statico è stato messo a punto un sistema di calcolo per la ricerca degli sforzi massimi cui sarebbe stato sottoposto un muro di terreno congelato, di spessore 1,20 m, di sezione ellittica con assi centrali di 10,70 m e di 7,50 m, sotto un carico idraulico di 15,00 m.

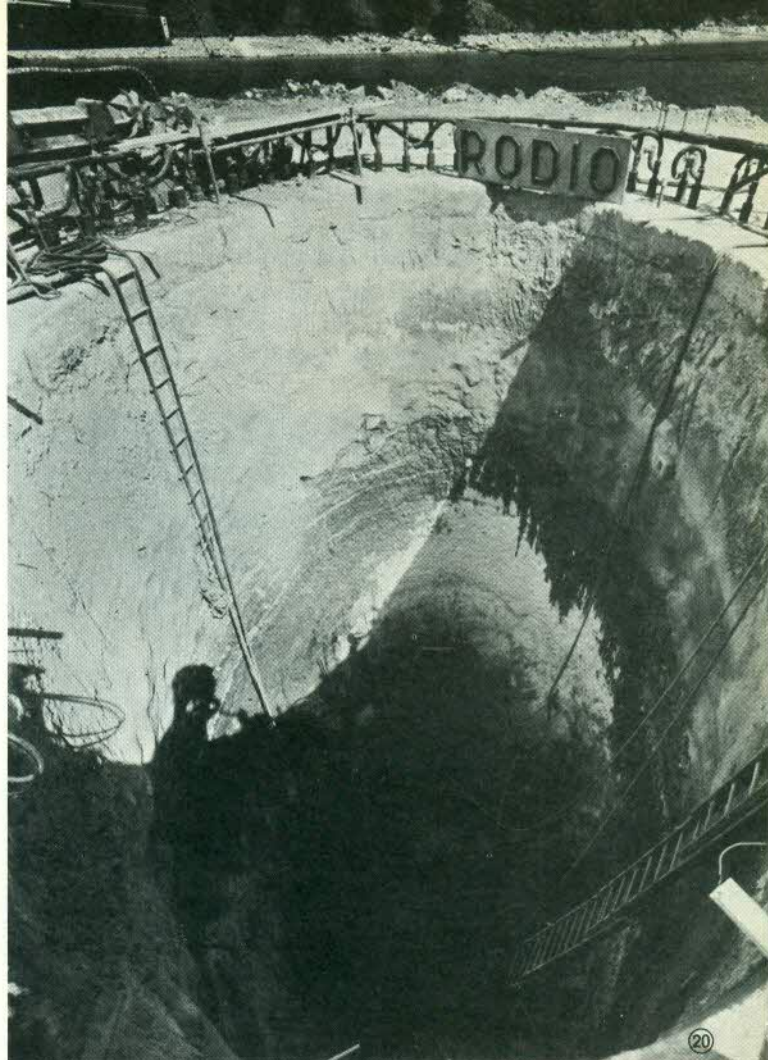
E' stato pure verificato il caso di un muro di uguale spessore, ma di forma cilindrica avente un diametro interno di 11,00 m.

Gli sforzi massimi sono sopportati dal terreno congelato con coefficiente di sicurezza maggiore di 3 se la temperatura è inferiore a -10° C.

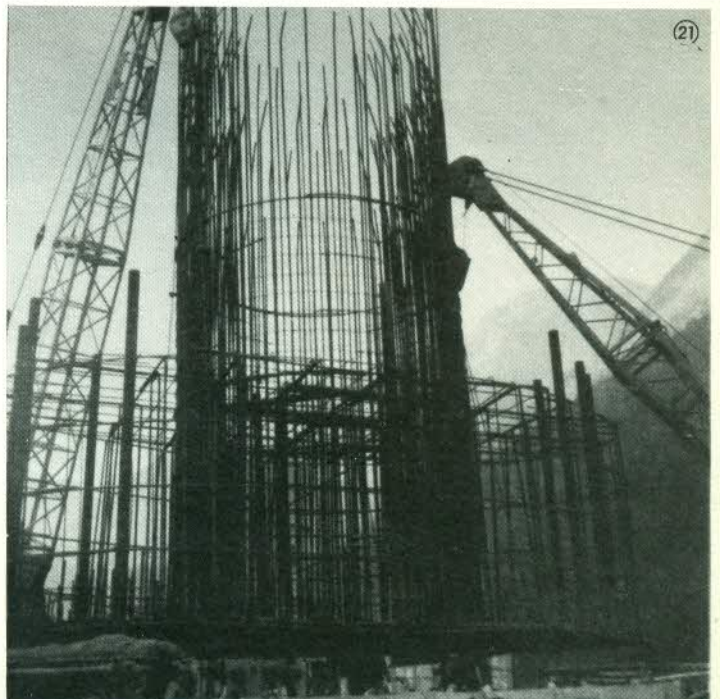
b) Il cantiere

Al termine della fase sperimentale siamo stati in grado di definire il progetto e di organizzare le operazioni di cantiere. A questo punto si è instaurata una collaborazione tra i tecnici della Rodio, responsabili della progettazione ed esecuzione del trattamento di iniezione e congelamento, ed i tecnici della Air Liquide e S.I.O. che, chiamati per la fornitura dell'azoto liquido, hanno dato anche un contributo per tutto quanto concerne la « tecnica del freddo ».

La S.I.O. ha dovuto affrontare il grave problema dell'approvvigionamento in tempo breve di grandi quantitativi d'azoto liquido. Per ottenere la formazione del muro di ghiaccio è infatti indispensabile fornire al ter-



Scavo di fondazione di una pila ellittica (assi 9,50 m e 5,50 m) a circa 11 m di profondità. Gli operai sul fondo stanno rifilando le pareti in terreno alluvionale. Si può notare l'ottima tenuta del terreno congelato



L'armatura prefabbricata del plinto e dello stelo della pila n° 6 sta per essere calata in fondo al pozzo. L'operazione si è svolta speditamente: le pareti dello scavo si sono mantenute nel tempo perfettamente verticali. Il muro di congelamento ha quindi bene contrastato le spinte idrauliche in gioco

