

***La tecnica
del congelamento dei terreni
per risolvere
un delicato problema geotecnico
sulla S.S. 36***

Omaggio della



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

***La tecnica
del congelamento dei terreni
per risolvere
un delicato problema geotecnico
sulla S. S. 36***

Dott. Ing. A. BALOSSI RESTELLI

Consulente della

Ing. Giovanni Rodio & C. S.p.A.

Impresa Costruzioni Speciali

RODIO

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



foto 1 - Vista panoramica del cantiere, presa dalla parete del monte Borbino verso Lecco.

Generalità

La parete Sud del Monte Borbino, nei pressi di Abbadia Lariana, è costituita da una serie di diedri di roccia pressochè verticali, qualche volta strapiombanti; alla base transita l'attuale statale 36 la cui sede in parte è stata ricavata tagliando la roccia stessa, in parte poggia invece sul detrito di falda che sul versante verso Lecco non è stato asportato dai flussi e riflussi del lago.

La « nuova » superstrada a doppia carreggiata, nella sua prima versione « a lago », si era arrestata qualche anno fa con una galleria artificiale tronca a poche decine di metri da questa parete, quasi fosse indecisa se aggirarla oppure affrontarla decisamente con la realizzazione di gallerie naturali.

Questo breve tratto in realtà comprendeva una serie di problemi difficilissimi sia dal punto di vista tecnico che da quello logistico. Le gravi difficoltà derivavano principalmente:

— dalla precaria stabilità della coltre detritica poggiate ad una profondità di oltre 20.00 m, dal pia-

no stradale, su un banco roccioso molto inclinato.

— dall'orografia della stretta zona tra parete rocciosa e lago, lungo la quale correva la trafficatissima statale 36.

In più, in un tempo successivo, si evidenziava la debolezza critica della roccia stessa: calcare con grandi fratturazioni e fessure subverticali riempite di materiale molto fine e compressibile che ovviamente toglieva ogni monoliticità al banco sul quale si era deciso di trovare il punto di forza per sostenere la nuova opera.

Si trattava dunque di fondare in modo sicuro una struttura particolare a sostegno di un nuovo tratto di galleria artificiale tra il punto in cui si era arrestata la precedente opera e le gallerie naturali in costruzione verso Colico nelle pendici del Monte Borbino.

La situazione può essere vista sulla *foto 1* e sulla *figura 2*.

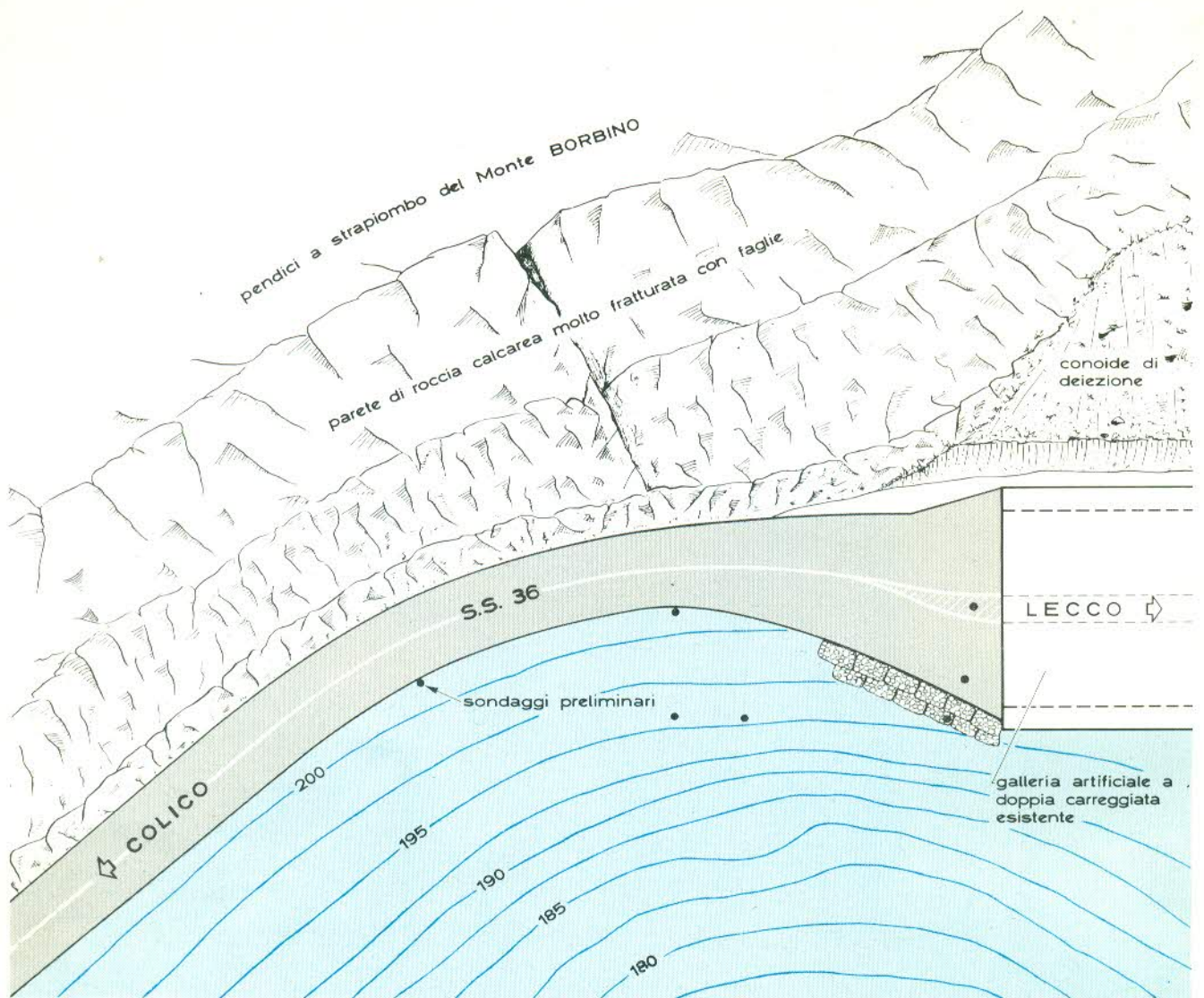


figura 2 - Situazione iniziale - planimetria.

Studi preliminari

L'Impresa S.C.A. (Società Costruzioni Appalti S.p.A.) di Roma — appaltatrice del lavoro — d'accordo con il compartimento di Milano dell'Anas, affidava alla Rodio lo studio del problema particolare e la progettazione delle opere specializzate.

Si è proceduto sempre in stretta collaborazione con il Prof. Riccardo Morandi, progettista delle strutture in cemento armato.

Sono stati subito eseguiti dei sondaggi al doppio scopo di stabilire l'andamento del banco roccioso e di esaminare la natura granulometrica del detrito di falda.

Questa prima indagine ha evidenziato:

- la tendenza del banco roccioso ad approfondirsi in modo deciso nella direzione verso Lecco; tanto che la profondità riscontrata in corrispondenza dell'esistente galleria artificiale è stata 32.00

m dal piano della strada (circa 28.00 m sotto il livello del lago)

- la notevole disuniformità del detrito di falda: ad elementi di pezzatura media (ciottoli calcarei) costituenti la struttura base del deposito, si sostituivano frequentemente scaglie di roccia di dimensioni molto grandi, superiori al metro cubo; è stata pure accertata la presenza di materiale fine dovuto sia ai depositi lacustri sia al disfacimento naturale della roccia calcarea.

La figura 3 mostra la situazione nella posizione prescelta per la costruzione della pila.

Nel frattempo si aveva anche modo di constatare l'estrema labilità d'equilibrio del masso di materiale incoerente che non appena sovraccaricato in vicinanza della galleria esistente mostrava la tendenza a scivolare lungo un certo piano di scorrimento che si pensava coincidesse con la superficie di contatto roccia-detrito.

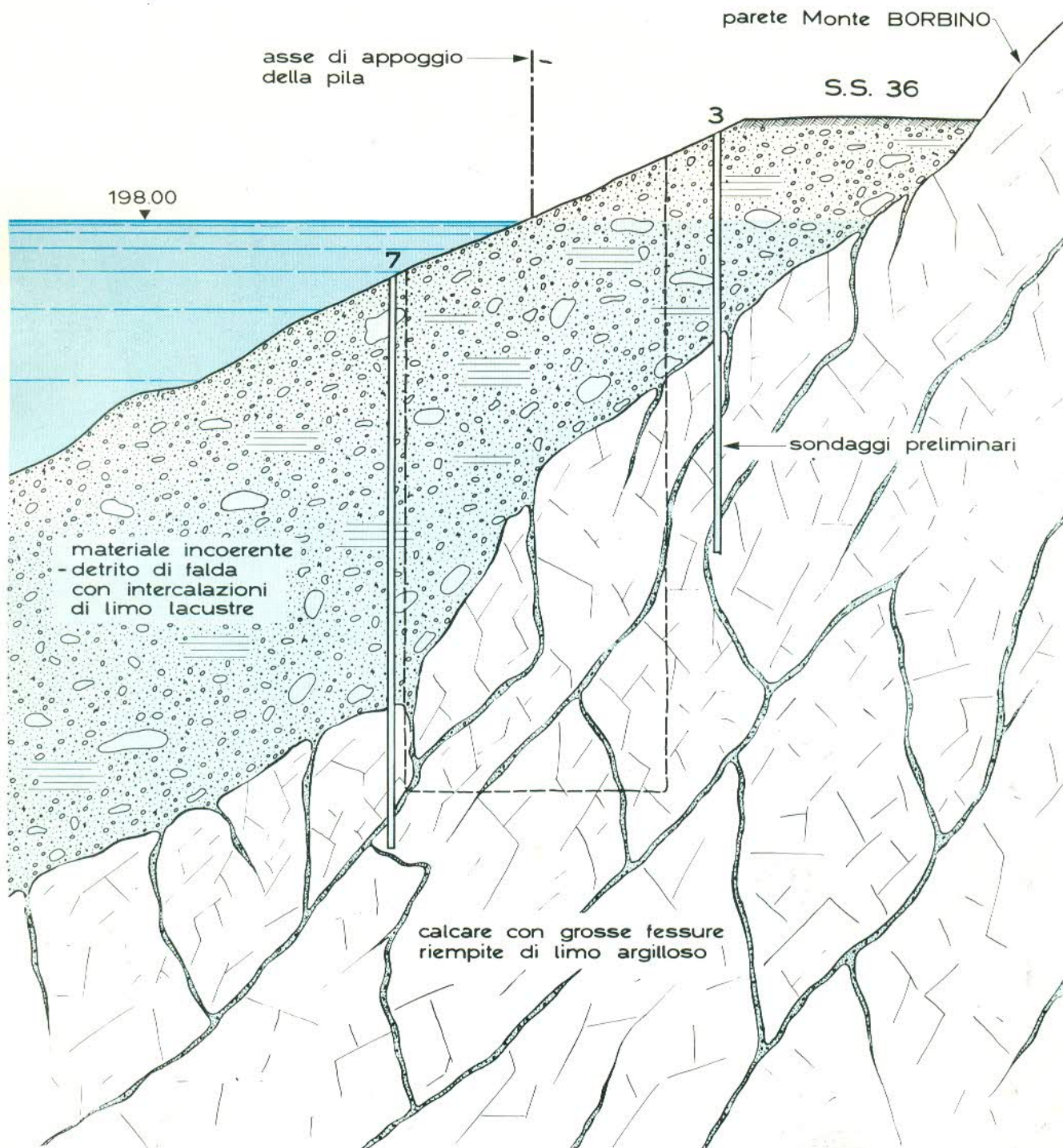


figura 3 - Sezione stratigrafica in corrispondenza della futura pila.

Stando così le cose, veniva abbandonata la prima idea di appoggiare il manufatto su pali a grande diametro (difficoltà d'esecuzione sia pratiche che logistiche, pericolosità di simile intervento nei confronti della stabilità del detrito), mentre la progettazione si orientava verso una soluzione di fondazione diretta sulla roccia mediante uno scavo profondo per l'erezione di una monopila cilindrica a grande inerzia da porsi in posizione centrale del tratto interessato dalla nuova opera.

In tale modo ci si sarebbe spostati in una zona dove la roccia non era molto profonda; inoltre essendo prevista la realizzazione di una struttura a bilancere con un grande sbalzo verso Lecco, si avrebbe avuto la possibilità di non turbare minimamente la statica della galleria artificiale già costruita.

In figura 4 è mostrata la posizione scelta per la pila.

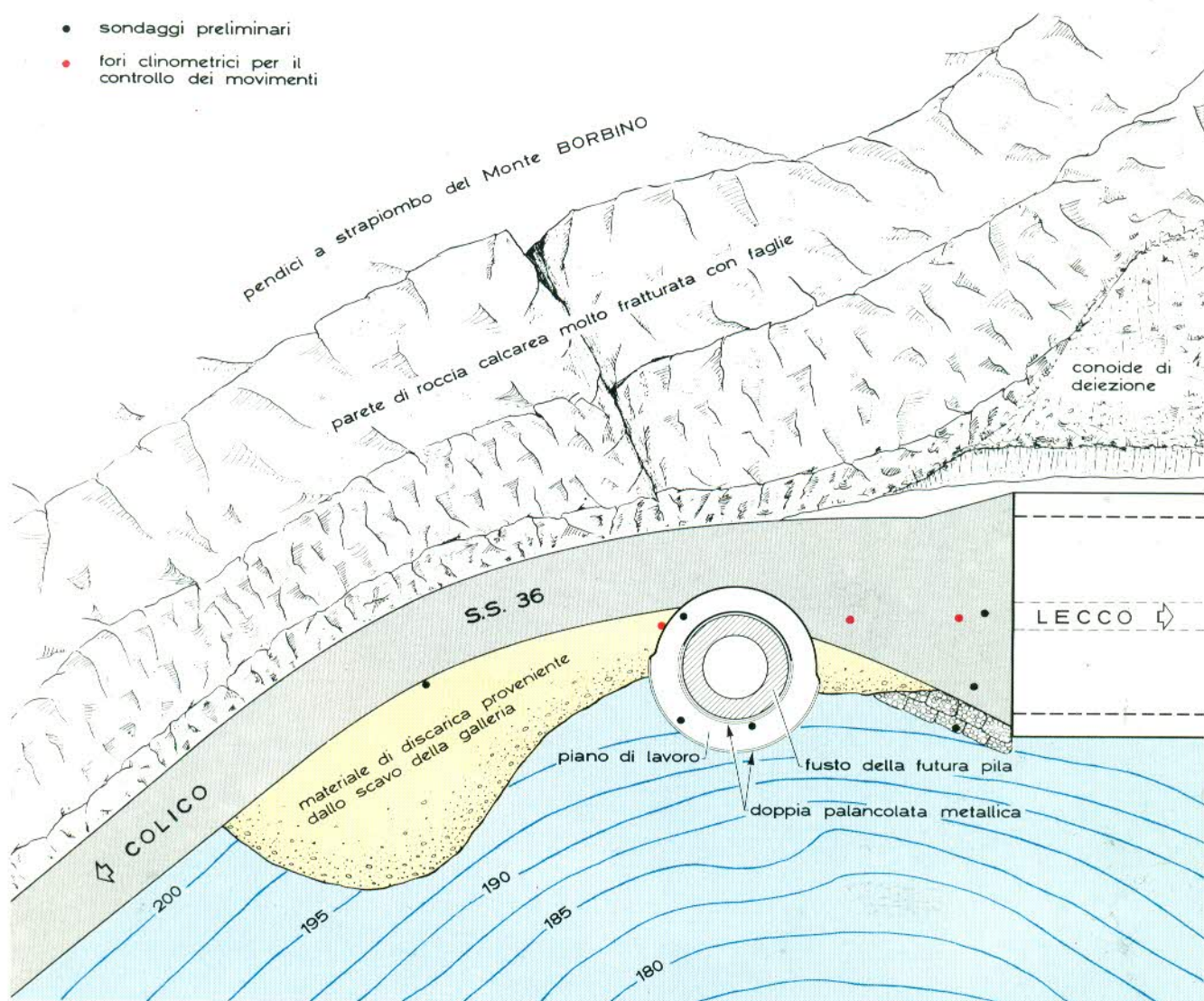


figura 4 - Visione planimetrica della progettata pila di sostegno del nuovo viadotto.

La difficile situazione geologica ed il progetto

Descritte sommariamente le ragioni che hanno condotto alla scelta della soluzione, passiamo ora ad una esposizione dettagliata dell'evoluzione della progettazione per giungere poi alla descrizione delle varie fasi del lavoro.

Le planimetrie generali riportate nelle figure già menzionate, forniscono le coordinate indispensabili per l'interpretazione di quanto diremo.

Nella prima di esse appare la situazione precedente i lavori e cioè il vecchio tracciato della statale 36 e la galleria artificiale interrotta; nella situazione esposta in *figura 4* vengono riportate le nuove opere da eseguirsi ed in particolare la pila cilindrica cava da affondarsi sotto falda nel detrito fino ad un incastro di qualche metro nel banco roccioso (a 27.00 m di profondità).

La sezione (*figura 3*) mostra la delicata situazione dell'appoggio da realizzare: tratteggiata è la linea dello scavo che come si può notare deve interessare profondamente la roccia, avendo escluso per sicurezza un appoggio « gradonato ».

A causa della grande profondità dello scavo e dell'equilibrio precario del masso detritico, abbiamo ritenuto indispensabile, a protezione dello scavo stesso, la costituzione di una struttura cilindrica portante che potesse offrire garanzie:

- di impermeabilità assoluta
- di resistenza omogenea e molto alta
- di un certo grado di plasticità, allo scopo di essere in grado di assorbire le forti vibrazioni che si sarebbero certamente verificate nel corso dello scavo, soprattutto in roccia.

Tali prerogative non potevano essere affidate ad una parete costituita da sole iniezioni; si è pensato allora ad un intervento di congelamento mediante azoto liquido.

Le iniezioni eseguite nel detrito sarebbero semplicemente servite ad otturare i vuoti più grandi, a proteggere in un certo senso il muro di ghiaccio contro gli effetti nocivi di correnti subalvee ed anche, provocando un raddensamento del terreno nella zona da congelare, avrebbero consentito un notevole risparmio di frigoriferie a causa della minore quantità di acqua libera.

La struttura congelata era stata in un primo tempo prevista solamente fino alla roccia; l'impermeabilizzazione di quest'ultima si pensava potesse essere realizzata con semplici iniezioni cementizie.

Il progetto ha però dovuto essere completato ed il congelamento approfondito a causa della situazione di degrado della roccia molto più sensibile di quanto non fosse stato possibile desumere dai sondaggi eseguiti inizialmente.

Nel corso della prima campagna di studio infatti si era cercato di stabilire con precisione l'andamento del banco roccioso sotto il detrito di falda. L'osservazione delle carote di calcare estratte non aveva particolarmente allarmato: una fessura di

60 cm riempita di materiale limoso rinvenuta nel sondaggio n. 1 a 36,40 m di profondità era stata interpretata come una cataclase originata da fenomeni di rigetto attorno alla faglia che si nota a partire dall'alto della parete rocciosa e che grosso modo interessa la roccia nella zona in questione.

Purtroppo le perforazioni per le iniezioni in roccia evidenziavano il fatto che questa cataclase non costituiva un fenomeno isolato, bensì che le spaccature della roccia avevano una frequenza tale da fare dubitare dell'efficienza del sistema di trattamento proposto mediante sole iniezioni.

Questa sorta di « ragnatela » di fessure riempite con materiale finissimo non risultava infatti sigillabile con miscele a base di cemento.

I primi tentativi di iniezione eseguiti in roccia confermavano in modo inequivocabile la situazione sopra esposta.

Le notevoli difficoltà incontrate fra le quali:

- continui franamenti delle pareti dei fori che ostacolavano la discesa degli otturatori
- comunicazioni frequentissime di miscela tra foro e foro, causate dalla presenza del limo che non potendo essere impregnato dal cemento non subiva alcun incremento di coesione

i provvedimenti adottati per ovviare a tali difficoltà:

- lavaggi con acqua delle fessure più grandi
- cementazioni provvisorie dei fori
- riproforazioni e reiniezioni

hanno dovuto tenere conto della situazione di precario equilibrio del complesso detrito-roccia.

Tale situazione era stata messa in evidenza da movimenti registrati attraverso le apparecchiature clinometriche ed anche per mezzo di letture topografiche eseguite alla sommità del cordolo.

La *figura 5* mostra come anche la roccia, per una certa porzione, fosse coinvolta nel movimento di slittamento.

Nel frattempo venivano eseguiti 3 sondaggi profondi 70.00 m (diametro \varnothing 130 ÷ 116 mm) il cui scopo era essenzialmente quello di esaminare puntualmente lo stato della roccia.

Le *foto 6 e 7* mostrano alcune carote di calcare con le grandi spaccature riempite di materiale finissimo, che è stato possibile conservare con l'impiego di doppio carotiere con corone a diamanti e molta cura nella perforazione.

Per fare fronte alla situazione che si era così palesata, sono stati allora presi alcuni provvedimenti in aggiunta a quanto già era stato progettato e già era in corso di lavorazione; tali provvedimenti, come si vedrà meglio in seguito, consistevano da una parte nel fissare con ancoraggi il masso di terreno in movimento, dall'altra nell'impermeabilizzare la roccia tutt'attorno al futuro scavo mediante un congelamento normale a circolazione di « salamoia ».

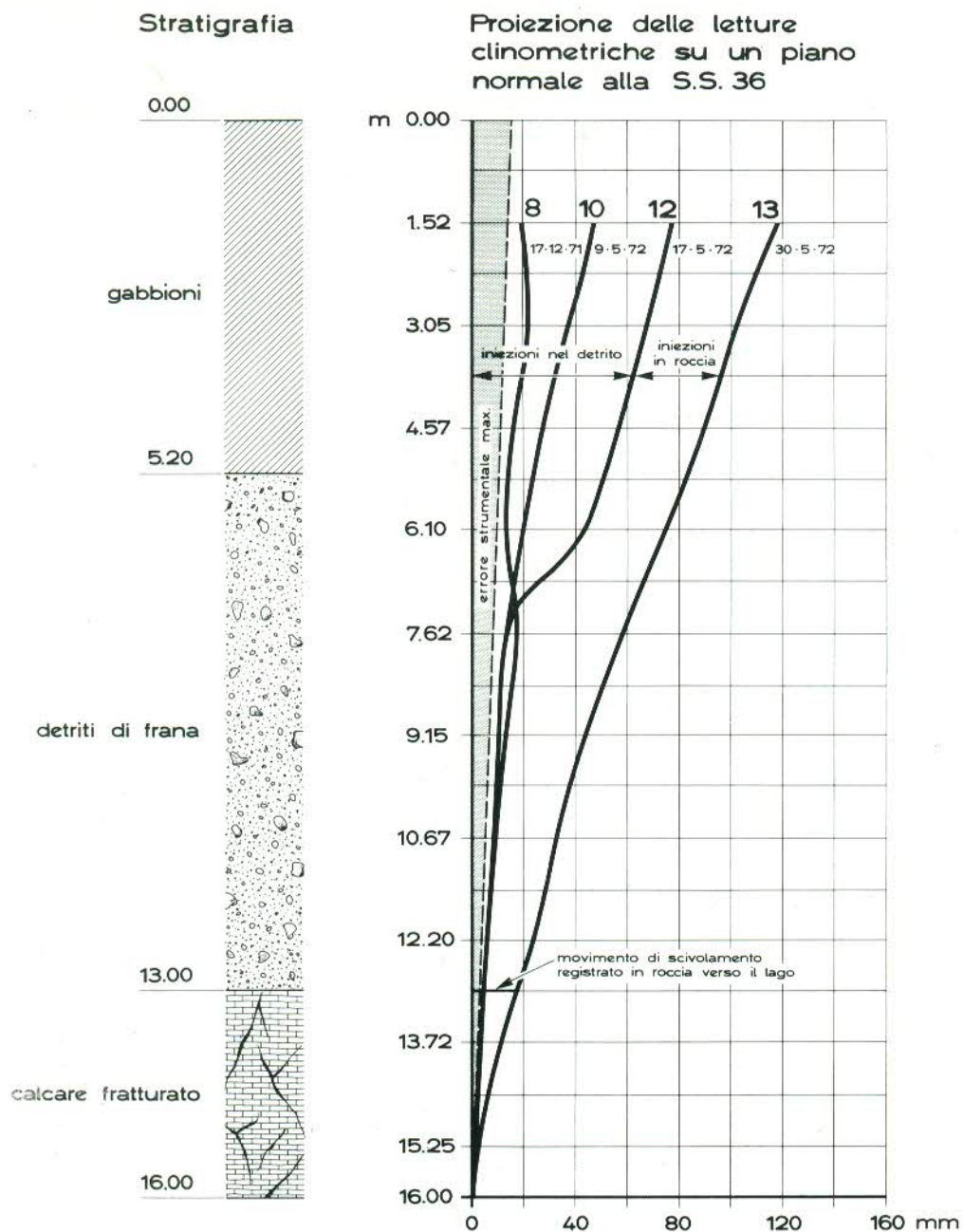


figura 5 - Movimenti registrati dai controlli clinometrici nel detrito e nella roccia.

Descriviamo ora il lavoro così come si è svolto, suddiviso nelle sue varie fasi.

Pensiamo sia interessante trattare in modo più dettagliato tutto quanto concerne i due tipi di congelamento adottati ed alcune lavorazioni particolari come ad esempio gli ancoraggi da 160 tonnellate a sostegno della testa della pila.



foto 6 - (sondaggio 101 cassa N. 4) Sondaggio a diamanti per l'esame dello stato della roccia.



foto 7 - (sondaggio 102 cassa N. 2) Dalle carote si può notare l'estremo stato di degrado del calcare: le fessure della roccia sono riempite di materiale fine limoso.

Costituzione del piano di lavoro - Il doppio palancolato

La 1ª fase delle operazioni comprende tutti i lavori preparatori per la costituzione di un piano di lavoro dal quale spiccare le perforazioni.

Come già si è detto, la situazione di precario equilibrio del detrito non avrebbe potuto sopportare il peso di un rilevato massiccio verso il lago: ecco la ragione per cui si è dovuto pensare all'infissione di un doppio palancolato di forma cilindrica cava da riempirsi con una miscela di cemento, sabbia e bentonite.

Il diametro dell'anello interno di palancole veniva

fatto coincidere con il diametro del futuro scavo (figura 8).

Il lavoro si è svolto regolarmente: solo un paio di palancole si sono inflesse in corrispondenza dell'incastro nel terreno detritico nel quale generalmente venivano fatte penetrare circa 3.00 m.

Il riempimento con miscela non ha creato problema di sorta. Si è così avuta una piattaforma di lavoro stabile: per facilitare i movimenti la zona interna al palancolato è stata riempita di sabbia (foto 9).

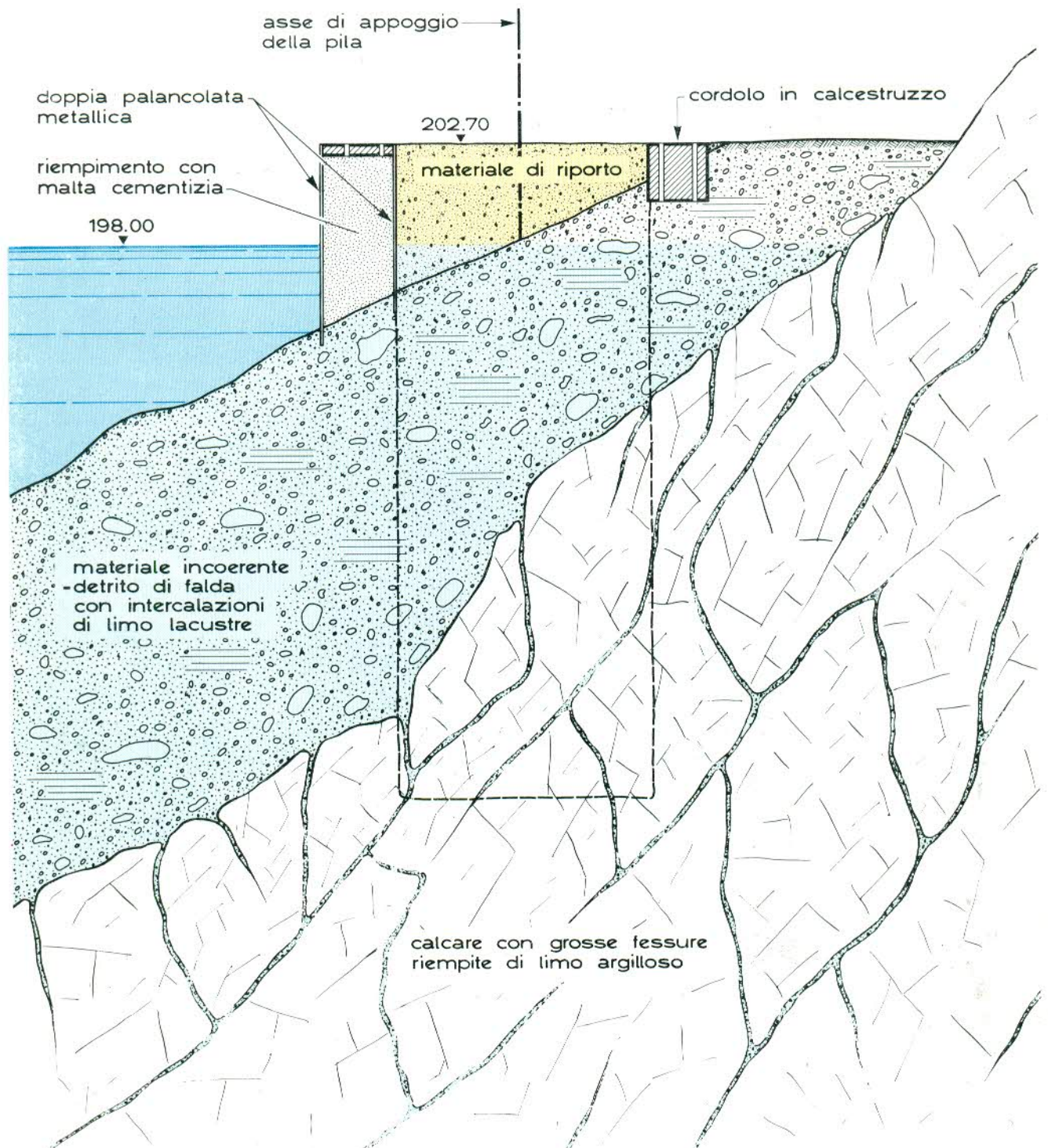


figura 8 - Sezione con particolari delle opere necessarie per la costituzione del piano di lavoro.

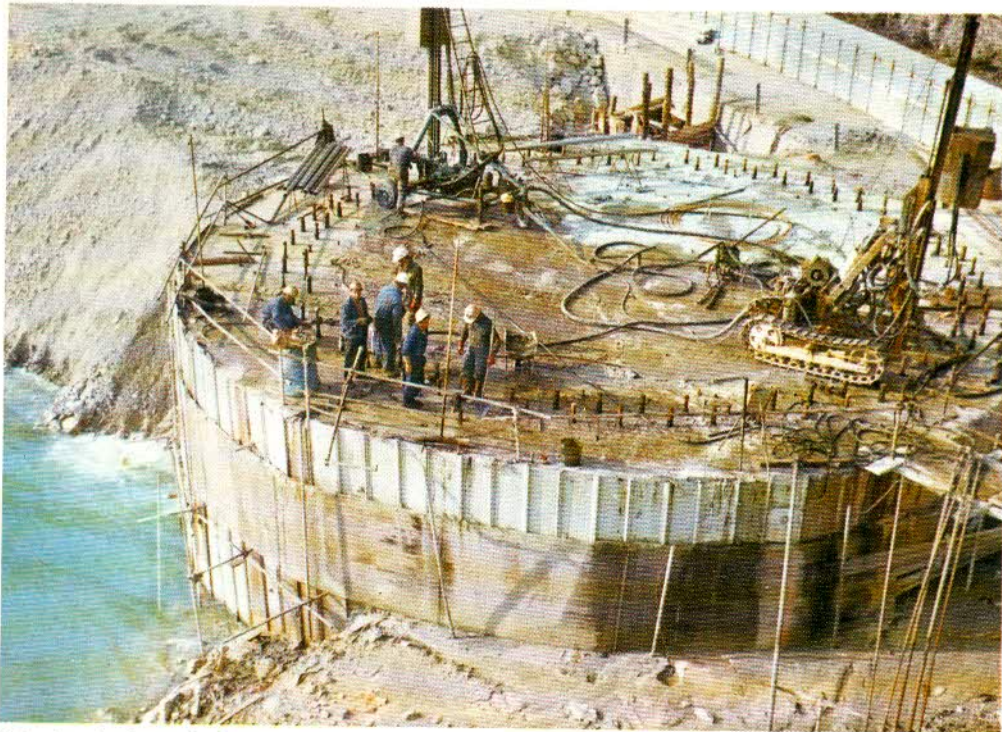


foto 9 - Il piano di lavoro ricavato mediante l'infissione di un doppio palancoato metallico ed il successivo riempimento all'interno con sabbia.

Iniezioni nel detrito ed in roccia

Le perforazioni sono tutte state eseguite a rotoper-
cussione a circolazione di fango bentonitico. Nei
fori sono stati calati i soliti tubi a valvola metallici
attraverso i quali le miscele cementizie sono state

iniettate nel terreno a pressione sempre controllata
(massimo 10 atm.) e secondo volumi successivi
molto piccoli allo scopo di non dare origine a spinte
eccessive.

- carotaggi
- ⊙ fori clinometrici - slope indicators

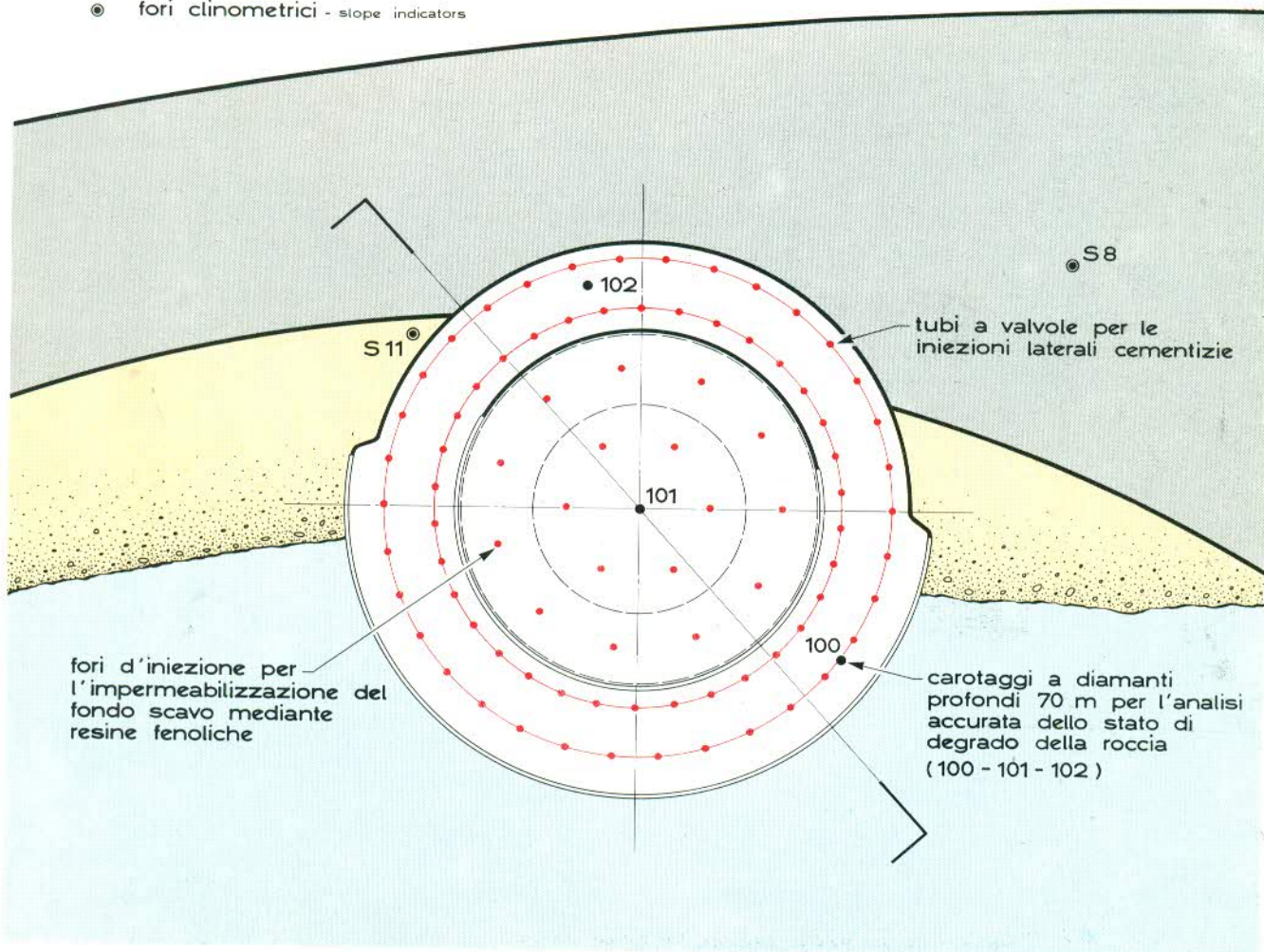


figura 10 - Trattamenti d'iniezione - planimetria.

Come già si è detto, malgrado le precauzioni adottate, le iniezioni in roccia hanno turbato l'equilibrio del masso interessato dalla pila ed hanno dovuto essere sospese e riprese parecchie volte: gli apparecchi clinometrici (slope indicators) disposti nella zona di monte venivano tenuti sotto controllo costantemente ed in funzione dei movimenti registrati, le iniezioni potevano continuare con una

certa sicurezza.

Nel frattempo però si stavano predisponendo le opere di ancoraggio, oggetto del seguente capoverso.

Lo schema dei trattamenti di iniezione sono riportati sulle figure 10 e 11, mentre la figura 5 come già detto, riporta un esempio di movimenti registrati con slope indicator.

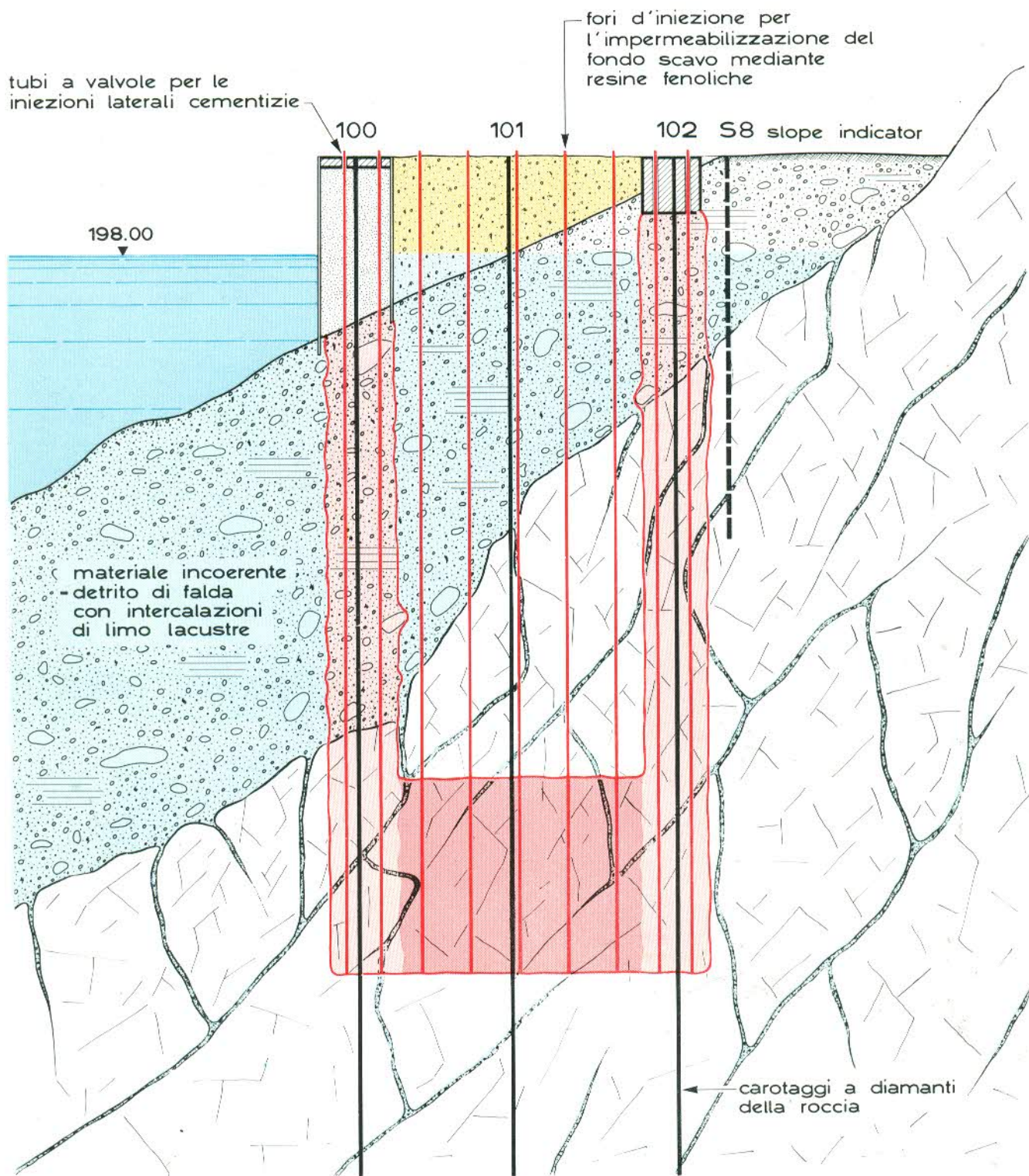


figura 11 - Trattamenti d'iniezione e controlli movimenti del detrito e della roccia - sezione.

Ancoraggi orizzontali e verticali

Constatata in maniera certa l'instabilità del masso di terreno interessato dalle opere e deciso l'intervento di ancoraggio, si è dovuto dimensionare sia i tiranti orizzontali da applicarsi alla testa della pila, sia le barre verticali da applicarsi al contatto detrito-roccia.

Il calcolo è stato eseguito supponendo che tutto il masso di terreno comprendente lo scavo ed una fascia di spessore di 3.00 m attorno ad esso potesse essere considerato come un solido omogeneo con appoggio sugli strati inclinati di roccia.

In effetti questo terreno a causa sia delle iniezioni, sia del congelamento avrebbe assunto nel corso dei lavori una densità ed un modulo d'elasticità di gran lunga superiore a quelli caratteristici del terreno detritico circostante.

Nel calcolo si è poi tenuto conto di un ipotetico piano di scivolamento posto a circa 4.00 m entro

il banco roccioso, perchè gli slope indicators avevano denunciato movimenti più o meno sensibili fino a quella profondità.

Tenuto conto dunque dei seguenti fattori:

- peso del terreno detritico iniettato
- peso del terreno detritico da scavare
- incremento del peso (sovraccarico) dovuto alla presenza del cono di deiezione a monte della strada
- peso della porzione di roccia considerata
- coefficiente d'attrito lungo il piano di scivolamento
- inclinazione di tale piano

abbiamo potuto determinare la spinta totale agente sul masso di terreno e la sua linea d'azione.

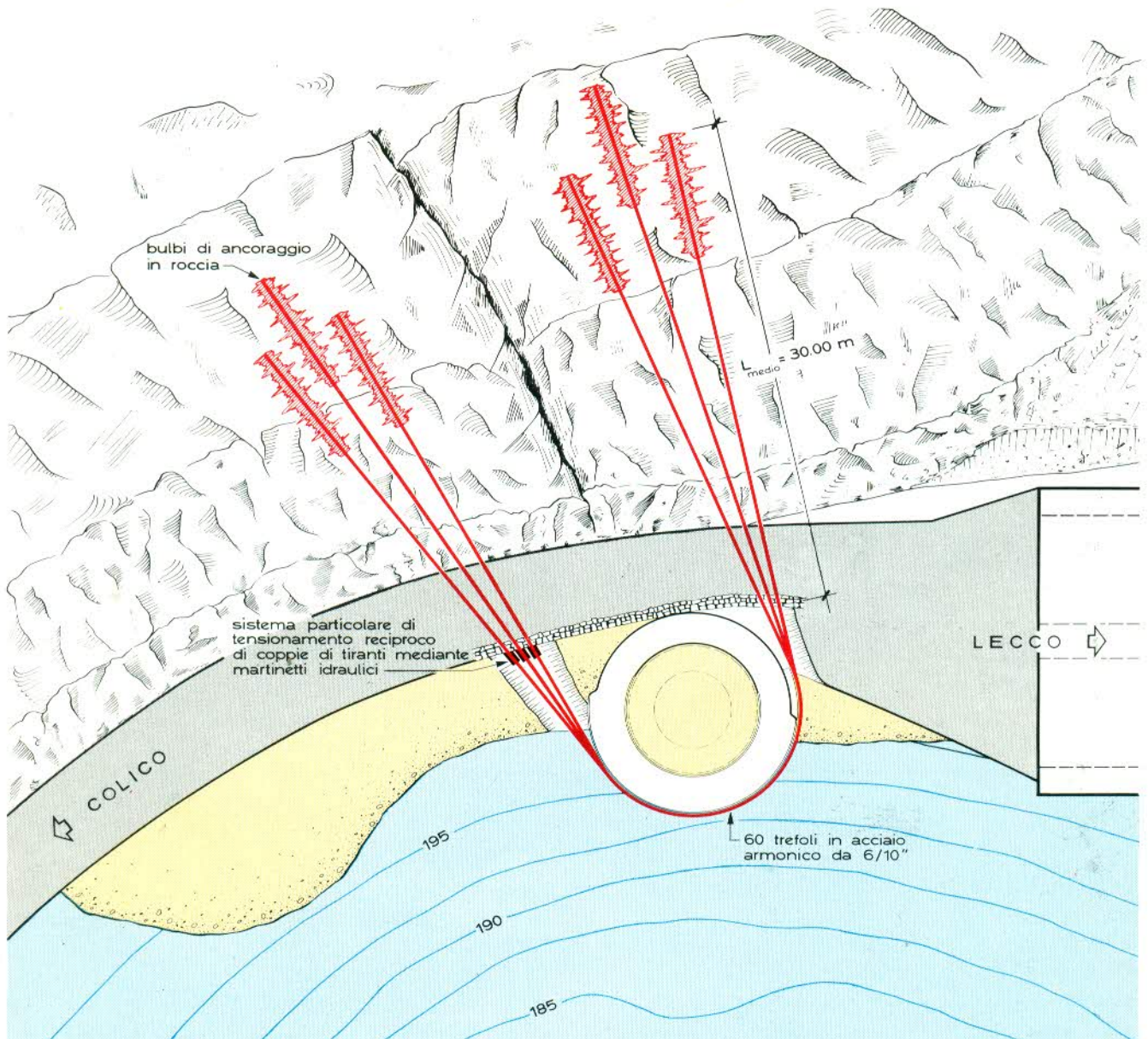


figura 12 - Fissaggio della testa della struttura mediante 10 tiranti I.R.P. per complessive 1600 t - planimetria.

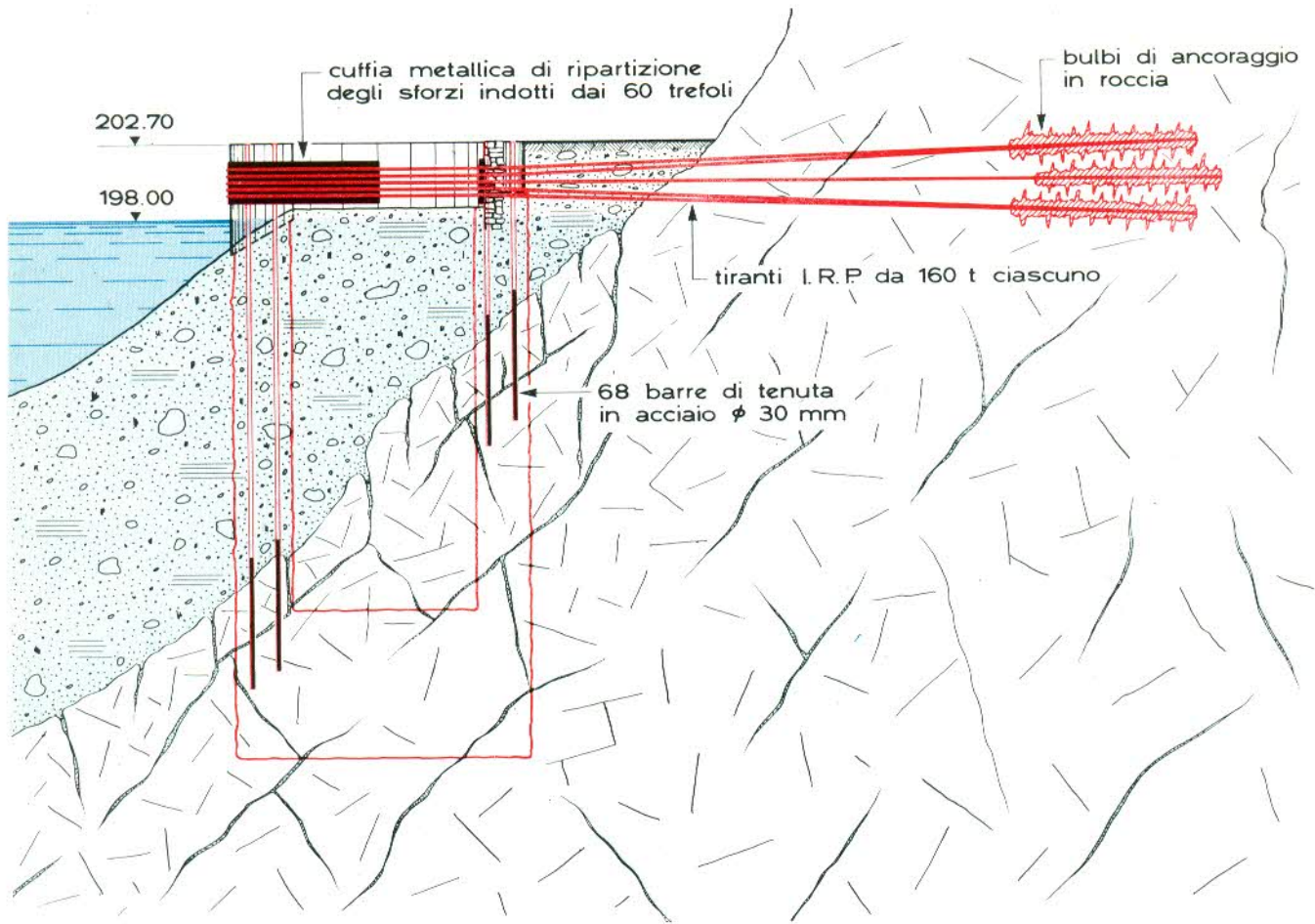


figura 13 - Fissaggio della testa e del piede della struttura con tiranti e barre in acciaio - sezione.

Identificato il masso stesso con una trave su due appoggi (l'appoggio superiore essendo costituito dai tiranti, quello inferiore dalla roccia di base e cioè dalla forza d'attrito incrementata da barre metalliche verticali) abbiamo ricavato che per ottenere un coefficiente di sicurezza di 1,5 era necessario:

- 1) applicare in testa un tiro di 1'600 tonnellate (10 tiranti da 160 t ciascuno)
- 2) infiggere al contatto della roccia 68 barre \varnothing 30 cementate in roccia per almeno 6.00 m.

Queste fasi di lavoro sono schematizzate sulle figure 12 e 13.

L'operazione delle barre non ha richiesto accorgimenti particolari: approfittando dei tubi a valvola metallici, già in opera, si sono prolungate le perforazioni sfondando il tappo di fondo e successivamente si sono calate e cementate le barre.

L'operazione ancoraggio della testata è invece stata più complicata.

Sono stati scelti dei tiranti ognuno da 12 trefoli da 6/10", del tipo I.R.P. con possibilità dunque di reiniezione della parte di bulbo.

Come si può notare sulla figura 12 si è studiata una disposizione dei tiranti simmetrica rispetto all'asse del movimento di scivolamento, passante per il centro della pila.

I 60 trefoli dei cinque tiranti posti in opera dalla parte verso Lecco, una volta usciti dal terreno sono stati distesi a qualche centimetro l'uno dall'altro (distanziati da pettini metallici - foto 14) su di una cuffia metallica alta 2.00 m ed avvolgente il palancolato metallico dalla parte verso il lago.

Oltre la cuffia, nella zona verso Colico, i 12 trefoli appartenenti ad ogni tirante venivano nuovamente raccolti ed introdotti in appositi fori praticati in una piastra metallica, cilindrica di grande spessore.

In altri fori praticati nella stessa piastra giungevano dalla parte opposta i 12 trefoli del tirante omologo messo in opera dalla parte verso Colico (foto 15).

Le cinque piastre venivano così a costituire l'elemento di trasmissione degli sforzi di tiro tra i tiranti omologhi e simmetrici rispetto all'asse di cui si è detto.



foto 14 - I 60 trefoli degli ancoraggi orizzontali avvolgono la testata della pila, disposti su una cuffia metallica e distanziati da una serie di pettini.

Le operazioni di tesatura sono state condotte mediante una centralina oleodinamica che comandava simultaneamente 12 martinetti (uno per trefolo); lo sforzo di tiro applicato ai trefoli dei tiranti più corti (lato Colico) si trasmetteva simultaneamente agli altri trefoli (lato Lecco).

I tiranti sono stati tesi in stadi successivi fino a raggiungere la metà del carico totale previsto e cioè fino ad 80 t.

Durante il tiro si è dovuto spesso intervenire per aiutare lo scorrimento dei trefoli lungo la cuffia metallica; a qualche ora dal termine delle operazioni si ha avuto l'impressione che la perdita di tensione dovuta agli attriti si fosse eliminata e che quindi i tiranti (lato Lecco) si fossero messi a lavorare in modo identico a quelli lato Colico, eliminando dunque ogni sforzo torsionale sulla testa della pila.

Come si può notare dalle figure, i bulbi iniettati dei tiranti sono stati realizzati ad una notevole distanza dalla parete rocciosa del Monte Borbino; la lunghezza media dei tiranti risultava infatti di 30.00 m.

Lo stato di notevole degrado della roccia in genere, la presenza di grandi spaccature superficiali nella zona particolare, consigliavano grande prudenza e quindi l'approfondimento dell'ancoraggio in modo da coinvolgere una grande porzione di roccia.

Gli allungamenti riscontrati nella fase di tesatura hanno corrisposto bene agli allungamenti teorici elastici della parte libera dei tiranti: non vi sono stati scorrimenti e i fenomeni di « fluage » non hanno praticamente avuto modo di manifestarsi.

La foto 16 mostra la testa della pila fissata dai tiranti, al termine dei lavori di ancoraggio.



foto 15 - Piastre di aggancio dei trefoli e 24 trefoli appartenenti a 2 tiranti omologhi. Fase di tesatura contemporanea di due tiranti.

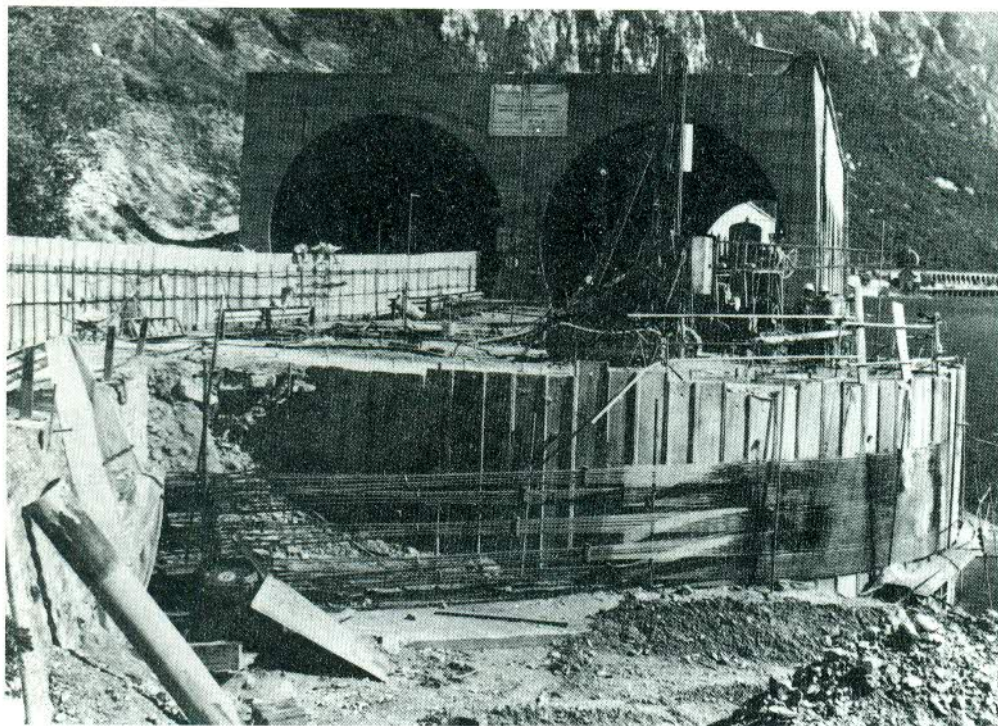


foto 16 - La testa della pila è ora assicurata dai 10 tiranti ancorati in profondità nella roccia del monte.

Presplitting

Accenniamo solo brevemente a questa operazione che verrà meglio descritta in altre pubblicazioni specifiche.

Il problema della asportazione della parte di roccia compresa nel cilindro di scavo aveva suscitato molte perplessità: a lungo si era discusso sul metodo più opportuno da applicarsi per l'abbattimento del masso lapideo, che doveva ovviamente avvenire senza pregiudicare la stabilità dell'insieme.

Il fatto di avere assicurato molto bene la pila con i provvedimenti d'ancoraggio sopra descritti, faceva optare verso la soluzione, chiamata appunto « presplitting », che comportava la creazione a mezzo di minimi quantitativi di esplosivo di una sottile fessura, coincidente con la superficie limite dello scavo.

Ovviamente non era prudente estendere questo sistema al corpo stesso del masso lapideo che avrebbe dunque conservato la sua monoliticità; le difficoltà d'asportazione sarebbero dunque rimaste, col vantaggio però di avere delimitato il masso lapideo al suo contorno con un distacco preventivo.

Come si può notare sulle *figure 17 e 18*, sono stati eseguiti dei fori verticali distanziati fra loro di 0,40 m e disposti lungo una circonferenza di circa 10.00 m di diametro.

Questi fori, aventi una profondità pari a quella del futuro scavo, sono stati rivestiti con tubi di plastica per garantire la stabilità delle pareti e per consentire la corretta distribuzione delle cariche esplosive.

L'esplosione è avvenuta contemporaneamente nella maggioranza dei fori: alcuni di questi, non caricati, hanno servito per dare sfogo all'esplosione stessa verso l'alto.

Al termine di questa operazione abbiamo controllato la situazione globale del masso di terreno; attraverso misure clinometriche e la verifica dello stato tensionale dei tiranti ci siamo resi conto che l'esplosione non aveva provocato spostamenti apprezzabili.

Durante l'esecuzione dello scavo abbiamo anche avuto modo di constatare gli effetti ottenuti con il presplitting; sulla *foto 19* si possono notare le tracce dei fori verticali sulla parete dello scavo.

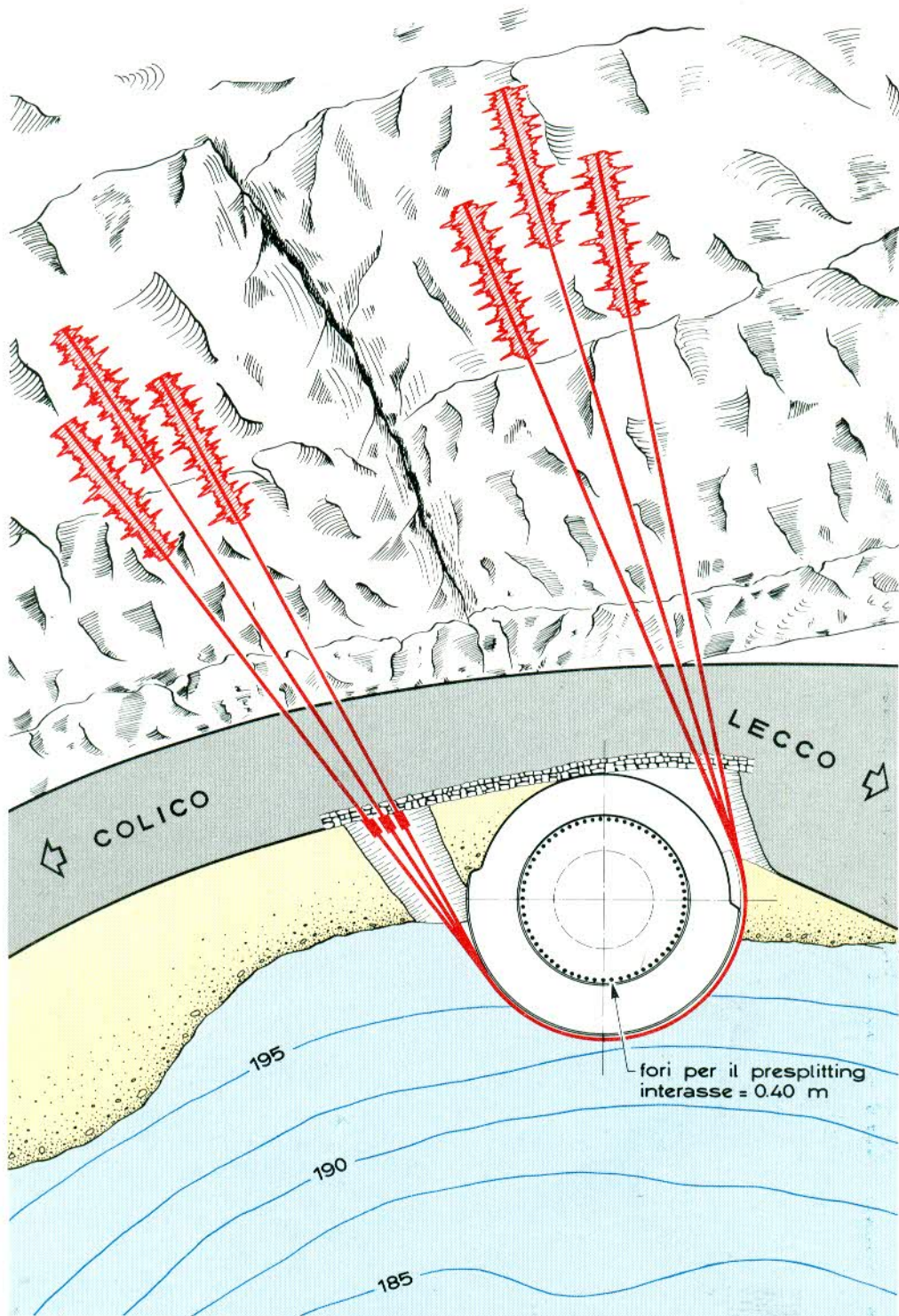


figura 17 - "PRESPLITTING" Fori verticali rivestiti in plastica per l'esecuzione della sottile fessura nella roccia - planimetria.

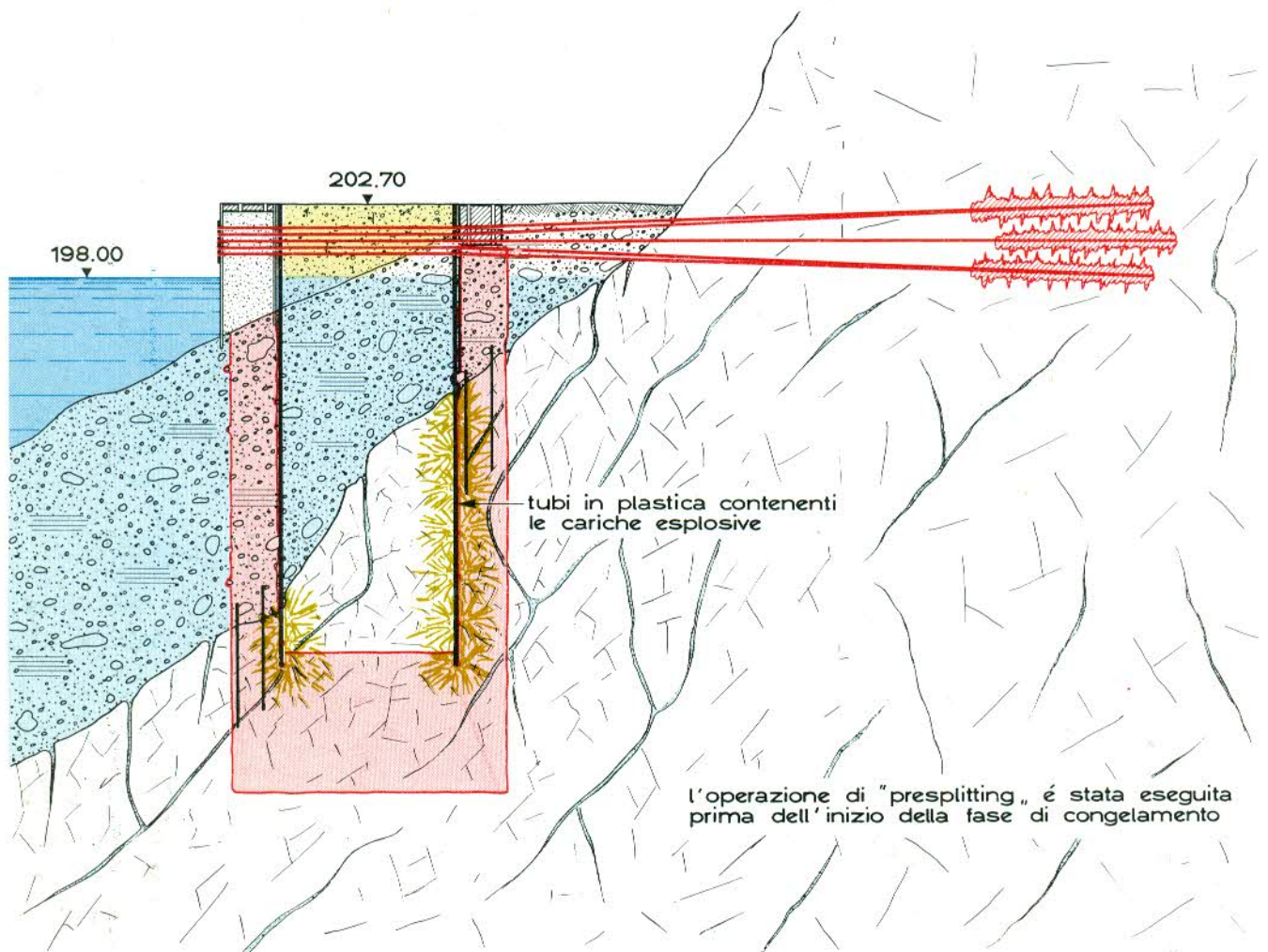


figura 18 - "PRESPLITTING" Creazione di una sottile fessura, lungo la superficie del futuro scavo - sezione.

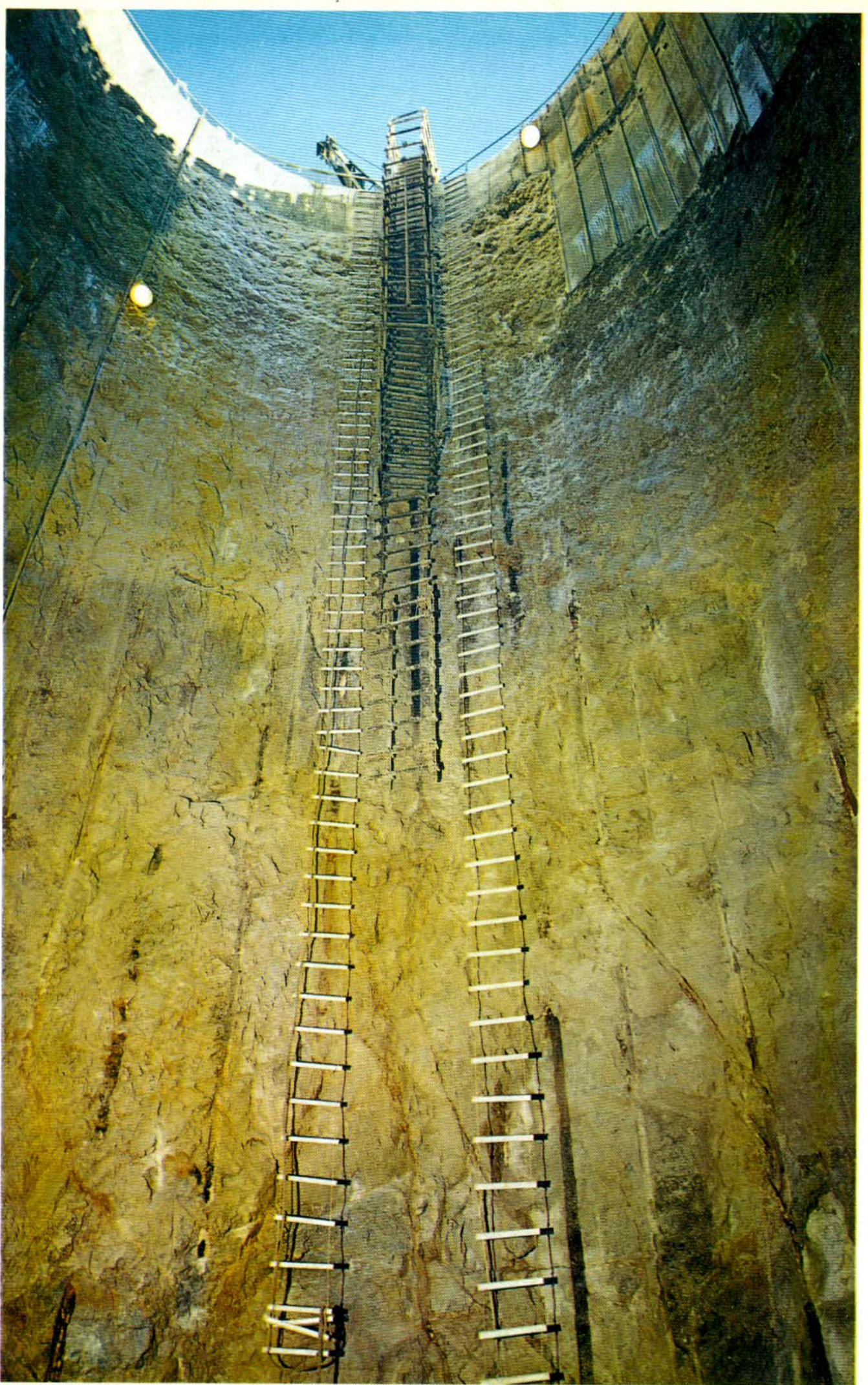


Foto 19 - Particolare della superficie dello scavo: si possono distinguere chiaramente le tracce dei fori verticali praticati per l'operazione "presplitting".

Il congelamento

Le operazioni relative al congelamento, oltre che avere rappresentato la parte determinante di tutto il progetto, sono state le più interessanti e quelle che hanno richiesto il maggior onere organizzativo. Per la prima volta si sono sfruttati, nell'ambito di una sola opera, i due sistemi di congelamento con azoto liquido e con salamoia.

A questo punto sembra utile descrivere brevemente i due metodi e le loro prerogative per meglio comprendere le ragioni per cui essi sono stati utilizzati ad Abbadia Lariana.

Sui due schemi I° e II° sono rappresentati i circuiti caratteristici delle due differenti metodologie.

Il procedimento diretto a ciclo aperto, (azoto liquido) presenta il notevole vantaggio della estrema semplicità della distribuzione.

E' tuttavia necessario curare in modo particolare la messa in opera delle sonde e la corretta unione tra tubo e tubo.

Devono essere utilizzati acciai speciali (a basso tenore di carbonio) in special modo per quanto riguarda le teste di adduzione ad ogni sonda, per far fronte in sicurezza alla fragilità dei materiali a bassissime temperature.

Pregio preminente del sistema è la grande potenzialità d'apporto di frigorifici al terreno (nel senso di portata di frigorifici) che consente sia la rapidissima costituzione di un muro continuo di terreno congelato (in 30 ÷ 40 ore), sia di affrontare situazioni difficili, di precaria stabilità.

In breve spazio di tempo il terreno viene portato a temperature assai basse (in media attorno ai -15°C ed oltre), viene quindi conferito ad esso un alto grado di coesione.

Un'alluvione del tipo di Abbadia Lariana a -10°C assume i seguenti valori di resistenza:

— rottura a compressione (libera espansione)

$$\sigma_c = 70 \div 80 \text{ kg/cm}^2$$

— rottura a trazione

$$\sigma_t \cong 10 \text{ kg/cm}^2$$

Con l'impiego dell'azoto questi valori vengono conferiti al terreno, come si è detto, con grande rapidità; nel caso di rotture del muro di ghiaccio che, per qualsiasi motivo possono manifestarsi durante gli scavi, l'azoto consente anche degli interventi immediati di « rimagliatura ».

Il procedimento indiretto, a ciclo chiuso, (doppio scambio), quello in cui viene fatta circolare soluzione satura abitualmente di cloruro di calcio — « salamoia » — comporta l'installazione di grossi macchinari (foto 20) ed anche il circuito di distribuzione è abbastanza complicato.

E' molto importante una verifica delle perdite di carico subite dal fluido pompato nei tubi congelatori per non incorrere nel rischio di avere eccessivi squilibri di pressione nei vari gruppi di sonde e di conseguenza una distribuzione disuniforme di frigorifici.

La temperatura della salamoia in entrata nel circuito è tenuta attorno ai -28°C ; quando la situazione è a regime, la temperatura di rientro all'evaporatore non dovrebbe risalire oltre i -22°C .

Evidentemente il processo di congelamento è molto più lento che nel caso dell'azoto: il tempo medio per la formazione del muro di ghiaccio in condizioni normali (temperatura dell'acqua di falda attorno ai 15°C) è di 22 ÷ 25 giorni.

Pregio determinante di questo sistema è il suo costo relativamente basso: infatti se da una parte la installazione del cantiere e dei circuiti rappresenta un onere superiore al caso dell'azoto, dall'altra parte il costo d'esercizio giornaliero è di gran lunga inferiore.

Questo fatto porta a fare preferire il metodo a salamoia quando:

- 1) il trattamento non debba raggiungere valori di temperatura molto bassi (e quindi alte resistenze meccaniche); trattamento ad esempio di semplice impermeabilizzazione
- 2) il tempo di formazione del muro possa essere anche di una ventina di giorni o più.

Da quanto sopra esposto, pensiamo possano essere meglio comprese le ragioni che hanno guidato nella scelta della doppia soluzione di congelamento applicata per la protezione dello scavo della pila di Abbadia Lariana.

La zona detritica, a causa del suo precario equilibrio, richiedeva la realizzazione di un guscio ad alta resistenza (muro di terreno congelato di sezione cilindrica e di spessore 1,20 m); la velocità di formazione di tale struttura era pure necessaria per vari motivi, tra i quali il più importante era quello di estendere al più presto in profondità a tutto il masso la funzione dei tiranti di ancoraggio posti in opera sulla testata del complesso.

La parte in roccia dello scavo non preoccupava dal punto di vista stabilità, bensì da quello della impermeabilità.

Le grandi fessure riempite di materiale limoso costituivano un serio pericolo perchè a quella profondità, quindi sotto un carico idraulico di 2,5 atm., fenomeni di sifonamento avrebbero provocato grosse falle con venute d'acqua di notevole portata.

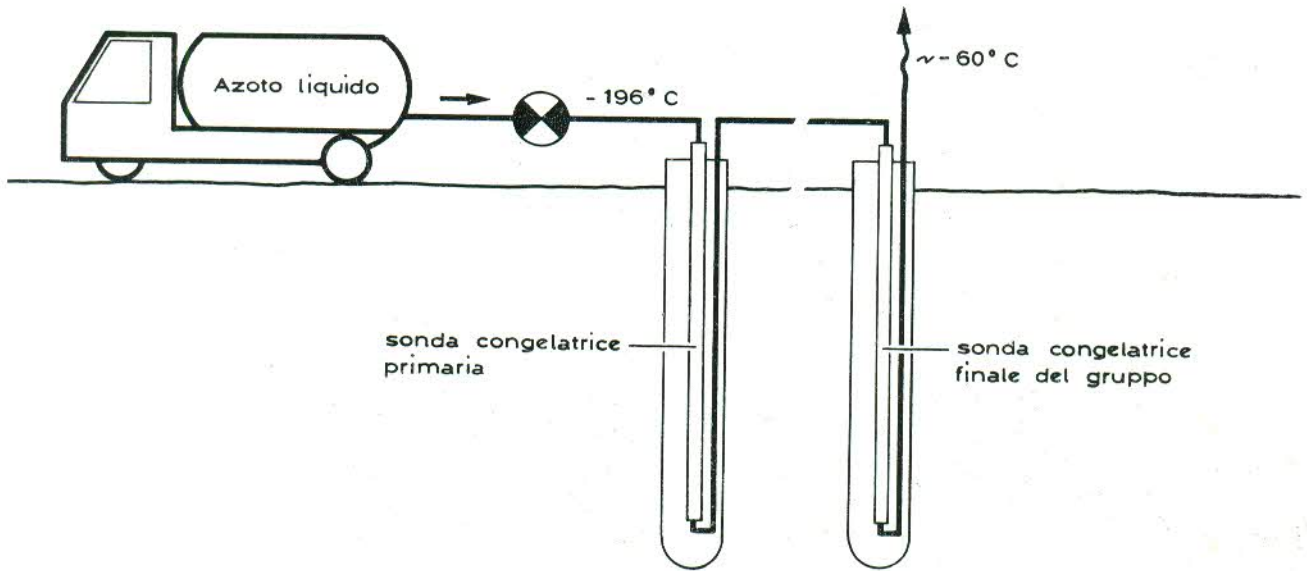
Non essendo possibile conferire al materiale fine la necessaria coesione con sistemi tradizionali di iniezione, si è pensato ad un « congelamento blando » avente come scopo dunque solo quello di stabilizzare e rendere impermeabile questo materiale limoso.

Il sistema a circuito di salamoia è stato scelto per questi motivi.

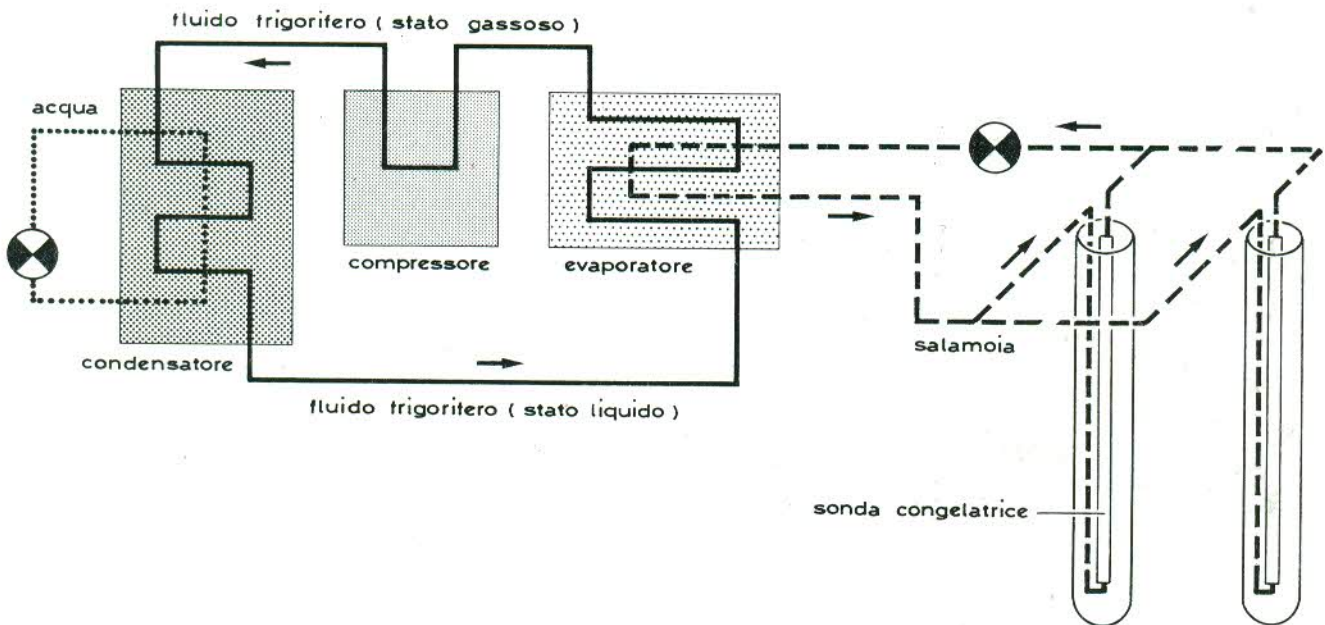
Le figure 21, 22 e 23 mostrano la disposizione delle sonde relativa ai due tipi di congelamento.

Sulla foto 24 si possono vedere le sonde ed i circuiti in fase di montaggio.

schema I
 Procedimento diretto. Ciclo aperto



schema II
 Procedimento indiretto. Ciclo chiuso (doppio scambio)



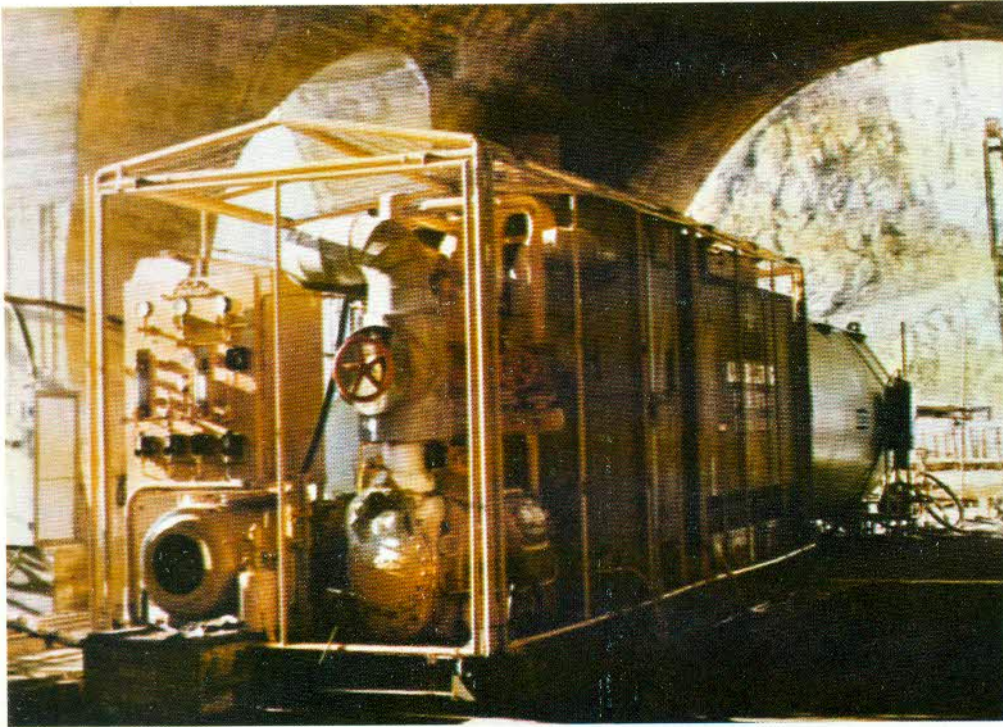


foto 20 - Il gruppo frigorifero a circuito di ammoniaca per il raffreddamento della sala-moia. Potenza: 180 HP.

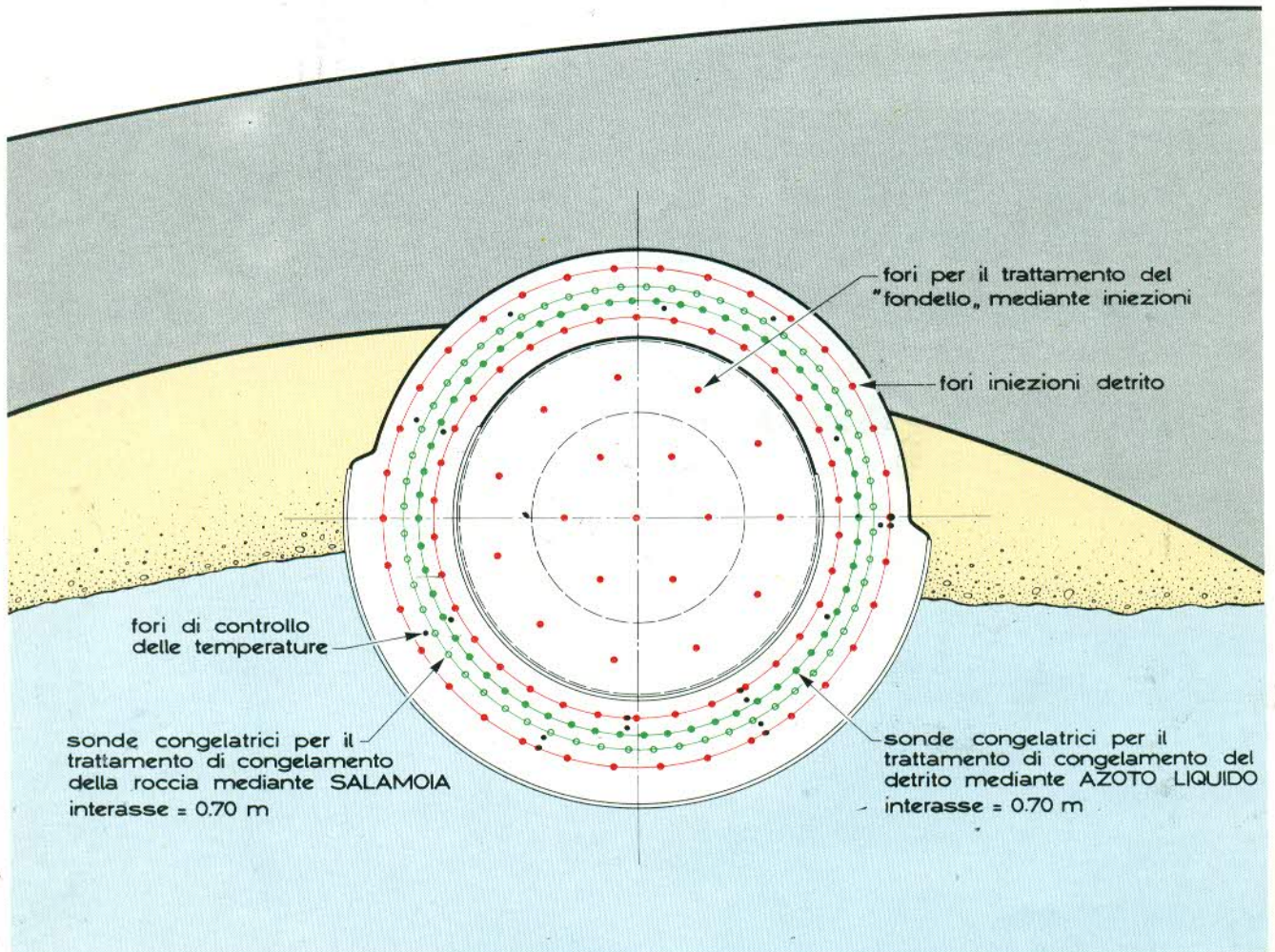


figura 21 - Fase di congelamento - planimetria.

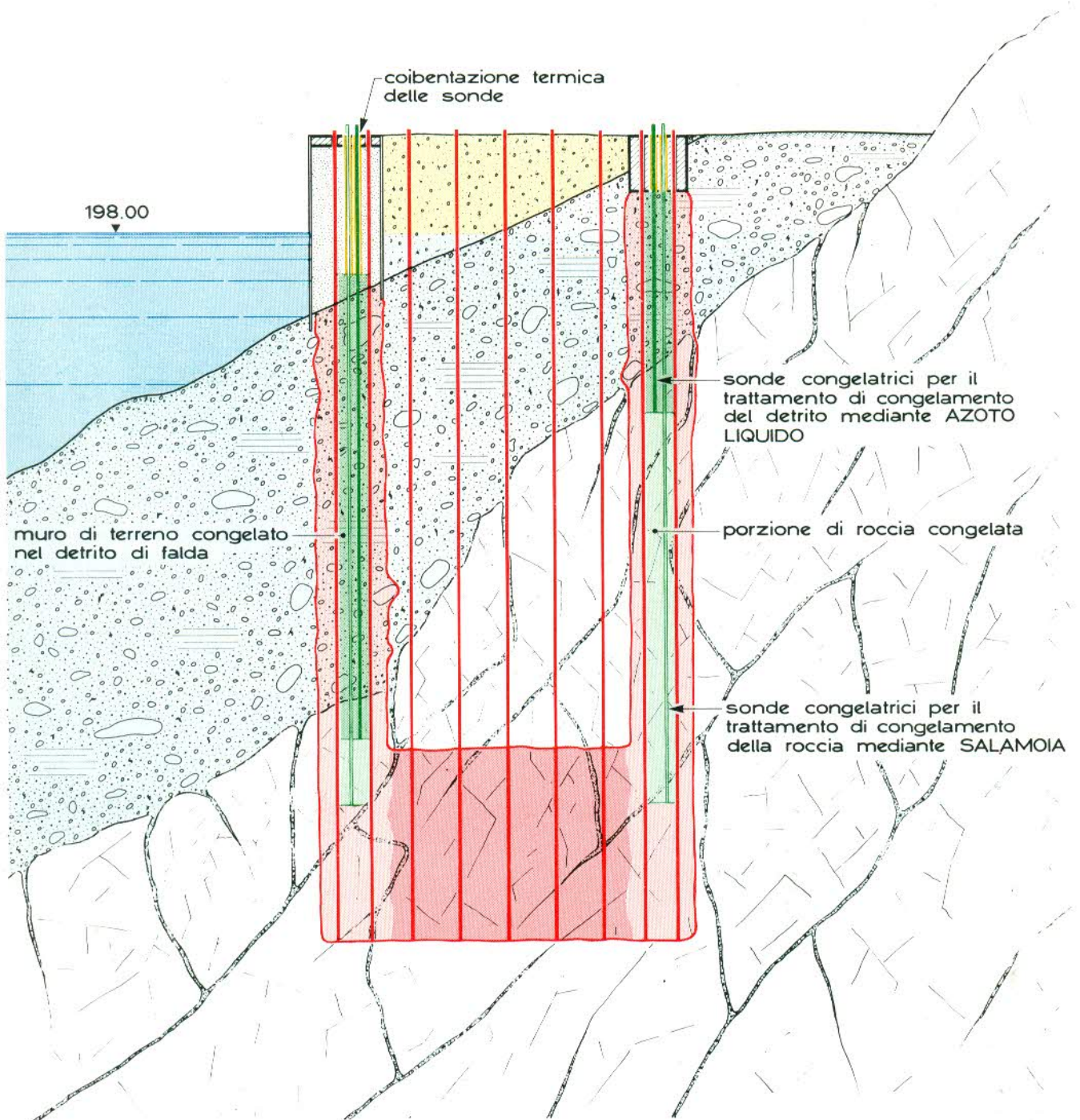


figura 22 - Fase di congelamento - sezione.

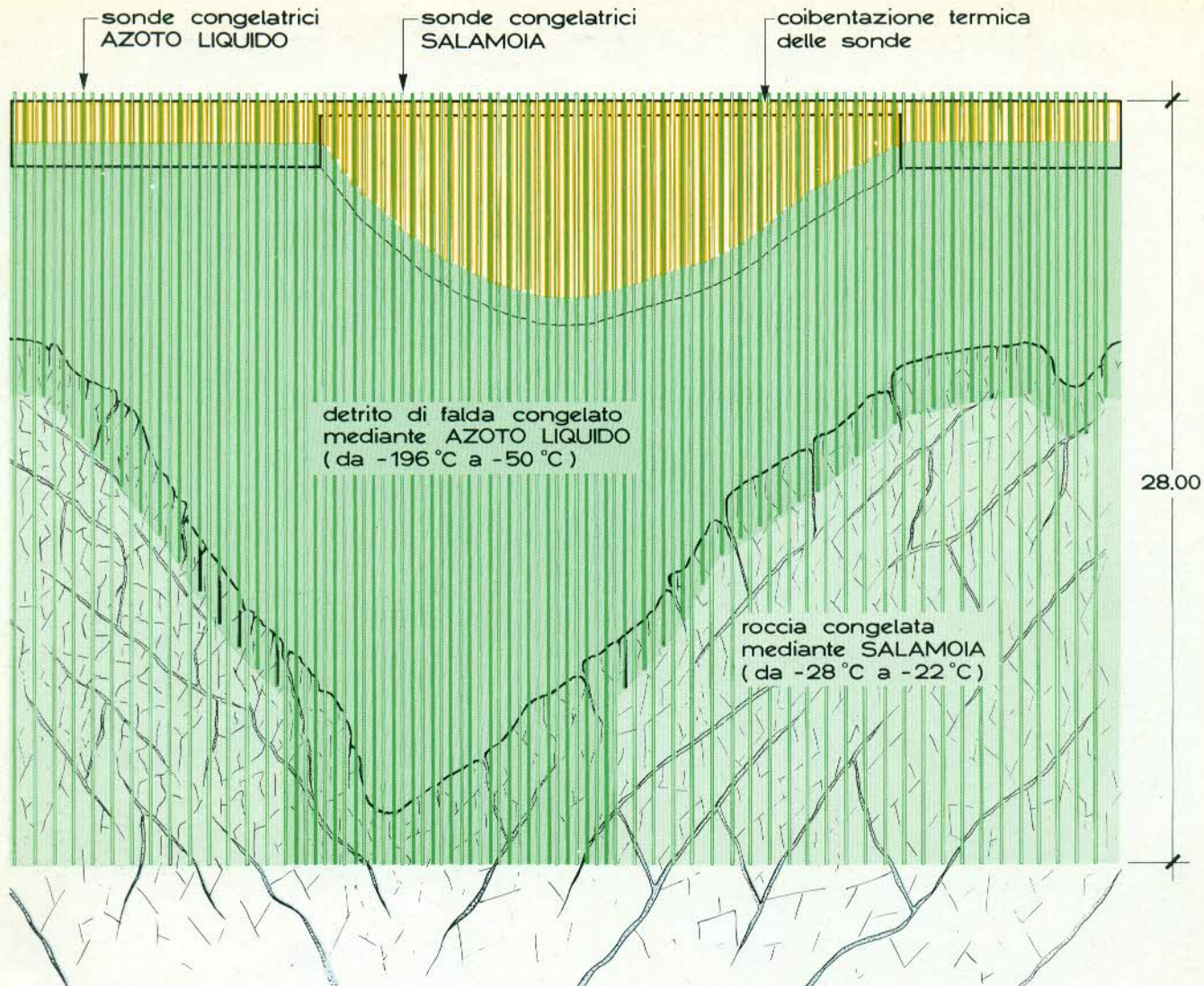


figura 23 - Sezione sviluppata lungo l'asse del congelamento.

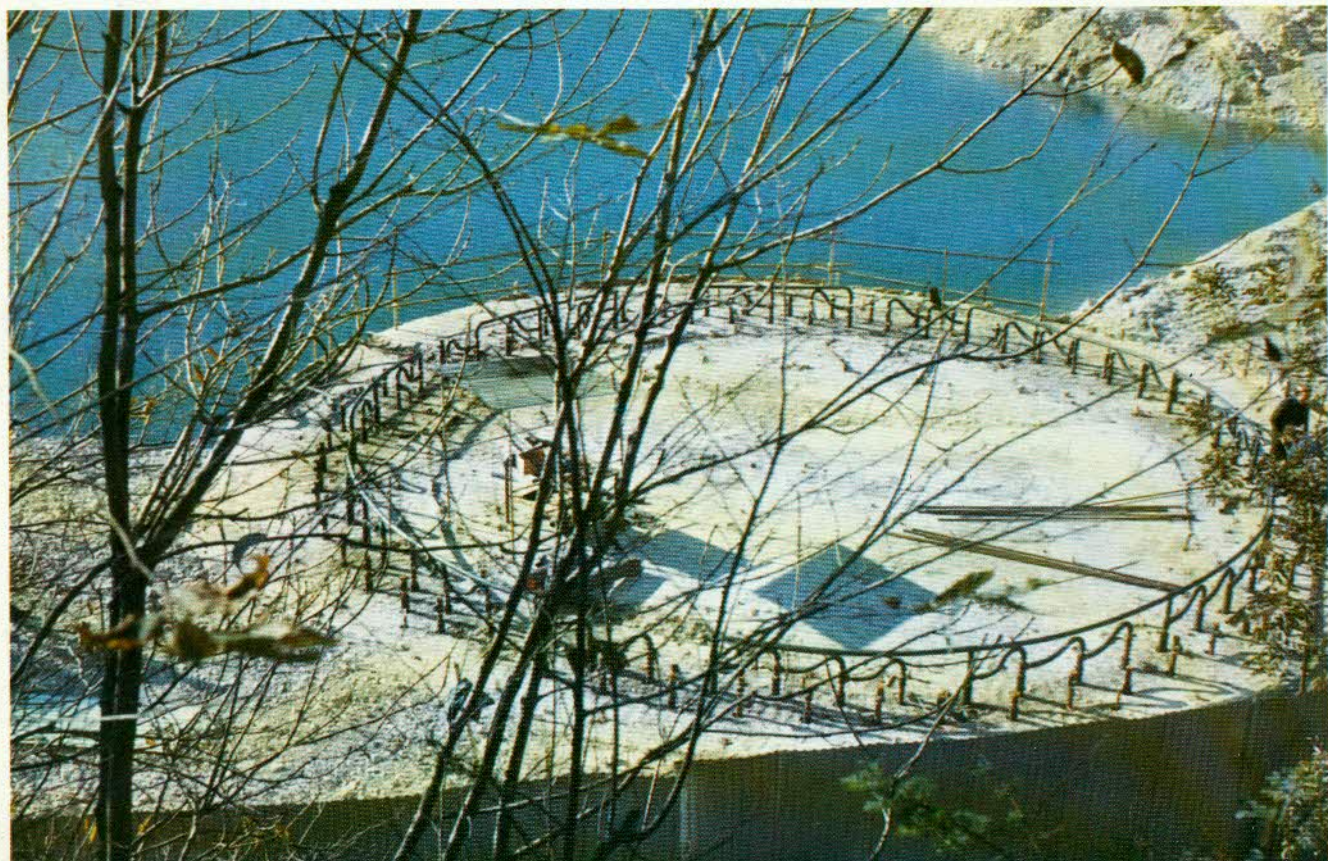


foto 24 - Le sonde di congelamento ed i circuiti di distribuzione in fase di montaggio.

Particolari esecutivi del cantiere di congelamento

Le perforazioni per la posa delle sonde sono tutte state eseguite a rotopercolazione con il sistema O.D. e circolazione di fango bentonitico.

Il rivestimento è sempre stato fatto scendere il più possibile per garantire maggiormente la verticalità dei fori: in roccia però generalmente si è proceduti con la batteria di aste libere.

Le deviazioni sui 28.00 m di lunghezza delle sonde sono state minime; la *foto 25* mostra l'unica sonda, sulle 125 messe in opera, che essendo deviata attorno ai 26.00 m di profondità è apparsa nel corso dello scavo.

Le sonde congelatrici erano costituite da due tubi coassiali dei quali l'esterno di 2" di diametro e l'interno di 3/4".

Sia per i tubi congelatori, che per le teste di adduzione, sono stati utilizzati materiali identici per i due metodi di congelamento: questo allo scopo di verificare la possibilità di una eventuale interscambiabilità tra azoto e salamoia con l'utilizzazione degli stessi elementi di distribuzione.

Le sonde per la circolazione dell'azoto sono state distribuite, con interasse di 0,567 m, lungo una circonferenza distante dalla parete di scavo di 1,05 m; la loro lunghezza, come appare in *figura 23*, era tale da penetrare la roccia come minimo un paio di metri.

Nella parte verso il lago, l'intervento con azoto in roccia è stato un poco esteso a causa del forte stato di degrado della roccia stessa evidenziato dai sondaggi.

Le sonde per la salamoia sono state invece distribuite, con interasse di 0,721 m, ed a quinconce rispetto alle precedenti, lungo una circonferenza distante dalla parete di scavo di 1,45 m.

La loro lunghezza è stata tenuta uniforme e pari a 28.00 m.

I circuiti di distribuzione in superficie sono stati realizzati con materiali differenti per i due sistemi: rame in generale per l'azoto; ferro per la salamoia.

Anche i diametri dei tubi e le valvole hanno dovuto assecondare le differenti esigenze; in particolare la distribuzione principale della salamoia ha utilizzato tubi da 4".

Alcuni dettagli della distribuzione di superficie sono visibili sulle *foto 26* e *27*.

Come si può notare sulla *foto 26* i grossi tubi da 4" non sono stati coibentati sia per non creare grossi ingombri in uno spazio già così sacrificato sia perchè la perdita di frigorifici risultava minima specialmente dopo la formazione della incrostazione di ghiaccio sui tubi stessi.



foto 25 - L'unica sonda congelatrice deviata a 26.00 m di profondità, messa a nudo durante lo scavo. Sulla destra si nota una spaccatura della roccia con materiale fine congelato ed in parte impregnato con resina.

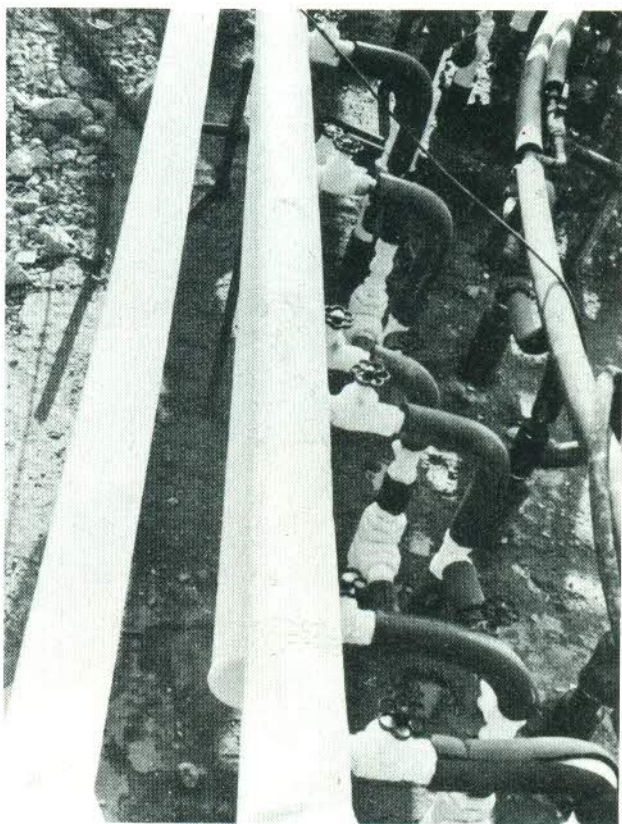


foto 26 - Dettaglio degli anelli di distribuzione: sulla sinistra il circuito della salamoia con i tubi da 4" non coibentati, mentre sulla destra corre il tubo per la distribuzione dell'azoto alle relative sonde.

Le operazioni di congelamento sono state organizzate sulla base dei dati raccolti durante precedenti esperienze: la vera e propria regia delle immissioni sia di azoto che di salamoia è però stata determinata dal grande tabellone sul quale venivano costantemente registrate le temperature del terreno in ben 210 punti di rilevamento, distribuiti nel corpo del muro di ghiaccio in via di formazione.

Sono stati predisposti, a varie distanze dall'asse del muro, 19 fori equipaggiati con tubi riempiti di alcool ed in essi le temperature venivano lette ad 11 profondità differenti.

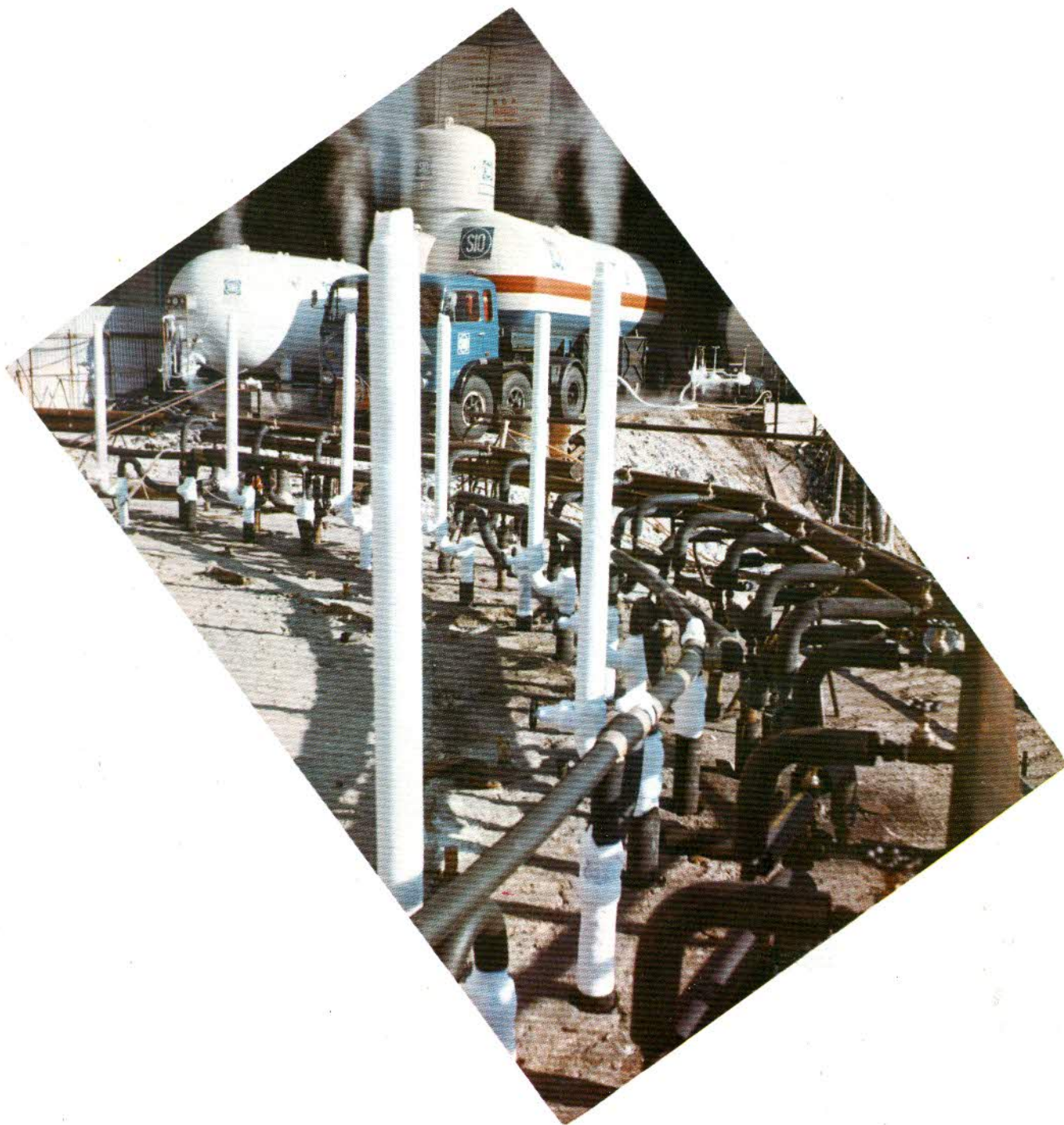


foto 27 - Fase di congelamento con azoto liquido; all'esterno si può vedere il circuito per la salamoia non ancora in funzione.

La foto 28 mostra il tabellone con i diagrammi temperatura-tempo: i diversi colori corrispondevano alle varie zone in cui la parete di terreno ghiacciato era stata suddivisa ed aiutavano ad individuare, con immediatezza, la situazione e quindi ad adottare con la celerità necessaria i provvedimenti del caso.

Osservando i diagrammi nel loro complesso si può notare bene la tendenza di tutte le linee a convergere, col passare del tempo, verso una temperatura posta tra -5°C e -10°C .

Anche le curve più singolari all'inizio, con massimi e minimi molto pronunciati, tendono a regolarizzarsi.

Tutto questo sta a significare che nel terreno sottoposto a trattamento, si svolge un naturale processo di scambi termici (cessione di frigorifici dai punti più

freddi a quelli circostanti) in un certo senso indipendenti dalla posizione delle fonti di freddo, processo che porta ad avere un muro di caratteristiche geometriche sempre più uniformi, con temperatura media sempre più bassa verso i bordi e gradiente termico nello spessore tra sonda ed isoterma 0°C sempre meno pronunciato.

Per la costituzione del muro nel detrito si sono impiegati 1'300'000 l di azoto liquido e per il congelamento attorno ai -5°C della parte in roccia il gruppo frigorifero da 180 HP ha lavorato per 25 giorni (compresi i giorni di mantenimento durante l'esecuzione dello scavo).

Le forniture e le installazioni al cantiere relative allo stoccaggio ed al pompaggio dell'azoto liquido, sono state effettuate dalla società S.I.O. S.p.A. che ha assicurato il regolare afflusso dei grandi quantitativi in gioco.

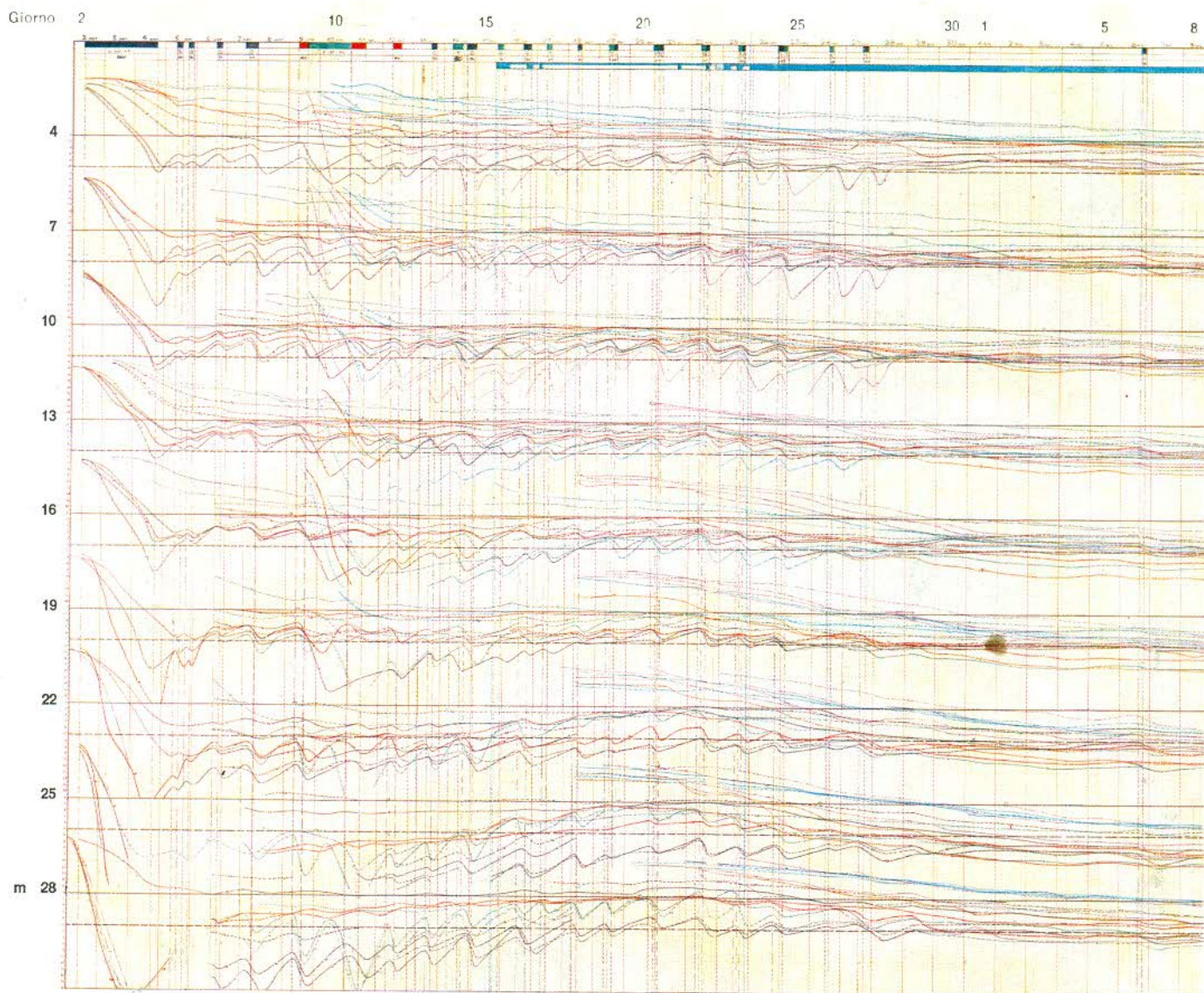


foto 28 - Diagrammi delle temperature del terreno durante la formazione del muro di ghiaccio. I colori si riferiscono alle diverse zone della parete ed alle varie profondità fino a 28,00 m.

Trattamenti particolari eseguiti nella roccia sotto il piano di fondo scavo

Con gli interventi sopra descritti, è stata creata una protezione sicura nella zona laterale di tutto lo scavo; restava il problema del fondo, di quella porzione di roccia che avrebbe dovuto accogliere il carico di tutta l'opera.

Il problema in verità era duplice: da una parte era necessario in fase di scavo assicurare la tenuta idraulica anche del fondo, di quello che è stato chiamato « fondello », dall'altra bisognava fornire alla roccia un grado di consolidamento tale da sopportare perennemente in sicurezza, il carico totale dell'opera valutato in 15'000 tonnellate; il carico specifico massimo sul lembo più compresso, nelle condizioni più severe, era di 20 kg/cm².

a) Impermeabilizzazione

Le precedenti esperienze con iniezioni cementizie avevano dimostrato, come del resto era prevedibile, nota la granulometria del mezzo, l'impossibilità di assicurare con miscele grossolane la tenuta.

Tali iniezioni non sono tuttavia risultate inutili perchè hanno assolto alla funzione di ricompri-
mere tutta la zona del « cappellaccio » di roccia.

Si è dunque pensato ad un trattamento con resine fenoliche, miscele di viscosità pari a 2 centipoises, immesse nel terreno attraverso tubi a valvole interessando un notevole spessore di roccia (8.00 m) sotto il fondo scavo, come si può notare sulla *figura 11*.

Le operazioni relative si sono svolte normalmente e la tenuta è poi risultata ottima, tanto che mai si è fatto ricorso all'uso di pompe.

Sul fondo scavo, nelle faglie messe a nudo, si è potuto anche verificare la buona diffusione della resina nel materiale fine limoso (*foto 25*).

b) Consolidamento

A tale scopo è stata applicata una tecnologia abbastanza insolita che è consistita nell'asportazione forzata del limo, o meglio di parte di esso, mediante lavaggi con acqua ed aria in pressione.

L'acqua e l'aria compressa venivano immesse contemporaneamente nelle valvole di tubi appositamente posti in opera; fra questi tubi erano state predisposte delle puntazze finestate attraverso le quali il materiale smosso dai lavaggi veniva convogliato verso la superficie.

Si è trattato di un lavoro abbastanza complicato come sequenza di operazioni; più volte le puntazze hanno dovuto essere liberate dal limo che raddensandosi in certi punti formava otturazioni nel tubo. Ad ogni modo dopo vari reiterati interventi si è riusciti a fare fluire in superficie acqua quasi limpida, segno evidente che buona parte delle fessure era stata liberata dal materiale compressibile di riempimento.

Da ultimo, attraverso i tubi a valvola, sono state eseguite le iniezioni di consolidamento con miscele a base di cemento.

Con questo sistema si è trattato uno spessore di roccia di 15.00 m sotto il piano d'appoggio della pila.

Lo scavo ed il getto

Una descrizione più dettagliata, certamente migliore, potrebbe essere fatta dai tecnici dell'Impresa S.C.A., esecutori di queste operazioni.

Accenniamo qui solo brevemente a questa fase che è stata la più affascinante perchè, oltre alla formazione di questa profonda cavità sotto il lago (*foto 29*), ha dimostrato giorno per giorno l'efficienza di tutto il lungo lavoro preparatorio precedentemente eseguito.

Lo scavo veniva effettuato con potenti martelli demolitori; sul fondo lavorava una pala meccanica con cucchiaia rovescia ed il materiale veniva portato in superficie con grosse benne manovrate da una gru del tipo Lorain (*foto 30*).

Nel detrito di falda non vi sono stati problemi di sorta; le pareti risultavano naturalmente verticali perchè il muro di ghiaccio si era uniformato molto bene.

Come è mostrato sulla *foto 31* la parete scavata veniva rivestita, mediante spruzzatura con macchina apposita, con uno strato di poliuretano espanso (colore giallo) allo scopo di:

- creare una coibentazione termica per impedire sia alle frigorifiche trasmesse dai tubi congelatori di disperdersi nell'atmosfera, sia al muro di ghiaccio di essere attaccato dall'esterno. Soprattutto durante le piogge la parete veniva intaccata in modo sensibile
- formare una crosta protettiva che legasse più saldamente al terreno i ciottoli più esterni, che erano trattenuti solamente da un velo più o meno stabile di ghiaccio
- ottenere infine una protezione termica per la parte più esterna del getto relativo al fusto della pila cilindrica cava.

In roccia lo scavo (*foto 32*) ha naturalmente subito un notevole rallentamento; il taglio ottenuto in precedenza con il presplitting, l'uso delle darde, la pendenza dei blocchi di roccia hanno tuttavia reso possibile il completamento dell'operazione in tempi molto brevi.

Bisogna anche dire, crediamo con molta obiettività e senza retorica, che l'operazione di scavo era stata a lungo discussa e predisposta dall'Impresa in modo assai accurato; le difficoltà in altre parole erano state previste e quindi hanno potuto essere superate con mezzi idonei e con ottima organizzazione.

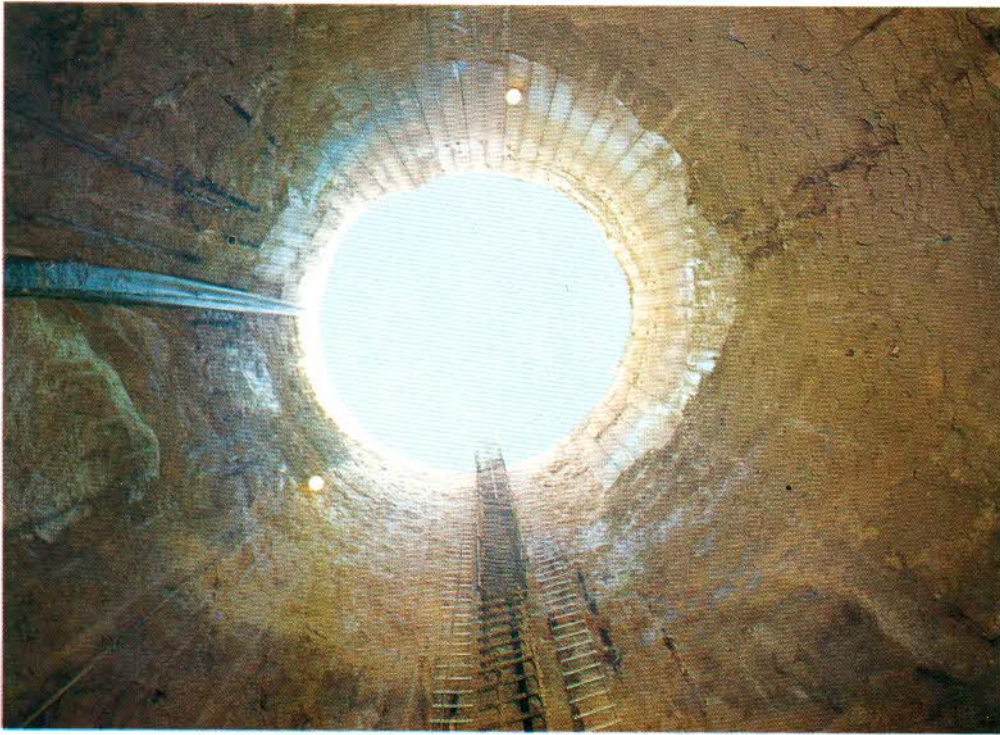


foto 29 - La cavità dello scavo sotto falda vista da 27.00 m circa di profondità.



foto 30 - Scavo in fase di esecuzione.



foto 31 - La parete dello scavo veniva rivestita con uno strato coibente di poliuretano espanso visibile sulla foto, di colore giallo. Il ghiaccio tende a trasparire.



foto 32 - Scavo dell'incastro nella roccia. In alto si può notare la zona di contatto con il detrito di falda; sul fondo una grossa spaccatura completamente asciutta malgrado il notevole carico idraulico. Si notano anche alcune tracce di fori di "presplitting".

Lo scavo, profondo 27.00 m, ha comportato la asportazione di 2'200 m³ di materiale di cui circa 1'000 m³ di roccia; il tempo di scavo è stato di 20 giorni lavorativi.

Il getto è stato rapidissimo (*figura 33*); dopo l'esecuzione del plinto, la cui armatura era già stata predisposta, il fusto della pila è stato realizzato con casseformi rampanti del tipo Lambertini.

L'operazione getto fino alla quota del livello del lago, corrispondente con il piano di imposta del pulvino, è stata completata in 10 giorni.

La *foto 35* mostra dall'alto verso il basso il getto della pila da poco ultimata.

In *figura 34* sono schematizzate tutte le opere della struttura bilanciata sostenuta dalla pila centrale.

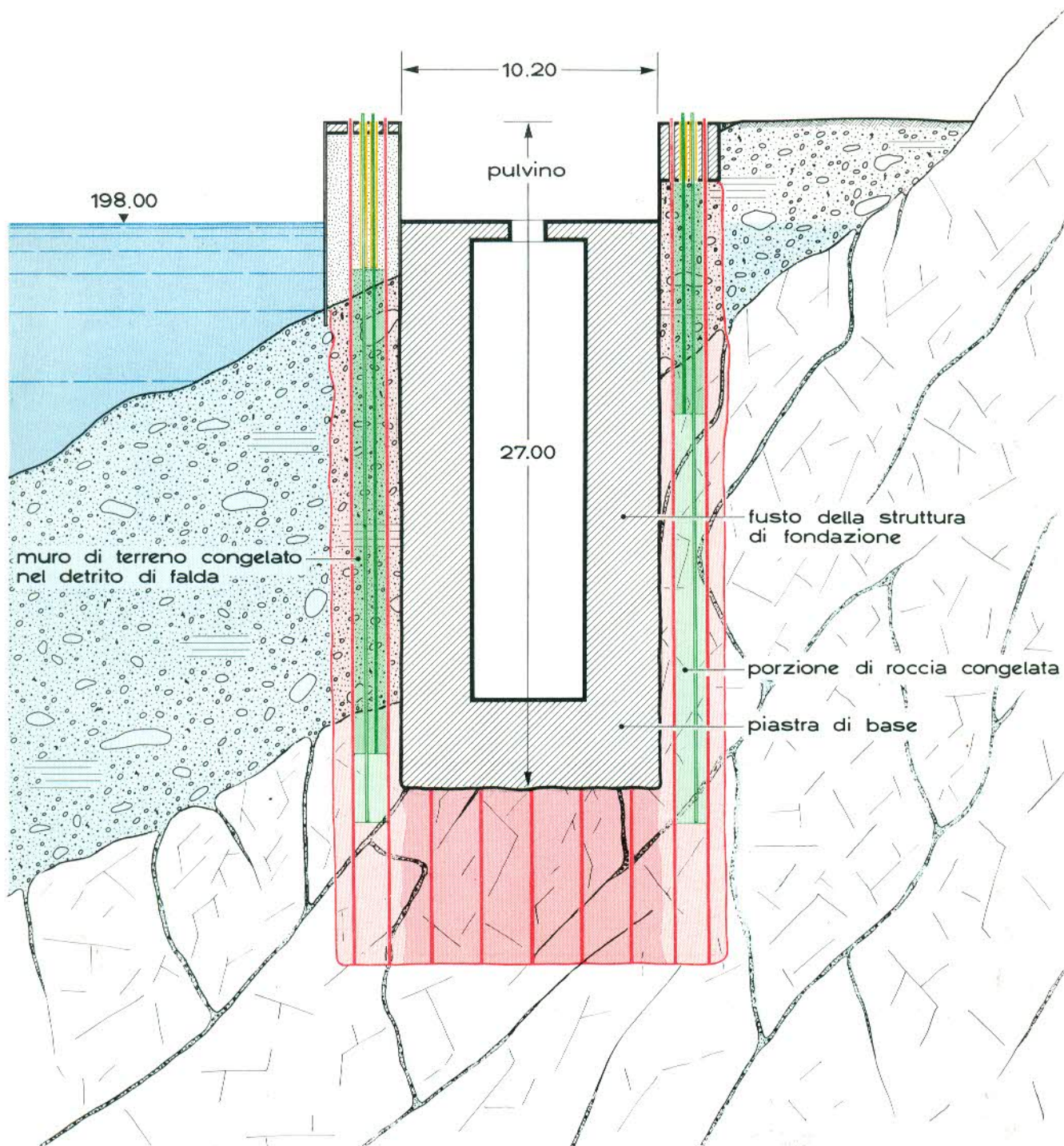


figura 33 - Fase di scavo e getto della fondazione della monopila - sezione.

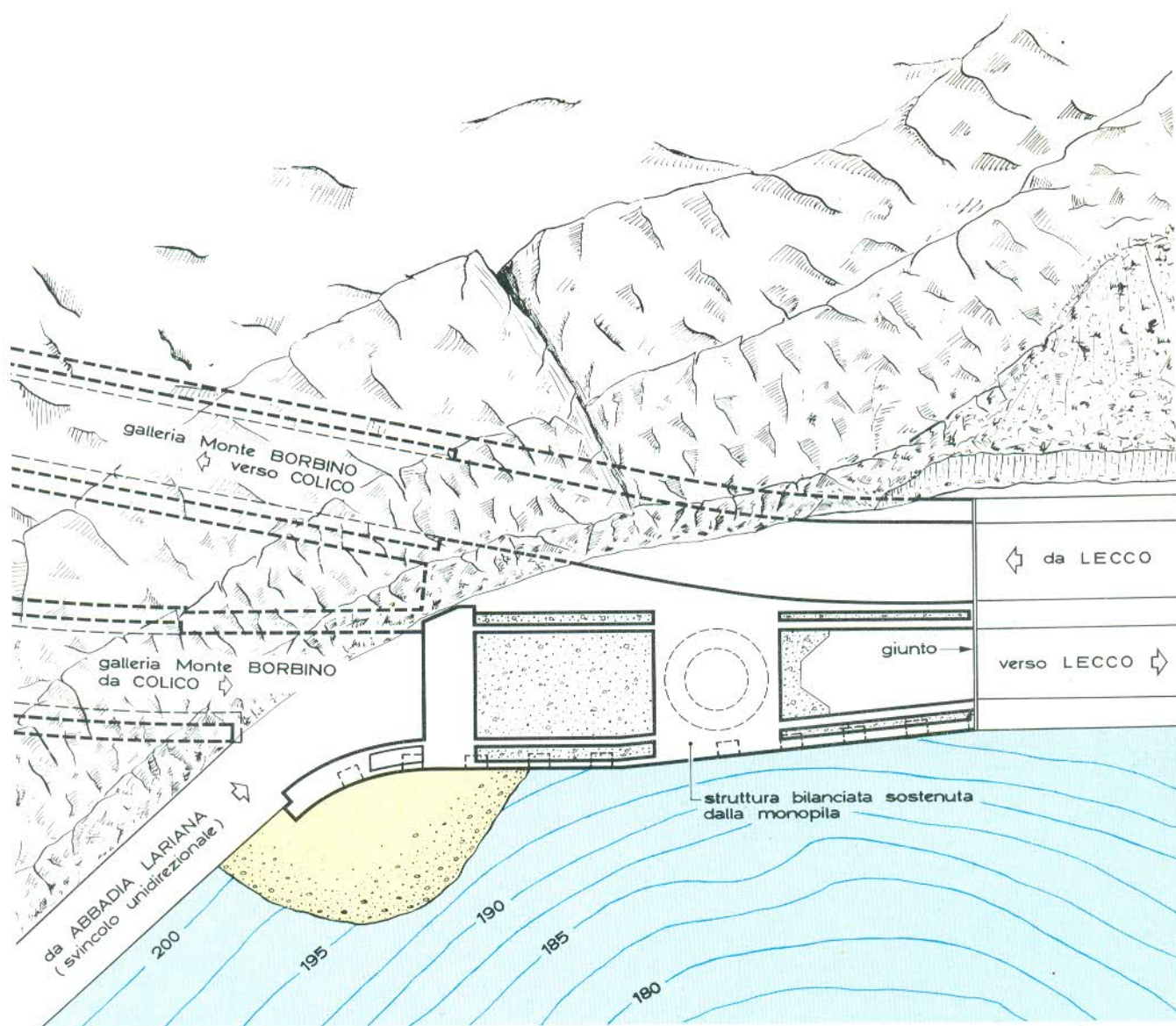


figura 34 - Assetto definitivo delle strutture portanti le due carreggiate della nuova superstrada - planimetria.

Conclusioni

La figura 34 mostra anche come la nuova superstrada verso Colico, proprio in corrispondenza della complicata opera ora descritta, cambi decisamente orientamento.

Il lago viene qui definitivamente abbandonato ed il tracciato inizia il suo nuovo corso nell'entroterra, dietro i centri abitati che dovrebbero così mantenere la loro integrità tanto preziosa.

Si è trattato di un difficile nodo da sciogliere: è stato sciolto con un'operazione assai onerosa che però riteniamo e speriamo torni utile nel proseguo della realizzazione di questo percorso così discusso.

Dal punto di vista strettamente tecnico, l'opera di Abbadia Lariana ha dimostrato come lo sforzo comune di tecnici esperti in differenti campi, abbia consentito di superare in sicurezza un punto critico del percorso con una struttura certamente ardua che doveva essere impostata su roccia infida, attraverso un materasso di terreno instabile, il tutto sovrastato dalla parete a picco della montagna.

La tecnica del congelamento ha intanto fatto un ulteriore passo in avanti; tra l'altro si è intravista la possibilità di combinare i due sistemi « azoto » e « salamoia » per ottenere con lo stesso coefficiente di sicurezza identici risultati a più basso costo.