

ARCHIVIATO RECORD 68

INIEZIONI E MISCELE APPLICAZIONI

Achille Balossi Restelli

**Trattamento preventivo,
mediante iniezioni,
di terreni difficili sotto falda
per consentire lo scavo
di grandi gallerie**

Omaggio della



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

TORINO 26-27-28 SETT. 1959

Estratto dagli Atti del 1° Convegno Internazionale sui problemi tecnici nella costruzione di gallerie
Sessione II - Le grandi gallerie stradali e ferroviarie.

Il 1° Convegno Internazionale sui problemi tecnici nella costruzione di gallerie, si è svolto a Torino nei giorni 26 - 27 - 28 settembre 1969, promosso dalla Associazione Mineraria Subalpina (c/o Istituto di Arte Mineraria del Politecnico, corso Duca degli Abruzzi 24 - 10129 Torino), nel quadro del "19° Salone Internazionale della Tecnica".

**Trattamento preventivo,
mediante iniezioni,
di terreni difficili sotto falda
per consentire lo scavo
di grandi gallerie**

Achille Balossi Restelli

SESSIONE II
COMUNICAZIONE 4

**TRATTAMENTO PREVENTIVO, MEDIANTE INIEZIONI,
DI TERRENI DIFFICILI SOTTO FALDA
PER CONSENTIRE LO SCAVO DI GRANDI GALLERIE**

Achille Balossi Restelli ()*

RIASSUNTO - RÉSUMÉ - SUMMARY - ZUSAMMENFASSUNG

Trattamento preventivo, mediante iniezioni, di terreni difficili sotto falda per consentire lo scavo di grandi gallerie.

L'articolo illustra nei particolari uno dei primi interventi di iniezioni chimiche realizzato per consentire la prosecuzione dello scavo di una grande galleria autostradale: l'avanzamento con normali sistemi era impedito da fenomeni incontenibili di rifluimento di sabbie fini con acqua in pressione. Si pone l'accento sulla evoluzione avvenuta nella tecnologia dell'intervento. Seguono descrizioni schematiche di altri trattamenti eseguiti per permettere lo scavo di gallerie stradali e ferroviarie in Italia.

Préconsolidation, par injections, de terrains difficiles sous nappe pour permettre le creusement de galeries de grande section.

L'article décrit en détail un des premiers traitements effectués à l'aide d'injections chimiques pour permettre le creusement d'une grande galerie routière. Le percement avec des systèmes normaux était empêché par le fluage de sables fins avec eau en pression. On met en évidence l'évolution de la technologie du traitement. La description d'autres traitements effectués pour permettre le creusement de galeries routières et de chemins-de-fer en Italie, termine la relation.

Preconsolidation by grouting of difficult soils beneath the water table to allow the driving of large tunnels.

The article describes in detail one of the first treatments carried out with chemical grouts to enable the driving of a motor road tunnel. The progress with normal tunnel-

(*) Dottore Ingegnere, della Ing. Giovanni Rodio & C. Impresa Costruzioni Speciali S.p.A.

ling systems was hindered by uncontrollable phenomena in the form of flow of fine sands and water under pressure. The evolution of the grouting technology is emphasised. Concise descriptions follow of other treatments carried out for driving motorway and railway tunnels in Italy.

Vorbehandlung durch Injektionen in besonders schwierig wasserhaltigen Boeden, um das Bohren von Grosstunnels zu ermöglichen.

Der Artikel beschreibt in allen Einzelheiten eine der ersten Ausfuehrungen mit chemischen Injektionen um die Fortsetzung der Ausgrabung eines grossen Autobahn-Tunnels zu ermöglichen: der Vorschub mit den ueblichen Massnahmen war verhindert durch unkontrollierbare Erscheinungen von Feinsand- und Druckwasserausbruechen. Man verweist auf die Entwicklung der technologischen Fortschritte. Es folgen schematische Beschreibungen anderer Behandlungsarten, welche die Bauarbeiten von Strassen- und Bahn-Tunnels in Italien ermöglichen.

GENERALITÀ

Il notevole incremento registratosi negli ultimi anni nella costruzione di strade e ferrovie aventi caratteristiche tali da consentire in regime di sicurezza alte velocità del traffico, ha aperto come logica conseguenza una serie di difficili problemi che hanno potuto essere affrontati e risolti molto spesso con l'ausilio di tecniche del tutto nuove. Le limitate pendenze longitudinali e l'ampiezza dei raggi di curvatura delle moderne autostrade hanno obbligato i tracciati delle stesse ad addentrarsi in lunghe gallerie di base per superare ostacoli montagnosi, che un tempo sarebbero stati ove possibile aggirati (caso frequente per le strade lungo le coste) oppure superati tuttalpiù con brevi gallerie di valico. Per le stesse ragioni, viadotti e ponti assai arditi, di non comuni dimensioni, hanno dovuto essere progettati e realizzati anche in zone impervie e su terreni poco stabili. L'attraversamento di terreni incoerenti o pseudocoerenti in presenza di acqua costituisce per lo scavo di gallerie di notevole sezione fonte di difficoltà sempre gravose ed in taluni casi insormontabili senza l'ausilio di tecniche particolari, sebbene i mezzi oggi a disposizione delle Imprese siano sempre più efficienti. Tra i vari tipi di trattamenti speciali ha avuto recentemente un interessante sviluppo quello basato sul consolidamento preventivo del terreno mediante l'iniezione di prodotti a bassa viscosità che, per successiva gelificazione o polimerizzazione, conferiscono alle formazioni trattate una coesione variabile da qualche chilo a qualche decina di chili al cm².

Si espongono in questa memoria le tecniche adottate e le prime risultanze emerse dall'esperienza esecutiva di una serie di interventi ultimati negli anni 1968 e 1969 o tutt'ora in corso, basati principalmente sull'impiego di gel rigidi di silice ottenuti per reazione in seno al terreno di una miscela di silicato di sodio, acetato di etile ed opportuni agenti regolatori di presa (brevetto Solétanche-Rodio). In casi particolari sono stati applicati sistemi di drenaggio: a questo proposito è stata presentata una memoria separata relativa all'intervento eseguito alla galleria Scampitella (autostrada Napoli-Bari). Tralasciando gli aspetti teorici e generali, già trattati

dalla letteratura tecnica specializzata, interessa qui esaminare quali sono i criteri e le modalità d'applicazione che conducono ai risultati tecnico-economici migliori, tenuto conto dei particolari aspetti del problema quale si presenta in ogni singolo caso. Viene trattato nel dettaglio il lavoro eseguito alla galleria Serra dell'Ospedale; vengono invece semplicemente esposti i problemi e le soluzioni adottate per alcune altre gallerie stradali e ferroviarie.

GALLERIA SERRA DELL'OSPEDALE - tronco IV, lotto 7° dell'autostrada Salerno-Reggio Calabria - Ente Appaltante: ANAS - Impresa Generale: ICEFS, Bologna - Località: Tarsia (Cosenza).

PREMESSE

Le due gallerie parallele, di lunghezza di 319 m ed 841 m rispettivamente, hanno una sezione di scavo di 105 m² circa; la larghezza della corsia di traffico è di 9,50 m. Il tracciato dell'autostrada deve sottopassare nel tratto compreso fra Castrovillari e Cosenza una collina piuttosto alta, costituita da un banco inferiore di argille sabbiose che sopporta una spessa coltre di sabbie medio-fini, sede di falde acquifere. Il passaggio sabbia-argilla non avviene in modo netto; si riscontra l'esistenza di una zona di transizione costituita da banchi più o meno potenti d'argilla separati da sottili strati di sabbia dello spessore di qualche centimetro, aventi giacitura suborizzontale. La superficie di contatto, per un lungo tratto centrale del tracciato, interseca la sezione delle gallerie nella zona della calotta dal lato Reggio Calabria e raggiunge gradualmente i piedritti spostandosi in direzione di Salerno, sia a causa della pendenza (in ascesa verso Salerno) delle gallerie, sia a causa di un approfondimento del banco sabbioso.

Il metodo di scavo, di quasi generale adozione nei lavori consimili attualmente eseguiti in Italia, comprende le seguenti operazioni:

- avanzamento di calotta mediante il posizionamento di centine metalliche, con interasse variabile tra gli 80 cm ed il metro, ed infilaggio di marciavanti in legname;
- successivo getto del rivestimento di calotta secondo tratti di 3 m di lunghezza;
- scavo e getto, a campioni, dei piedritti e dell'arco rovescio.

L'avanzamento in calotta ha dovuto essere interrotto a tutti e quattro gli imbocchi a causa della incontenibilità delle sabbie, rifluenti sotto carichi idrostatici crescenti man mano che lo scavo procedeva. Fenomeni di sfornellamento, accompagnati da importanti rilasci del terreno verso le zone alte della collina, venivano a stento contenuti. Tutte le cautele adottate dall'Impresa nelle operazioni di scavo e di armatura provvisoria non hanno consentito di evitare la formazione di un camino (visibile nella figura 1) e la conseguente invasione della galleria (lato Sud della canna Salerno-Reggio Calabria) di una grande massa di sabbia e l'arretramento del fronte di una ventina di metri circa.

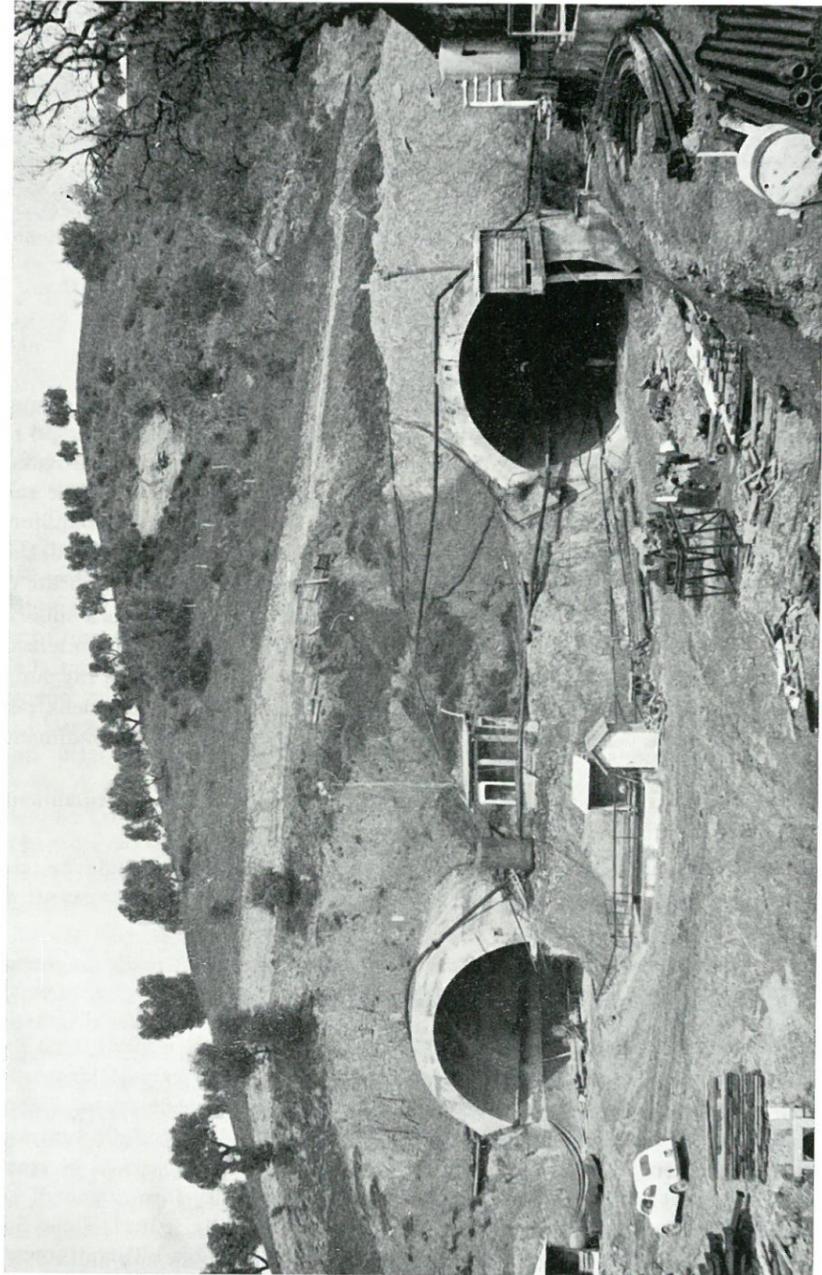


Fig. 1. - Galleria Serra dell'Ospedale: vista degli imbocchi Sud delle due cunicole; in alto sulla collina è visibile la voragine prodottasi in superficie a causa del rilascio del terreno avvenuto alla progressiva 77 della via Salerno - Reggio Calabria.

Alla fine di ottobre del 1966 la situazione era la seguente:

imbocchi Sud	}	via SA-RC scavo calotta arrestato alla progressiva 77,
		via RC-SA scavo calotta arrestato alla progressiva 150;
imbocchi Nord	}	via SA-RC scavo calotta arrestato alla progressiva 160,5,
		via RC-SA scavo in lento avanzamento alla progressiva 165;

(esecuzione di strozzo e piedritti iniziati ai due imbocchi lato Reggio).

Importanti opere di drenaggio per mezzo di perforazioni e cunicoli sono state tentate dall'Impresa nella speranza di captare almeno parte delle acque percolanti attraverso le sabbie ed allontanarle dai fronti di scavo. Tali lavori sono però stati abbandonati per la loro pericolosità ed inefficacia. Il continuo fluire di sabbia ed acqua anche attraverso le ridotte sezioni dei cunicoli denunciava chiaramente la gravità del problema dovuta alla grande estensione del fenomeno: non si trattava, come in un primo tempo si era sperato data la morfologia dell'ambiente, di falde d'acqua isolate sospese, bensì di falde importanti alimentate da zone anche molto lontane e forse messe in collegamento tra di loro a causa dei rilasci del terreno in seguito allo scavo. A questo punto la direzione dell'ANAS acconsentiva che s'intraprendessero studi e prove sulla possibilità di consolidamento mediante iniezioni di un arco di terreno all'estradosso del futuro scavo.

SCOPI DELLE INIEZIONI

Con le iniezioni di miscele opportunamente scelte si vuole eseguire un trattamento di stabilizzazione delle sabbie che, a causa della mancanza di coesione, costituiscono zone di notevole instabilità rispetto agli orizzonti argillosi cui sono intercalate. Con tali trattamenti le sabbie vengono trasformate in una sorta di agglomerato rigido simile ad arenaria, allo scopo di consolidare ed evitare erosioni regressive nel tempo. Le iniezioni dunque devono interessare in modo uniforme tutti i terreni incoerenti appartenenti ad un certo intorno della galleria al duplice scopo:

- a) di far sì che l'equilibrio del terreno sovrastante la galleria, così come è stato raggiunto per via naturale, non venga turbato dallo scavo della galleria; questo non solo allo scopo di fare procedere lo scavo in modo sicuro senza che si manifestino fenomeni di sfornellamento, ma soprattutto perchè il rivestimento della galleria venga ad essere sottoposto a normali carichi che possono essere trasmessi solamente da un terreno che non ha subito sconvolgimenti; e nel tempo la distribuzione dei carichi sia omogenea;
- b) di far sì che tale equilibrio del terreno si mantenga nel tempo, anche dopo il getto della calotta, per impedire una distribuzione asimmetrica dei carichi sul rivestimento in calcestruzzo ed un eccessivo carico alle imposte della calotta. Vedremo più avanti, esaminando i dissesti intervenuti nelle prime parti delle gallerie che sono state scavate senza preventivo trattamento d'iniezioni, quanta importanza assuma il consolidamento agli effetti della stabilità dell'opera nel tempo.

Naturale conseguenza di questi ragionamenti è la necessità di intervenire con le iniezioni quando il terreno è ancora integro nel suo aspetto naturale; la diffusione della miscela nelle sabbie è allora assai facile, le pressioni d'iniezione possono essere contenute entro minimi valori, i quantitativi di miscela infine possono essere alquanto minori rispetto a quelli che si dovrebbero impiegare agendo in terreno già dissestato. Chiameremo questo tipo di trattamento « di regime » per differenziarlo da quello « intensivo » che si è dovuto adottare in tutti i tratti iniziali dove è avvenuto il rimaneggiamento dei materiali sovrastanti la calotta.

STUDI PRELIMINARI

Prima di intraprendere la prova in sito (il cui esito favorevole ha determinato l'adozione sistematica del metodo) sono stati eseguiti studi di laboratorio su campioni di terreno prelevati agli attacchi Sud e Nord delle gallerie in questione. Dall'esame delle curve granulometriche è apparsa subito chiara la necessità di tenere nettamente distinta la situazione di « regime », relativamente più semplice, da quella invece creatasi nell'intorno immediato degli attuali attacchi; situazione quest'ultima che ha raggiunto il massimo limite di disuniformità ed anomalia nella zona del fronte Sud della galleria Salerno-Reggio, dove era in atto il cammino di cui già si è detto.

Scopo principale delle prove è stata la ricerca della miscela più opportuna da adottare ed il dimensionamento del trattamento attraverso la definizione del raggio di diffusione dell'iniezione.

a) *Trattamento di regime*

Durante il trattamento di regime la miscela d'iniezione doveva semplicemente interessare gli strati di sabbia; una volta scelta la miscela in funzione della granulometria sarebbe rimasto solamente il problema geometrico della distribuzione dei fori d'iniezione, in modo tale che la miscela camminasse regolarmente lungo gli strati, praticamente orizzontali, di sabbia. Sono state eseguite varie prove, che qui di seguito riassumiamo, su campioni di sabbia prelevata dal fronte Sud della galleria Reggio-Salerno.

— Granulometria. Dalla curva 1) della figura 2 si osserva che si tratta di una sabbia media; il diametro efficace (d_{10}) è pari a 0,26 mm per cui si è stabilito di eseguire prove di iniezione con miscela a base di silicato-acetato che è normalmente adatta per terreni con granulometria fine, con d_{10} compreso tra 0,02 e 0,5 mm. Anche l'andamento della curva fa pensare alla possibilità di ottenere una buona diffusione della miscela; la sabbia è infatti decisamente monogranulare e conseguentemente la percentuale dei vuoti è piuttosto alta.

— Permeabilità. Sono state eseguite prove di permeabilità per mezzo di permeometri appartenenti ad apparecchi edometrici. La permeabilità media risultata da molte prove ripetute sotto differenti carichi è stata di $1,42 \times 10^{-2}$ cm/sec. Su alcuni provini di sabbia si è cercato di ottenere in laboratorio la densità massima in fase di saturazione. Si sono ottenuti i seguenti valori: densità umida (sabbia satura): 2,00 t/m³; densità secca: 1,58 t/m³; porosità: 40,9%; indice dei vuoti: 0,694; peso specifico dei grani: 2,678 t/m³.

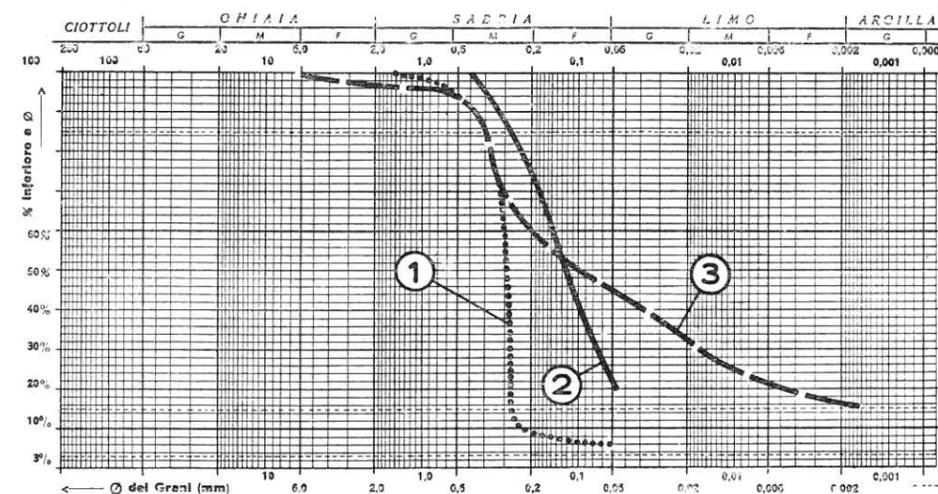


FIG. 2. - Galleria Serra dell'Ospedale. - Curve granulometriche: delle sabbie imbocchi Sud 1), delle sabbie imbocchi Nord 2), del materiale franato 3).

- Prove d'iniezione. Tali prove hanno confermato le previsioni di ottima diffusione nella sabbia della miscela silicato-acetato; i campioni di terreno preventivamente saturati d'acqua sono stati intimamente interessati dalla miscela, iniettata nelle celle di prova ad una pressione di 0,06 atmosfere. La presa è risultata molto buona in ogni punto dei provini cilindrici.
- Resistenza della sabbia iniettata. È stata inoltre confezionata della malta mescolando la sabbia in esame con miscela al silicato; la malta è stata versata in cubettiere ed i cubetti estratti dopo 2 ore circa: alcuni immersi in acqua, altri conservati all'esterno. Il processo di indurimento di tutti i provini è avvenuto regolarmente. Le prove di compressione eseguite a 24 ore dalla confezione della malta hanno fatto registrare i seguenti valori medi di rottura:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 26,2 \text{ kg/cm}^2 \text{ (cubetti conservati in acqua);} \\ \sigma_r &= 35,0 \text{ kg/cm}^2 \text{ (cubetti conservati all'esterno).} \end{aligned}$$

Tali valori sono normali per miscele di gel rigido di silice ed è stata quindi confermata la possibilità dell'applicazione di tale sistema al caso dei terreni di Serra dell'Ospedale.

- Tempo di iniettabilità. Tale tempo è funzione di molte variabili: composizione della miscela, sistema di mescolazione, quantitativi mescolati, temperatura dei singoli prodotti, temperatura ambiente. In laboratorio la temperatura s'aggrava intorno ai 19 °C; per le miscele provate il tempo di iniettabilità è risultato di 18 minuti. In cantiere si è dovuto ricorrere ad un ritardante di reazione per portare tale tempo ad un valore di 50÷60 minuti.
- Permeabilità dopo iniezione. Attraverso i campioni di sabbia alloggiati nei

permeometri è stata iniettata miscela al silicato. Dopo un certo tempo è stata controllata la permeabilità residua che è risultata dell'ordine di 10^{-5} cm/sec.

Queste prove di permeabilità sono state eseguite a carico variabile a causa dei quantitativi minimi d'acqua passante attraverso i campioni. Sono stati pure esaminati campioni di sabbia provenienti dagli imbocchi Nord. Alleghiamo la curva granulometrica tipo (curva 2) della figura 2. La sabbia appare un poco più fine di quella estratta dagli imbocchi Sud e la sua granulometria meno uniforme. La miscela al silicato-acetato è anche in questo caso la più consona tenuto conto degli scopi da raggiungere.

b) *Trattamento intensivo dei tratti rilasciati*

Il trattamento nelle zone prossime ai fronti d'attacco abbandonati si presentava alquanto problematico in quanto si aveva a che fare con sabbie mescolate in modo caotico con argille. Sono stati prelevati campioni di terreno dal fronte Sud della galleria Salerno-Reggio, nella zona interessata dal camino, dove presumibilmente la mescolanza sabbia-argilla è stata spinta a limiti notevoli.

La curva granulometrica 3 di questo materiale è riportata nella figura 2; si nota come il diametro efficace raggiunga valori bassissimi e la disuniformità del materiale sia molto forte. La curva è molto appiattita, il 50 % del materiale è caratterizzato da dimensioni dei grani comprese tra 0,1 e 6 mm. Osservando i campioni di questo terreno appare con evidenza come durante lo sfornellamento si siano mescolati i vari tipi di materiale appartenenti ai differenti strati: blocchi d'argilla sono frammisti a sabbia. Si sono anche notati frammenti di conglomerato a grana piuttosto grossolana.

L'acqua di falda ha corso abbondantemente attraverso questi materiali e probabilmente ha trascinato la parte più fine verso il basso. In laboratorio si è cercato di riprodurre con i campioni giunti dal cantiere la reale situazione, che evidentemente è stata variata durante il prelievo ed il trasporto. A conclusione degli esperimenti d'iniezione si è potuto osservare che:

- la parte finissima del campione di terreno non era iniettabile;
- un consolidamento d'insieme della massa era tuttavia ottenibile in quanto la miscela iniettata, pur non penetrando nei noduli di argilla, avrebbe potuto farsi strada attraverso le vie di materiale sabbioso.

Naturalmente il grado di consolidamento raggiungibile diveniva funzione della frequenza di queste vie a permeabilità più alta. Per quanto riguarda la miscela da adottarsi in questa situazione, si è deciso di eseguire un primo tentativo con la stessa miscela al silicato utilizzata poi per il lavoro « a regime ».

SCHEMA DEL TRATTAMENTO INTENSIVO E TRATTO DI PROVA

In seguito all'approfondito studio della situazione, avvenuto attraverso diversi sopralluoghi, discussioni con i consulenti ed infine con le prove di laboratorio sopra descritte, ha potuto essere progettato lo schema del « trattamento intensivo » da applicarsi al tratto di prova in sito; si è deciso di consolidare una porzione

di galleria lunga 20 m a partire da un muro tampone in calcestruzzo costruito a progressiva 150, lato Sud della canna Reggio Calabria-Salerno. Come raggio di diffusione della miscela attorno ai fori si è fissato 1 metro e la zona da trattare è stata tenuta prudentemente abbastanza ampia: si è voluto infatti tener conto del fatto, già più sopra messo in evidenza, che in questo primo tratto il terreno da trattare aveva subito rimescolamenti a causa degli squilibri creati nelle alternanze argille-sabbie. Lo schema geometrico del trattamento è descritto sulla figura 3. È seguita la fase operativa d'iniezione. Le perforazioni sono state eseguite con due sonde a rotazione e la miscela di iniezione è stata introdotta nel terreno attraverso le aste stesse di perforazione. Dopo alcune prove iniziali si è stabilito di perforare il foro per tutta la sua lunghezza, facendo circolare acqua in piccole quantità; l'iniezione veniva quindi iniziata facendo retrocedere le aste e quantità prefissate di miscela erano introdotte nel terreno per tratti di 50 cm. Ultimata questa prima passata il foro veniva riperforato allo scopo di eseguire l'iniezione finale e raggiungere così il completo riempimento dei vuoti. Sono stati impiegati due tipi di miscele di iniezione:

- a) una miscela costituita da cemento e bentonite per la realizzazione di uno schermo che fosse in grado di impedire il refluo all'indietro della miscela al silicato, lungo il rivestimento della galleria;
- b) una miscela chimica a base di silicato di sodio ed acetato di etile, oltre a catalizzatori e ritardanti, per il trattamento vero e proprio delle sabbie.

Mentre la prima miscela è stata preparata in normali mescolatori, per la miscela al silicato si è fatto uso di uno speciale dosatore-mescolatore automatico avente lo scopo di assicurare dosaggi assolutamente precisi e produzioni notevoli. Il trattamento è risultato nel complesso buono malgrado la situazione anomala della zona interessata; le iniezioni sono sempre state eseguite a pressioni molto basse (3÷4 atmosfere) e gli assorbimenti sono stati controllati attentamente avendo cura di iniettare fori alterni per avere la possibilità di constatare il progressivo consolidamento del terreno nelle varie zone. Sono pure state registrate le venute d'acqua e di sabbia attraverso i fori che, abbondanti all'inizio del trattamento, si sono poi man mano esaurite. Durante il trattamento dei primi metri oltre il tampone di calcestruzzo ci si è resi conto delle difficoltà create dalla presenza di argilla negli strati di sabbia o viceversa. Tali difficoltà sono venute a cessare a 6÷7 metri dal fronte, dove la distinzione argilla-sabbia era più marcata. È stato possibile controllare direttamente l'efficacia del trattamento man mano che lo scavo della galleria procedeva. La sabbia è sempre apparsa ben consolidata (vedere la figura 4) e perfettamente intasate le numerose fratture degli strati d'argilla, che prima del trattamento costituivano facili vie di percolazione delle acque fra i vari banchi di sabbia. Lo scavo di tutto l'arco di calotta è stato eseguito molto facilmente dall'Impresa; nessuna infiltrazione d'acqua si è manifestata, ragione per la quale lo scavo previsto di 15 m è stato approfondito di 1 m (riducendo quindi di 1 m il tratto di franco di 5 m). Tutto ciò ha dimostrato che lo scopo di « congelare » l'equilibrio naturale del terreno sopra la galleria era stato conseguito.

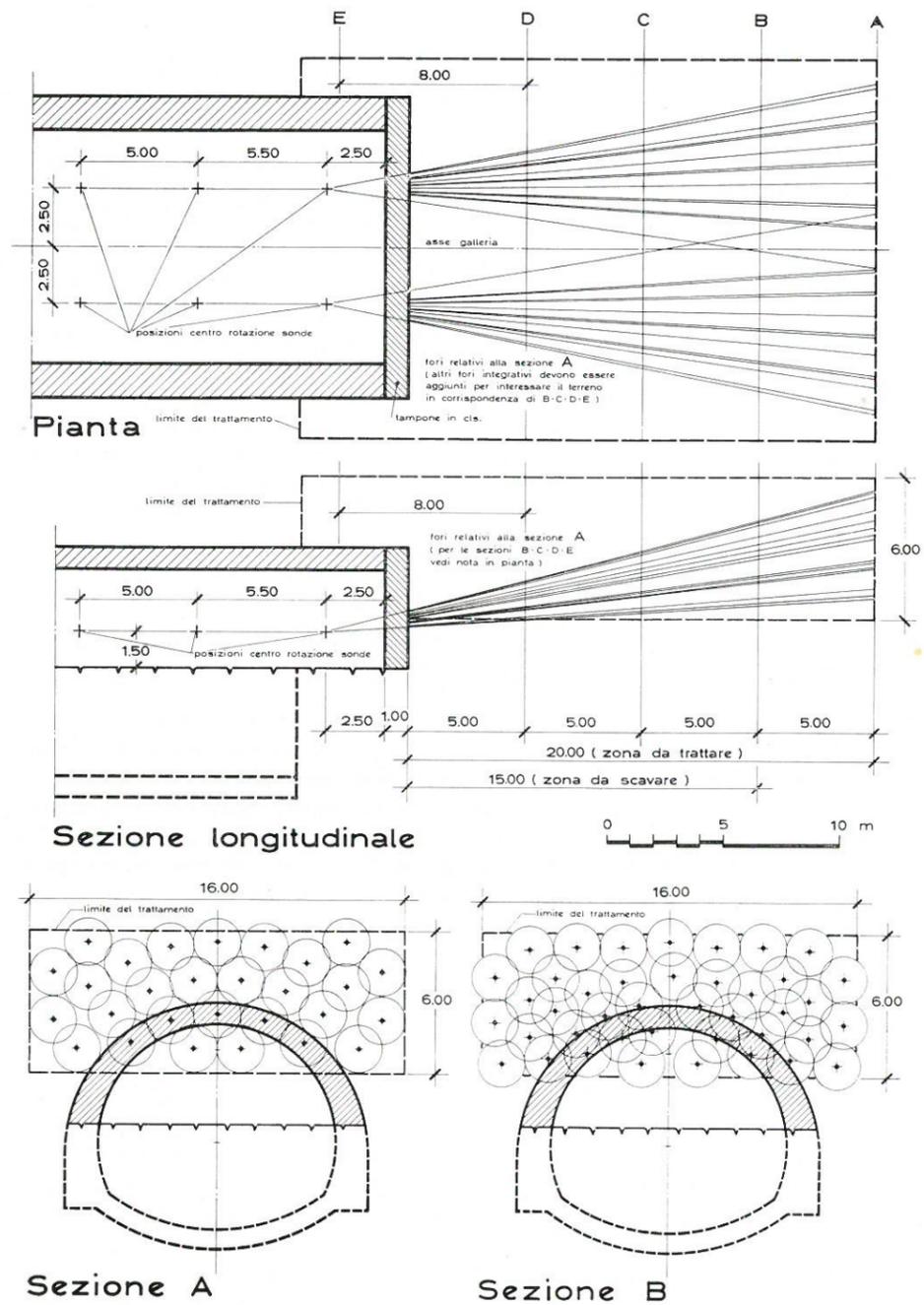


FIG. 3. - Galleria Serra dell'Ospedale. - Schema del trattamento « intensivo » applicato ai tratti iniziali dei quattro fronti d'avanzamento, arrestati a causa dei rifluimenti di sabbia ed acqua.



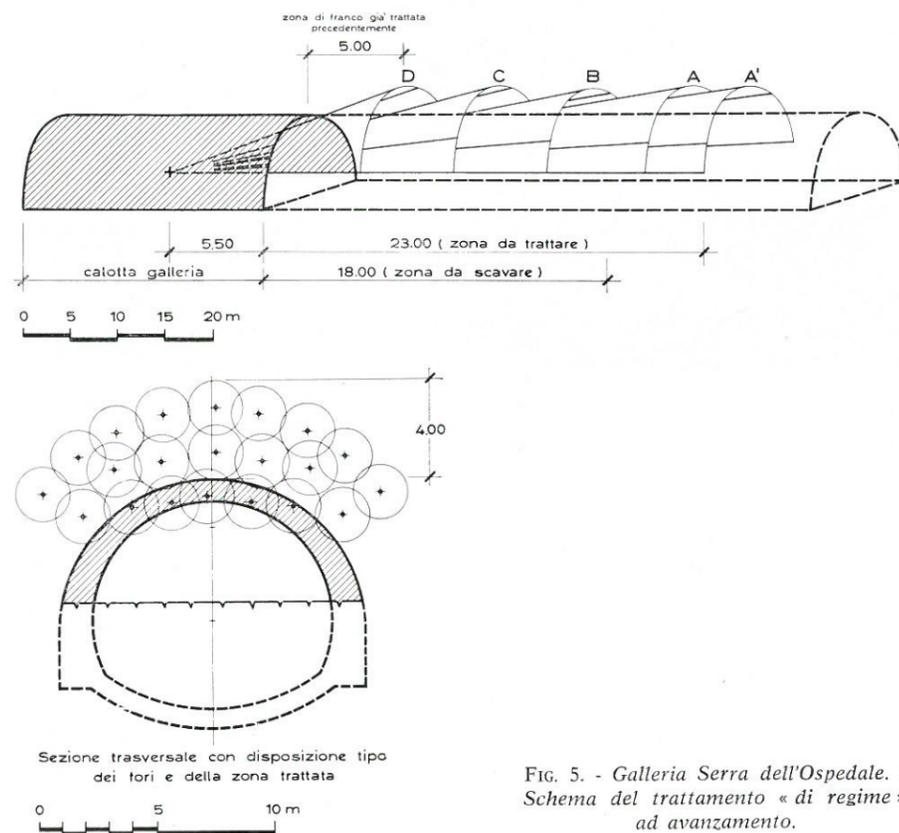
FIG. 4. - Galleria Serra dell'Ospedale. Sopra, il fronte d'avanzamento durante lo scavo del tratto di prova: al di sotto di uno strato d'argilla si nota della sabbia uniformemente consolidata. Sotto, un blocco di sabbia trattata con gel rigido di silice prelevato dal fronte di scavo.

TRATTAMENTO DI REGIME « AD AVANZAMENTO »

A seguito del buon esito del tratto di prova il lavoro è continuato sempre con l'applicazione di trattamenti particolari, prima nella zona sottostante il camino (canna Salerno-Reggio, imbocco Sud), poi all'imbocco Nord, canna Salerno-Reggio alla progressiva 160,5 ed all'altro imbocco Nord che nel frattempo aveva dovuto pure essere sospeso alla progressiva 241,5. Anche gli scavi di questi tronchi di galleria hanno potuto essere completati regolarmente: qualche venuta d'acqua si è manifestata senza tuttavia essere accompagnata da trasporto solido. L'esperienza acquisita durante i primi 4 tratti ha consentito di stendere il progetto definitivo del trattamento « di regime ». È stata introdotta qualche modifica rispetto allo schema di prova. La figura 5 mostra come la zona iniettata non sia più di forma rettangolare, bensì assuma l'aspetto simile ad un arco di spessore medio di 4 m

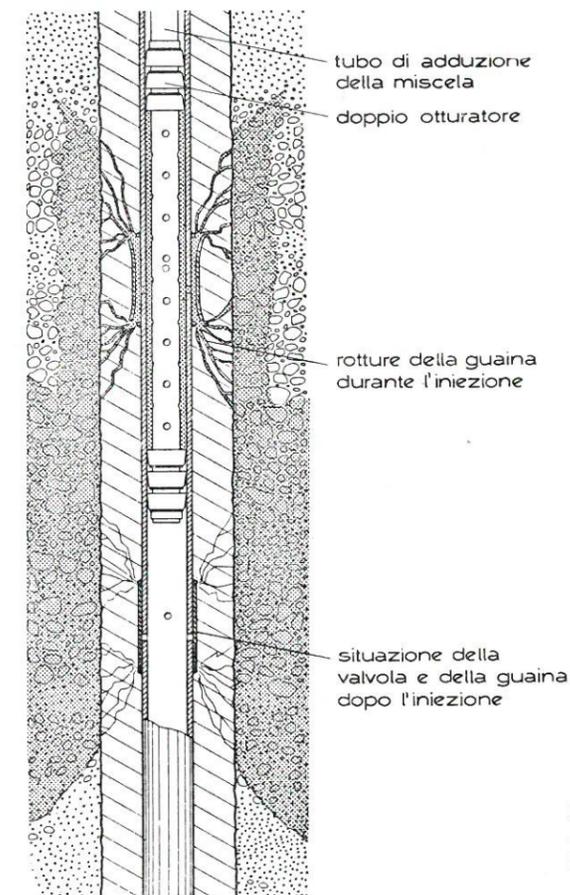
a partire dalla linea d'estradosso della costruenda calotta. La lunghezza del trattamento è stata portata a 23 m, dei quali 18 scavabili e 5 di franco. Con questo sistema chiamato « ad avanzamento » sono stati trattati 416 m di galleria ed un volume di terreno di 31.200 m³. Il gel di silice ha interessato un volume pari al 23% del terreno iniettato. Il tempo impiegato per completare un tratto di 18 m è stato in media di 35 giorni, pari a 0,5 metri di galleria al giorno. È necessario dire a questo punto che l'iniezione di tratti successivi di galleria con il metodo « ad avanzamento » ora descritto, pur risolvendo il problema tecnico dello scavo, presenta gli inconvenienti qui di seguito riportati:

1) tempi globali lunghi; il cantiere di scavo rimane ovviamente « in attesa » quando il lavoro d'iniezione è in corso. Anche avendo due gallerie vicine sulle quali operare con la stessa centrale d'iniezione, risulta praticamente impossibile regolare i lavori in modo da eguagliare il tempo occorrente per lo scavo di un tratto di una galleria ed il tempo necessario per il trattamento di iniezione relativo ad un tratto dell'altra galleria;



- 2) a causa della conicità delle varie raggere di fori l'incidenza della perforazione sul metro di galleria da trattare è superiore a quella che si avrebbe se fosse possibile realizzare un trattamento a fori paralleli fra loro;
- 3) il sistema d'iniezione attraverso le aste di perforazione non garantisce una distribuzione uniforme della miscela e non consente l'iniezione a volumi controllati: in altre parole, per ottenere un risultato sicuro è necessario abbondare con i quantitativi di gel di silice iniettati e generalmente superare il volume sufficiente per interessare le sabbie contenute nell'arco da consolidare;
- 4) necessità di costruire, all'inizio di ogni tratto, un muro « tampone » per il contenimento delle iniezioni e di eseguire iniezioni di intasamento a tergo del muro e della calotta.

Questi inconvenienti erano stati previsti fin dall'inizio dell'intervento; già da allora si era pensato di ovviare a quanto rilevato dal punto 3 con l'impiego di



canne a valvole, ossia con la messa in opera nei fori di tubazioni a perdere, costruite in modo da consentire iniezioni in ben determinati punti molto frequenti (3 per ogni metro lineare di foro) attraverso valvole di gomma appositamente studiate per eventuali riprese dell'iniezione, anche a distanza di tempo, oppure per inviare nello stesso punto miscele diverse. Con tale sistema risulta possibile graduare bene, in funzione del terreno da trattare, i quantitativi di miscela da iniettare, perchè si ha la certezza della distribuzione uniforme del volume inviato; nel caso della galleria di Serra dell'Ospedale l'accurata osservazione della pressione d'iniezione avrebbe inoltre potuto fornire utili notizie sul tipo di terreno interessato da una certa valvola e quindi provocare l'annullamento dell'iniezione nelle zone di argilla. Lo schema illustrato dalla figura 6 dà un'idea del funzionamento delle canne a valvola. Durante i primi mesi di lavoro al cantiere della galleria in oggetto venivano progettate e sperimentate delle canne a valvola in plastica, di prezzo ridotto rispetto a quelle metalliche fino ad allora utilizzate su altri cantieri. Queste canne, dopo un'ultima messa a punto in posto, sono state brevettate e sono diventate d'uso comune in tutte le situazioni analoghe, quando non è necessario sfruttare la resistenza meccanica intrinseca dei tubi metallici. Raggiunto l'obiettivo di contenere i quantitativi di miscela d'iniezione entro i minimi compatibili con la sicurezza dello scavo, si è pensato di ovviare agli altri inconvenienti sopra citati con l'adozione di schemi di trattamento completamente differenti da quello « ad avanzamento ».

TRATTAMENTO DALL'ESTERNO

Nel maggio del 1968 la direzione A.N.A.S. dell'autostrada Salerno-Reggio Calabria ha approvato l'esecuzione di un tratto di consolidamento eseguito a partire dall'alto della collina, trattamento chiamato « dall'esterno » iniziato nel mese di luglio. La sommità della collina dista 60÷70 m (con punte di 80 m) dagli assi delle gallerie.

Lo schema è descritto sulla figura 7. Sono qui mostrate le varianti via via adottate nel corso del lavoro: il progetto originale prevedeva l'esecuzione di file spaziate di 2 m l'una dall'altra, costituite da 9 fori distanti 2 m. I 4 fori laterali erano previsti più profondi in modo da proteggere la zona dei piedritti. Nel tratto di prova i fori sono stati ridotti ad 8 per fila e la zona iniettata interessava solamente un arco di 4 m circa di spessore all'estradosso della calotta. Durante lo scavo si è avuto modo di constatare:

- consolidamento molto buono ed uniforme del terreno sopra la calotta;
- nessuna sensibile deviazione delle perforazioni;
- rifluimenti di acqua e sabbia dal basso verso l'alto, sotto le imposte della calotta; fenomeni di non grande entità ma che hanno spesso rallentato il ritmo di scavo.

Si è allora deciso di reintervenire nella zona già trattata con due fori supplementari eseguiti ai due lati del trattamento ed approfonditi fino a coprire completamente i piedritti e di adottare poi definitivamente lo schema primitivo a 9 fori

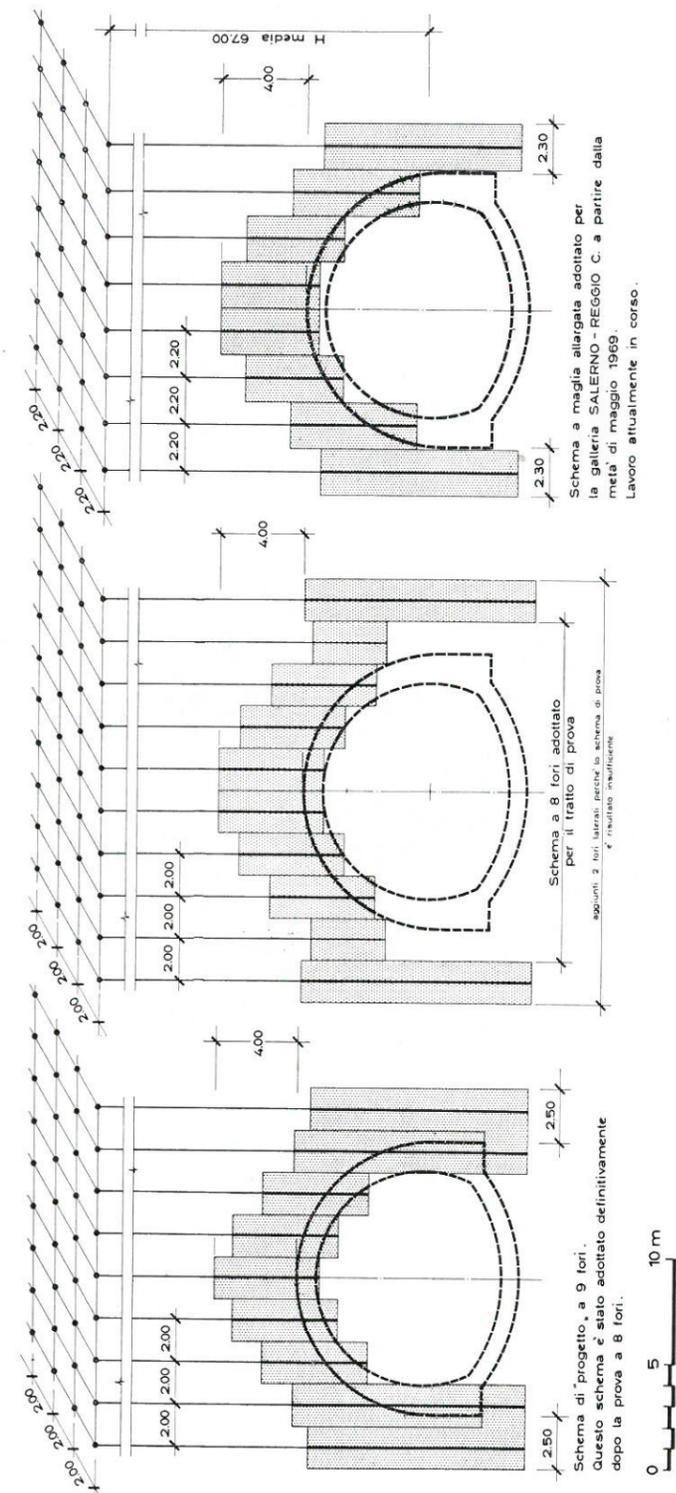


Fig. 7. - Galleria Serra dell'Ospedale. - Schemi del trattamento « dall'alto ».

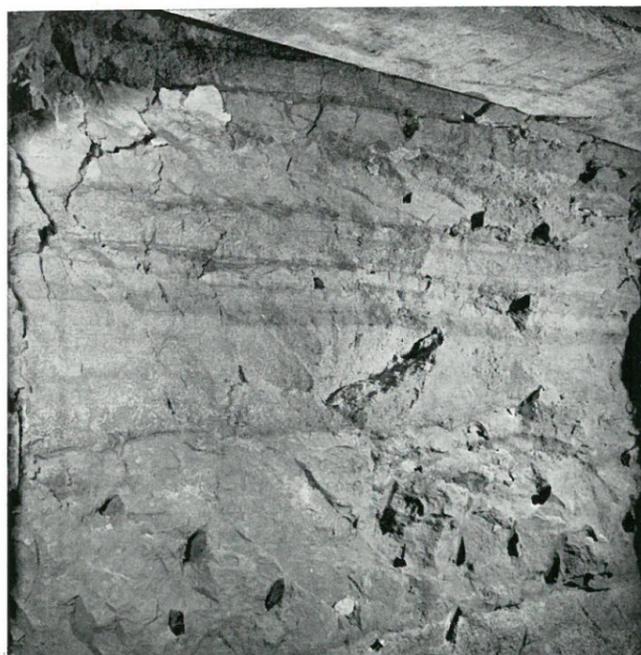


FIG. 8. - Galleria Serra dell'Ospedale: vista del fronte dello scavo in una zona trattata « dall'esterno ». Si notano vari strati di sabbia orizzontali molto ben consolidati.

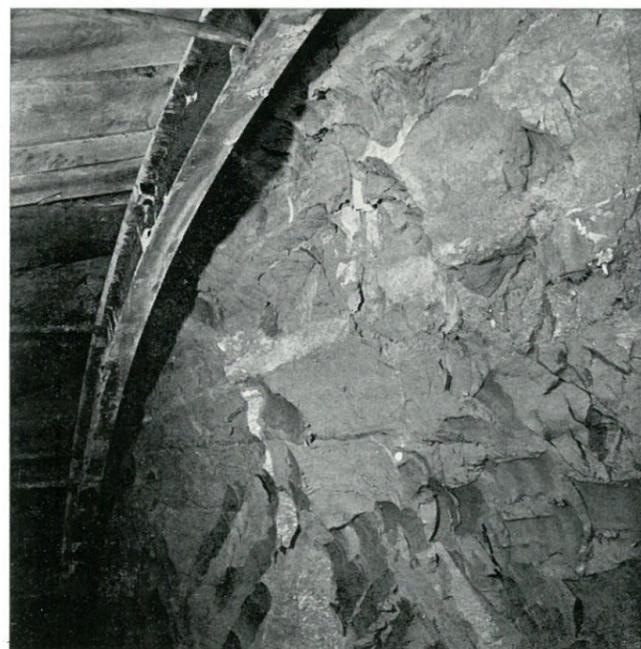


FIG. 9. - Galleria Serra dell'Ospedale: particolare del fronte di scavo. Le strisce scure sono le impronte degli utensili meccanici a lama utilizzati per lo scavo delle argille molto compatte. Per le sabbie trattate vengono invece impiegati martelli pneumatici.

previsti in sede di progetto. È stato così completato il trattamento della canna Reggio Calabria - Salerno. Lo scavo è stato eseguito sempre in terreno ben trattato; lo sfondamento dell'ultimo diaframma di terreno è avvenuto il giorno 26 aprile 1969. Sulle figure 8, 9 e 10 si può notare l'ottimo consolidamento degli strati di sabbia sul fronte d'avanzamento; in particolare si vede al limite dello scavo, all'estradosso di calotta, l'ultima parte di una canna a valvole. Con identico schema è stata interessata la zona di scavo della bretella trasversale fra le due gallerie ed una parte della canna Salerno-Reggio. Sulla canna Salerno-Reggio Calabria, a partire dalla metà di maggio 1969, è stato definitivamente adottato lo schema a 8 fori distanziati di 2,20 m: il diradamento dei fori e delle file è stato

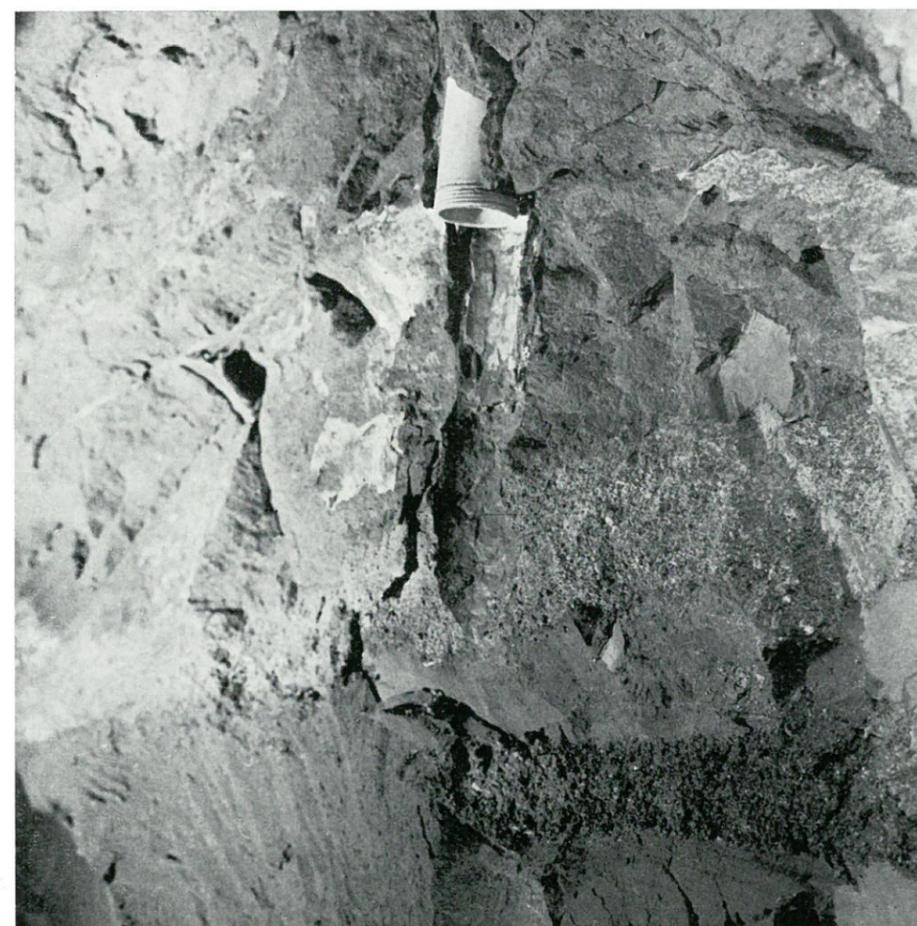


FIG. 10. - Galleria Serra dell'Ospedale: trattamento « dall'esterno ». Qui si vede all'avanzamento dello scavo in galleria un tratto di canna a valvole, la miscela di « guaina » e strati di sabbia grossolana consolidata dal gel di silice.

consentito dalle migliorate condizioni di iniettabilità dovute al fatto che il regime idrogeologico della zona non era stato per nulla turbato. Fino ad oggi (30-VI-1969) i dati consuntivi del trattamento dall'esterno sono i seguenti: i metri di galleria trattati sono stati 275 ed il volume di terreno interessato dalle iniezioni pari a 38.770 m³. Il gel di silice ha riempito il 21,7% del terreno iniettato. Il tempo impiegato per l'esecuzione dello scavo relativo è stato di 10 mesi, cioè la velocità di scavo è aumentata dai 12,5 m/mese del trattamento « ad avanzamento » ai 27,5 m/mese.

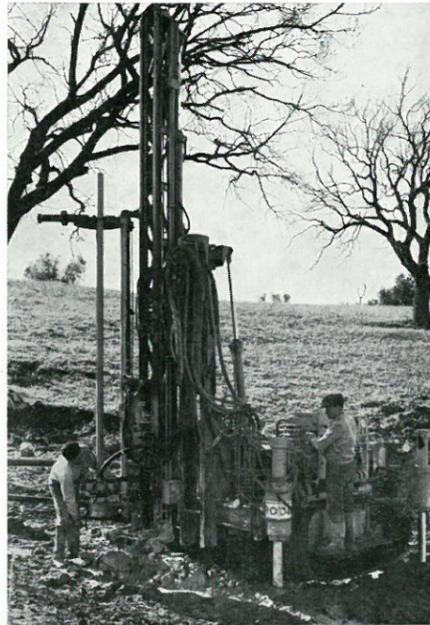


FIG. 11. - Galleria Serra dell'Ospedale. - Tipo di perforatrice a rotazione utilizzata per la posa delle canne a valvole del trattamento dall'esterno. La produzione media di queste macchine è stata di 200 m di perforazione al giorno.



FIG. 12. - Galleria Serra dell'Ospedale: vista della sommità della collina sopra la canna Reggio Calabria-Salerno. Si notano le file di canne a valvola per l'iniezione già installate.

Queste cifre dimostrano la validità dell'ultimo schema adottato. Il cantiere di scavo sta ora avanzando con punte di 10÷12 m alla settimana. Le perforazioni sono state eseguite a circolazione di fango betonitico per mezzo di grosse macchine a rotazione (figura 11); le figure 12 e 13 forniscono visioni parziali del cantiere

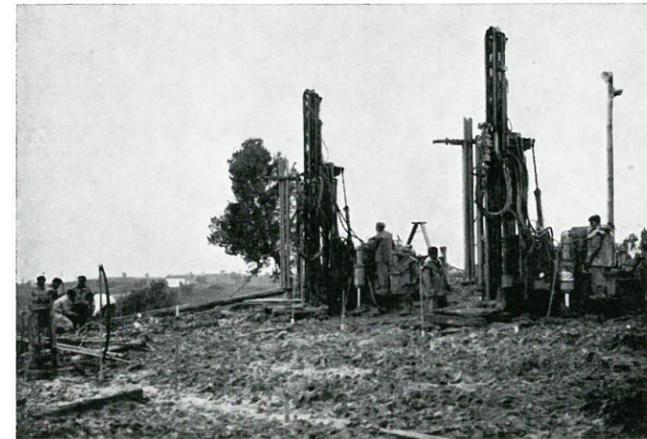


FIG. 13. - Galleria Serra dell'Ospedale: scorcio parziale del cantiere « dall'esterno ». Si notano due attrezzature in perforazione e sulla sinistra alcuni fori in fase d'iniezione; si vede anche l'estrattore automatico per la manovra rapida degli otturatori d'iniezione lungo le canne a valvole.

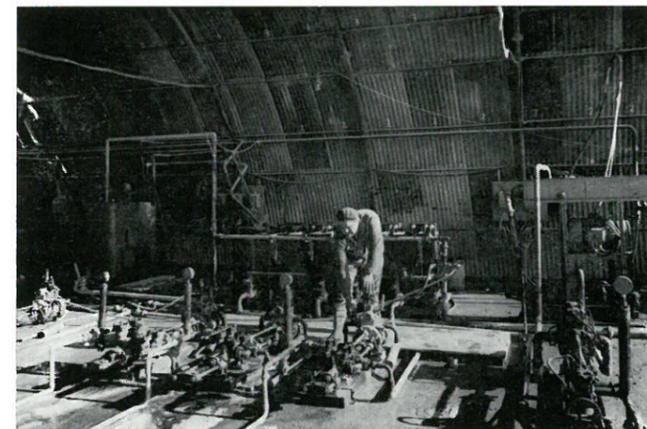


FIG. 14. - Galleria Serra dell'Ospedale - Vista parziale della centrale per la confezione e pompaggio delle miscele d'iniezione e dei fanghi di perforazione.

sulla sommità della collina. Per la confezione ed il pompaggio delle miscele chimiche è stata allestita una centrale con mescolatori-dosatori completamente automatizzati (figura 14); la manovra dei doppi otturatori entro le canne a valvole è resa più agevole e veloce per mezzo di sollevatori idraulici (figura 13 a sinistra).

TRATTAMENTO LATERALE

In un primo tempo si era pensato di eseguire il trattamento di consolidamento della parte rimanente della canna Salerno-Reggio facendo partire delle perforazioni

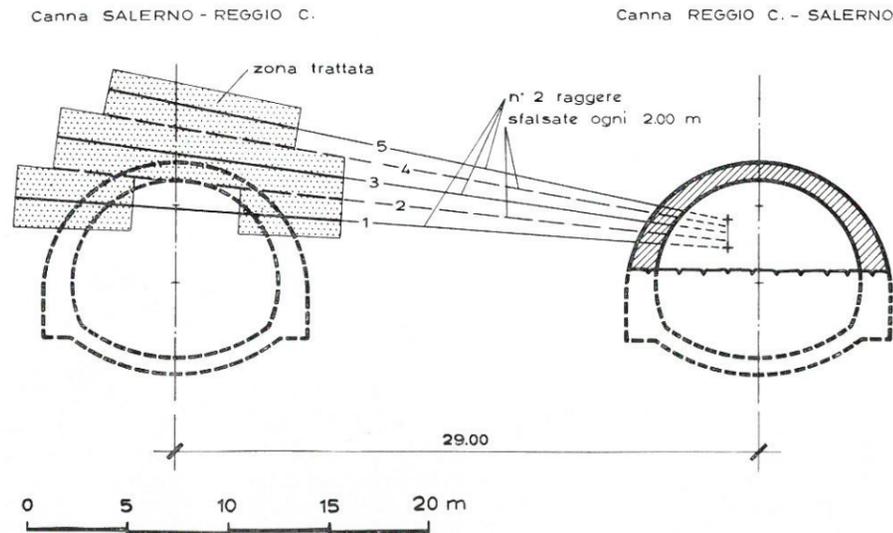


FIG. 15. - Galleria Serra dell'Ospedale - Schema del trattamento « laterale ». Prova eseguita su un tratto di 10 m.

suborizzontali dalla galleria vicina ormai terminata (perlomeno come rivestimento di calotta). Al fine di sperimentare il sistema nel suo insieme ed in particolare la tecnologia delle perforazioni, è stata eseguita una prova con la quale si è consolidato il tratto tra le progressive 132 e 142 della canna in oggetto. Lo schema adottato è illustrato nella figura 15. I risultati sono stati positivi. Il terreno all'atto dello scavo è apparso ben trattato; si è inoltre potuto constatare che le deviazioni dei fori sono state trascurabili. L'assorbimento del gel è stato di 12 m^3 per m di galleria, pari al 16 % del volume del terreno trattato. Al momento dell'ultimazione dello scavo della calotta della galleria Reggio-Salerno la direzione ANAS ha deciso di dar corso immediato al completamento di quella via per potere disporre al più presto di una corsia a doppio senso per il traffico.

LAVORAZIONI IN CORSO

a) Galleria Salerno-Reggio

Il trattamento dall'alto completerà il consolidamento della parte ancora da scavare di questa via, per un totale di 165 m. Constatata la buona diffusione nelle sabbie della miscela chimica, l'interasse tra i fori e le file è stato portato a 2,20 m (vedere la figura 7). Il termine di questa lavorazione è previsto per la fine di ottobre del 1969.

b) Ripristino delle parti di galleria dissestate

Nel capitolo « Scopie delle iniezioni » si era già accennato al problema del mantenimento nel tempo dell'equilibrio naturale del terreno nell'intorno della galleria



FIG. 16. - Galleria Serra dell'Ospedale - Canna Salerno-Reggio, imbocco Nord. Opere di puntellamento della calotta a seguito dei gravi dissesti del calcestruzzo avvenuti nel tratto iniziale scavato senza il preventivo trattamento d'iniezione. Il terreno è rifluito al piede delle imposte.

ed al consolidamento con iniezioni quale mezzo preventivo per impedire una distribuzione asimmetrica dei carichi sulla volta della calotta ed un eccessivo carico alle imposte della calotta stessa. Gli importanti dissesti intervenuti nel rivestimento delle due gallerie a partire dagli imbocchi Nord lungo tutti i tratti che erano stati scavati senza preventivo trattamento di consolidamento stanno a dimostrare l'importanza del fenomeno di rilassamento nel tempo di questo tipo di formazione, l'entità delle forze in gioco ed il ruolo importante assunto dal trattamento di iniezione quale riequilibratore della decompressione progressiva provocata dalla presenza dello scavo. Le figure 16, 17, 18 e 19 sono efficaci immagini di quanto è avvenuto lungo i tratti sopra citati (rottura del calcestruzzo, rifluimenti del terreno in platea). Al primo manifestarsi di questi fenomeni l'Impresa ha tentato di provvedere immediatamente all'esecuzione a campioni dei piedritti ed alla chiusura con l'arco rovescio, ma tale lavoro ha dovuto essere in più parti sospeso a causa del rapido progredire del dissesto. Si è dovuto invece ricorrere all'esecuzione di robuste opere di puntellamento della calotta con legname, centine metalliche e reti.

Non semplice si presenta ora l'intervento con iniezioni per consentire il ripristino, qualche volta il completo rifacimento, della calotta e per conferire al terreno un grado di stabilità tale da potere poi rendere possibile l'esecuzione di

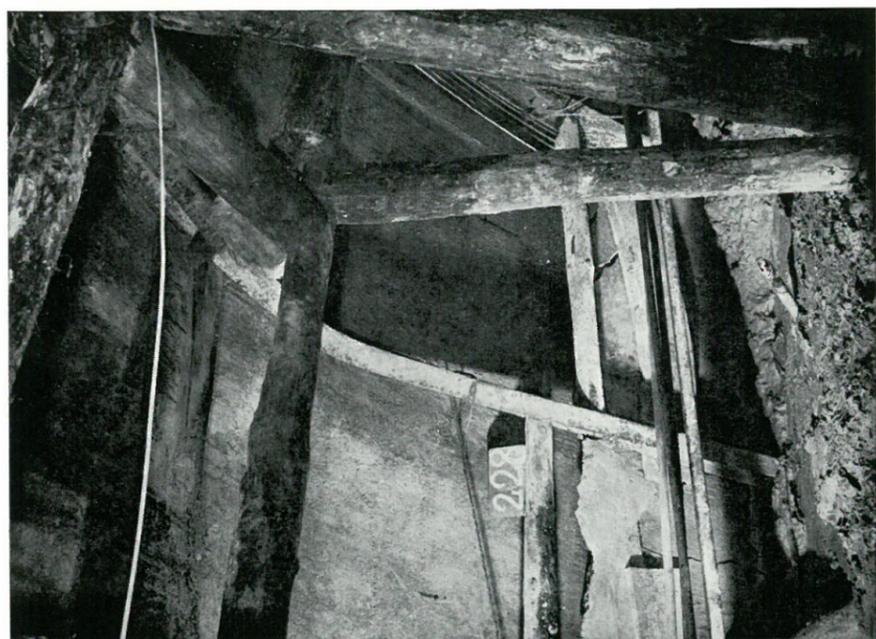
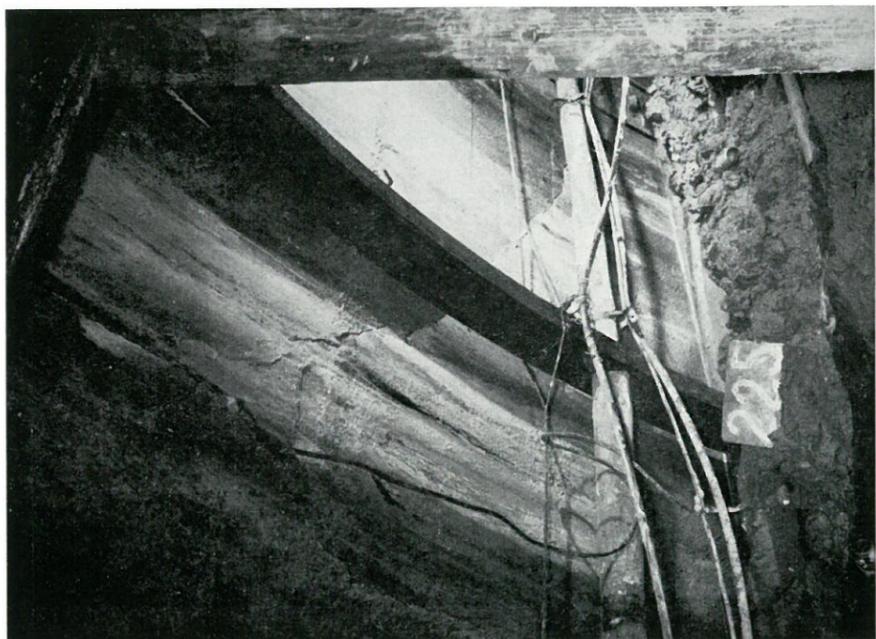


FIG. 17-18. - Galleria Serra dell'Ospedale - Particolari del dissesto dell'arco di calotta; si notano le rotture all'imposta ed anche le distorsioni delle centine di rinforzo provvisorio.

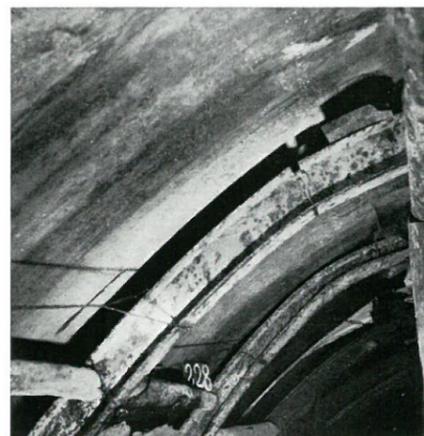


FIG. 19. - Galleria Serra dell'Ospedale - Particolare di una centina rotta a causa degli sforzi trasmessi dal rivestimento della calotta.

pedritti ed arco rovescio in condizioni di sicurezza. È necessario costituire una zona consolidata all'estradosso della calotta e dei piedritti che prenda su di sé tutti i carichi ora trasmessi al calcestruzzo. Tutte le fessure del calcestruzzo devono essere sigillate perchè la miscela non ne fuoriesca, le pressioni d'iniezione devono essere contenute entro limiti bassissimi, continui controlli dei cedimenti devono essere fatti per la sicurezza degli operatori. Dopo varie prove è stato adottato lo schema esposto nella figura 20. Ad oggi è praticamente ultimato il trattamento d'iniezioni attorno a tutta la parte lesionata della galleria Reggio-Salerno (245 m circa). La figura 21 mostra come i cedimenti di questa parte di galleria si siano ridotti dopo il consolidamento. Il solo punto 4, posto in una zona non trattata sui

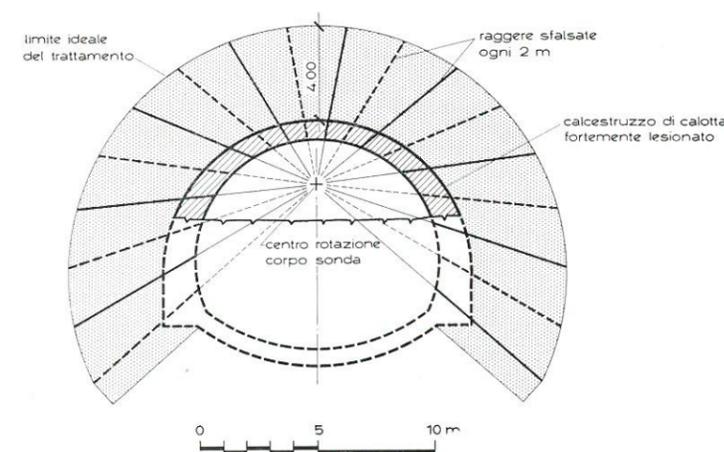


FIG. 20. - Galleria Serra dell'Ospedale - Schema delle iniezioni di ripristino attuate nelle zone di calotta lesionata (imbocchi Nord nei tratti scavati senza trattamento preventivo d'iniezioni).

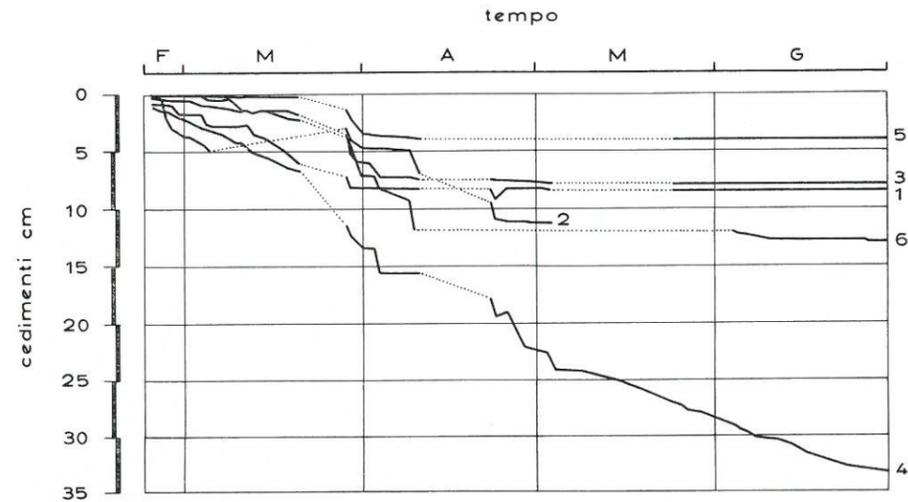


Fig. 21. - Galleria Serra dell'Ospedale - Diagrammi dei cedimenti registrati in sei punti del tratto lesionato della canna Reggio Calabria-Salerno, presso l'imbocco Nord.

piedritti, si muove ancora. Le posizioni dei punti di rilevamento dei cedimenti sono visibili in figura 22, dove sono stati riassunti in modo schematico i vari interventi eseguiti finora e la attuale situazione delle due gallerie (al 6-VI-1969).

GALLERIA CISTERNA - linea ferroviaria Battipaglia-Reggio Calabria nel tratto in variante tra le stazioni di Eccellente e Rosarno - Ente Appaltante: Ferrovie dello Stato - Impresa Generale: Montecatini Edison S.p.A., Milano - Località: Rosarno (Reggio Calabria).

La stratigrafia del terreno in corrispondenza delle progressive interessate dal trattamento è illustrata in figura 23. I rilasci del terreno ed i conseguenti sfornellamenti delle sabbie sature d'acqua arrestarono l'avanzamento dello scavo e produssero in seno alla formazione sabbiosa una grande cavità avente per tetto la formazione di argillite; questo strato di notevole compattezza impedì il propagarsi della voragine fino in superficie. Il primo provvedimento di pronto intervento messo in atto dall'Impresa Generale (dopo la costruzione di una tamponatura in galleria al limite del terreno franato, figura 26) fu quello di aprire un pozzo dal piano campagna fino alla cavità colma di acqua fangosa del volume di svariate centinaia di m³, rendendo in tal modo possibile riempirla con l'introduzione di calcestruzzo magro che valse a scongiurare l'estensione verso l'alto del dissesto. La ricompattazione del terreno interessato dal grande fornello ed il consolidamento dello strato sabbioso della zona disturbata ed oltre furono conseguiti mediante due trattamenti: il primo dal fronte di scavo ed il secondo dal piano campagna. Per le iniezioni furono impiegate sia miscela a base di argilla-cemento, sia gel rigido di silice. Le figure 23 e 24 mostrano la situazione del dissesto e gli schemi adottati;

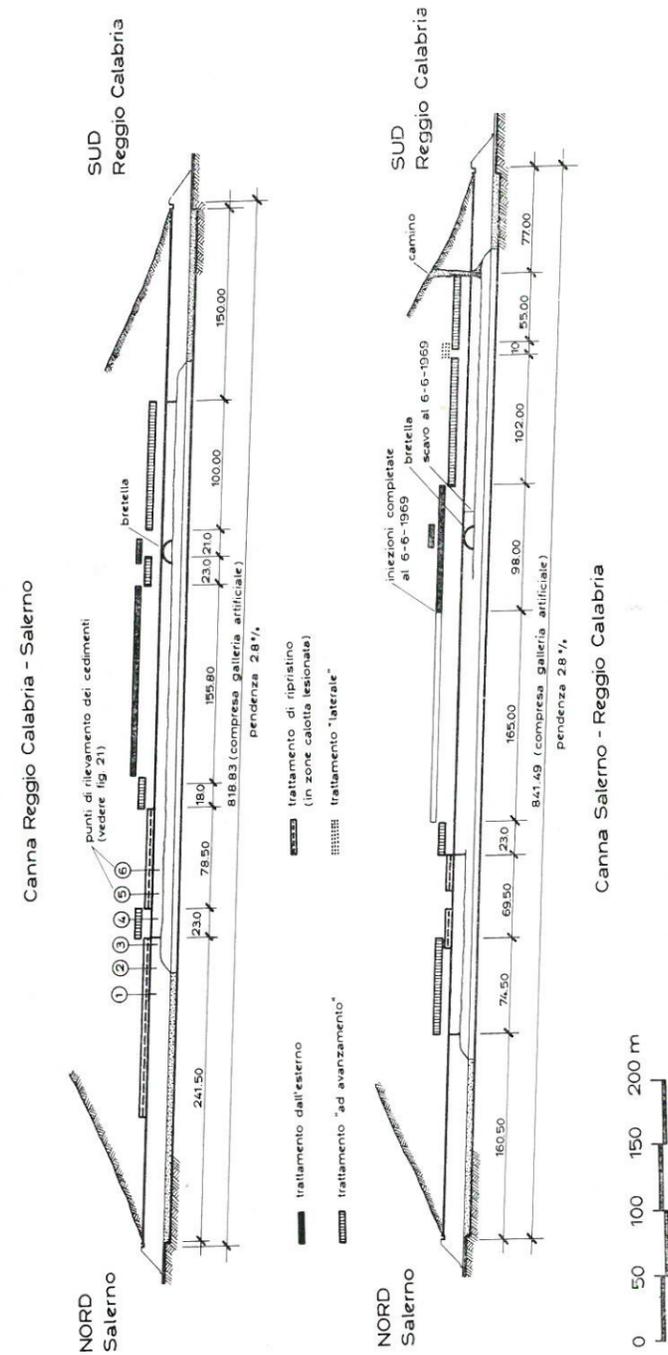


Fig. 22. - Galleria Serra dell'Ospedale - Rappresentazione schematica dei vari trattamenti d'iniezione eseguiti e della situazione degli scavi al 6 giugno 1969.

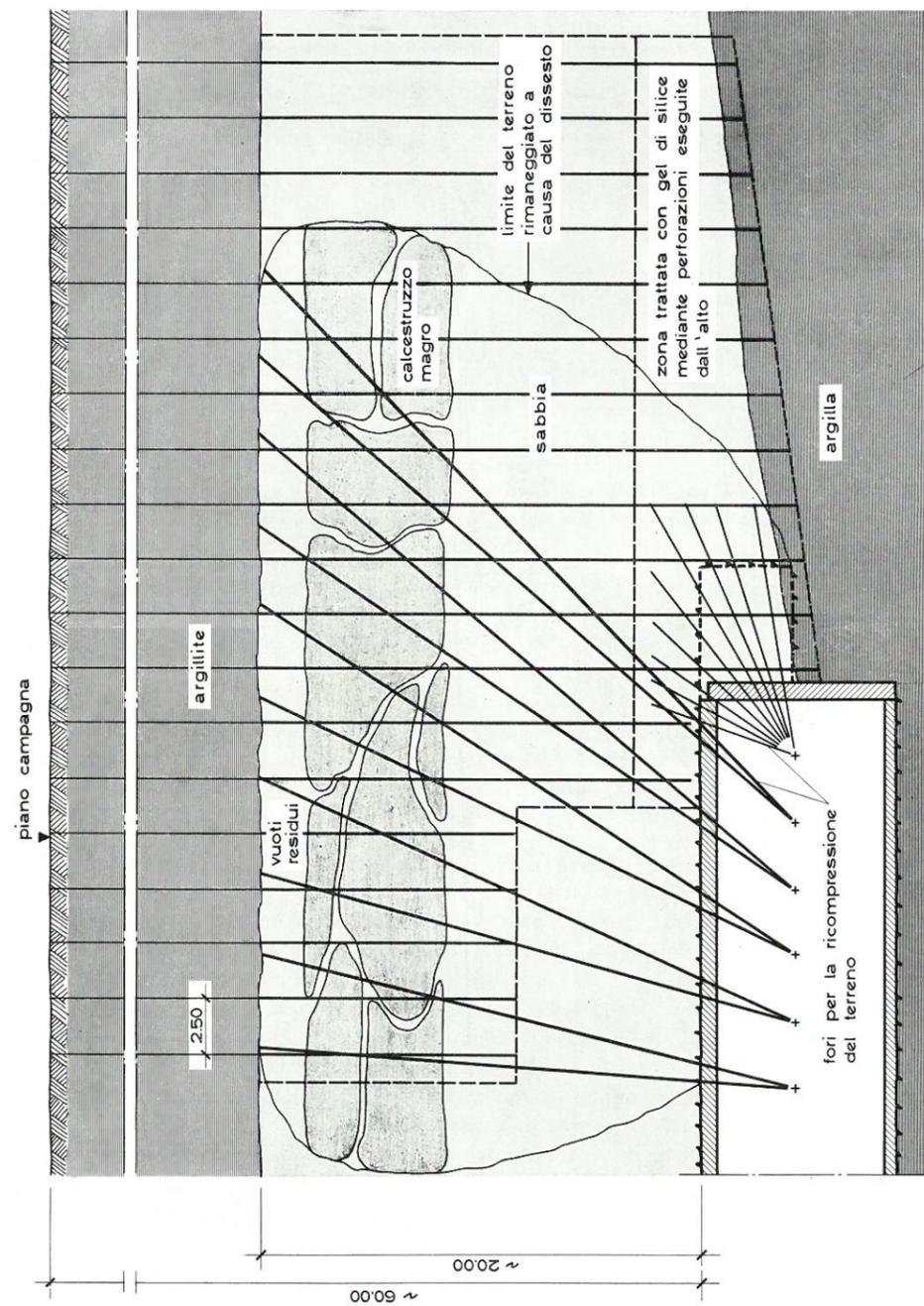


Fig. 23. - Galleria Cisterna - Rappresentazione di terreni e della situazione originata dal dissesto. Schema dei trattamenti di intasamento, di ricompressione e consolidamento.

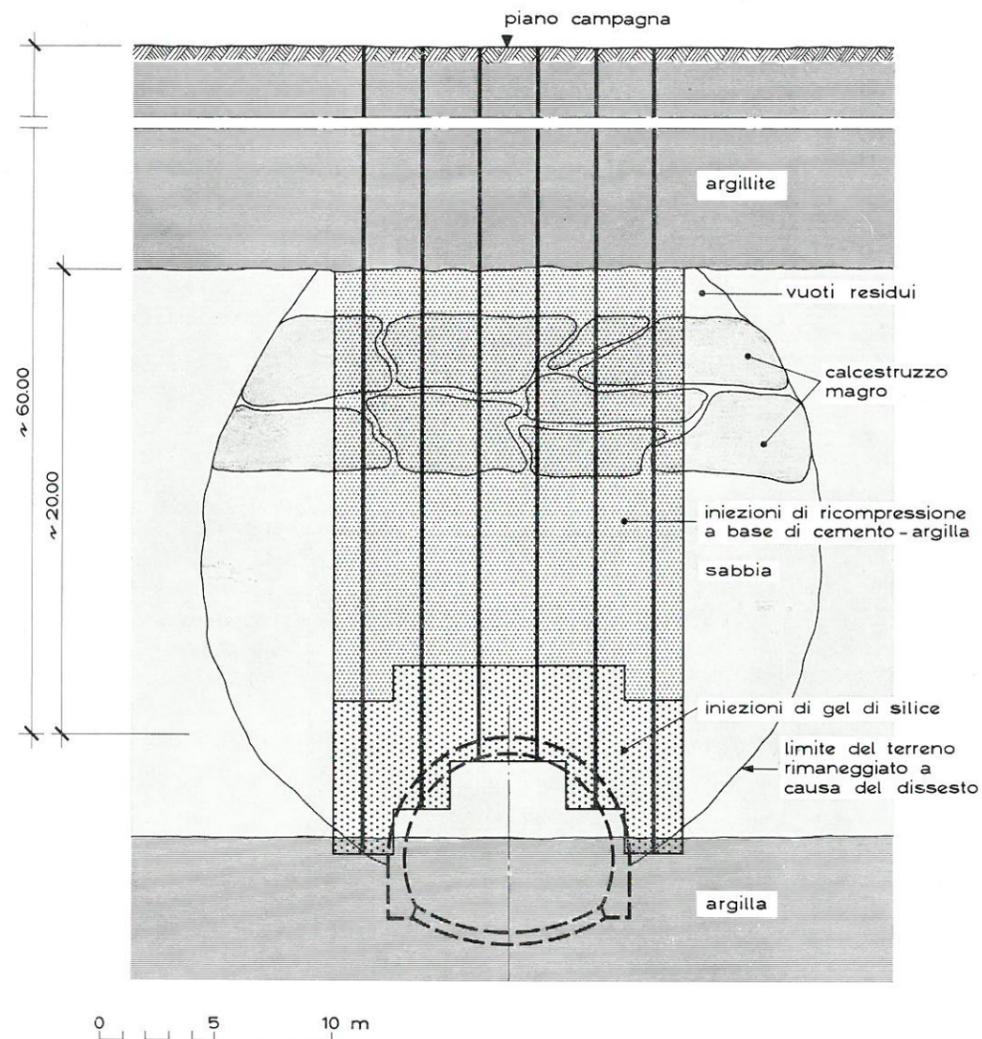


Fig. 24. - Galleria Cisterna - Particolare del trattamento di intasamento e consolidamento eseguito con perforazioni dall'esterno.

la figura 25 fornisce gli elementi granulometrici della formazione sabbiosa. Alle iniezioni di miscele cementizie fu affidato il compito di riempire le fessure beanti e le cavità non raggiunte dal getto di calcestruzzo magro e di ricomprimere infine il terreno allentato; le iniezioni di gel di silice provvidero a trasformare le formazioni sabbiose pregne d'acqua in un banco consistente, simile ad una arenaria impermeabile (vedere figura 27). Per le iniezioni praticate dall'interno della galleria, eseguite

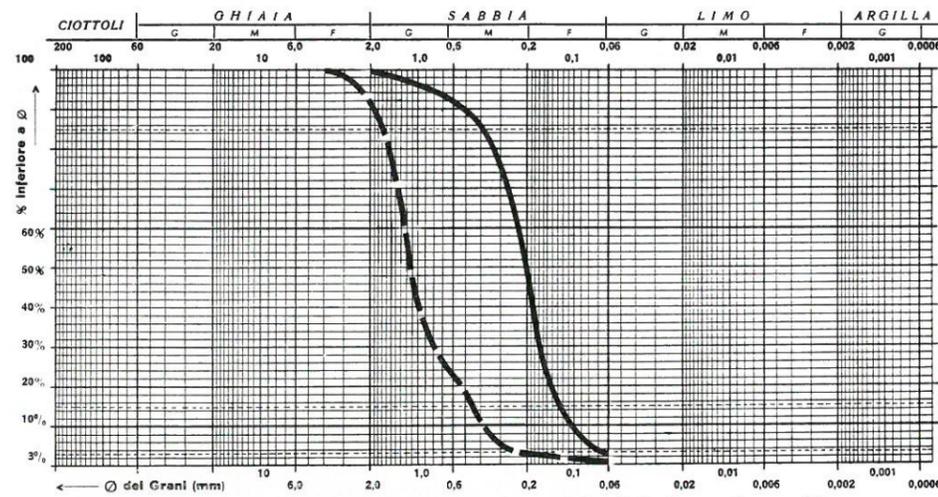


FIG. 25. - Galleria Cisterna - Curve granulometriche della formazione sabbiosa.

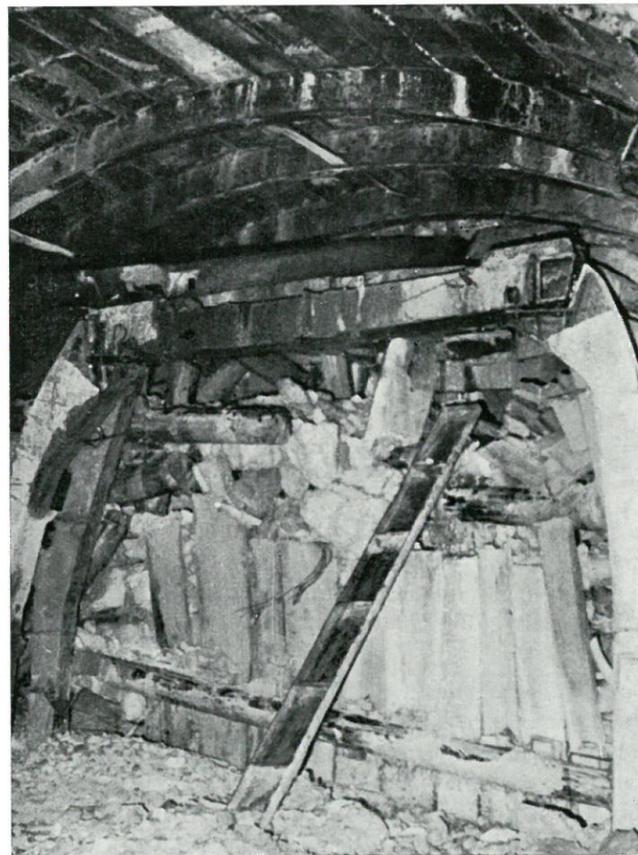


FIG. 26. - Galleria Cisterna - Brandaggio del fronte al limite del terreno franato, subito dopo il dissesto.



FIG. 27. - Galleria Cisterna - Vista parziale del fronte di scavo dopo il trattamento. Le sabbie consolidate hanno assunto l'aspetto di una vera e propria arenaria; si nota a sinistra la parte bassa di una canna a valvole. È stato possibile mantenere il fronte verticale senza armature.

con miscele cemento-argilla, non si ritenne necessario ricorrere all'impiego dei tubi a valvole; essi furono invece adottati per il trattamento dall'alto nel corso del quale furono iniettate, attraverso gli stessi tubi, sia miscele cementizie che gel di silice. Abbattuto il muro tampone provvisorio, l'avanzamento fu ripreso senza difficoltà e lo scavo procedette normalmente dopo avere facilmente superato la zona incriminata.

GALLERIA SAN GIORGIO - rettifica del tracciato della linea ferroviaria Salerno-Reggio Calabria; nuova galleria a doppio binario - Ente Appaltante: Ferrovie dello Stato - Impresa Generale: Sogene S.p.A. - Località: S. Nicola Arcella (Cosenza).

— Natura dei terreni attorno alla galleria: formazioni in facies di flysch, costituite da fitte alternanze di argilloscisti fratturati e calcari da marnosi molto fratturati a quasi cristallini. In figura 28 sono riportati i campi granulometrici dei materiali detritici. Il terreno allo stato naturale non sarebbe iniettabile se non con resine fluidissime e costose.

— Problema da affrontare: all'avanzamento (imbocco Nord), in corrispondenza di una incisione chiamata Valle Profonda, si è avuto un copioso rifluimento di materiale sciolto misto ad acqua che ha costretto a sospendere i lavori di scavo.

— Soluzione attuata:

1) perforazione e relativa iniezione « ad avanzamento » (miscele cemento-bentonite) per ottenere la ricompressione ed un consolidamento primario del terreno nelle zone più intensamente disturbate dai rifluimenti;

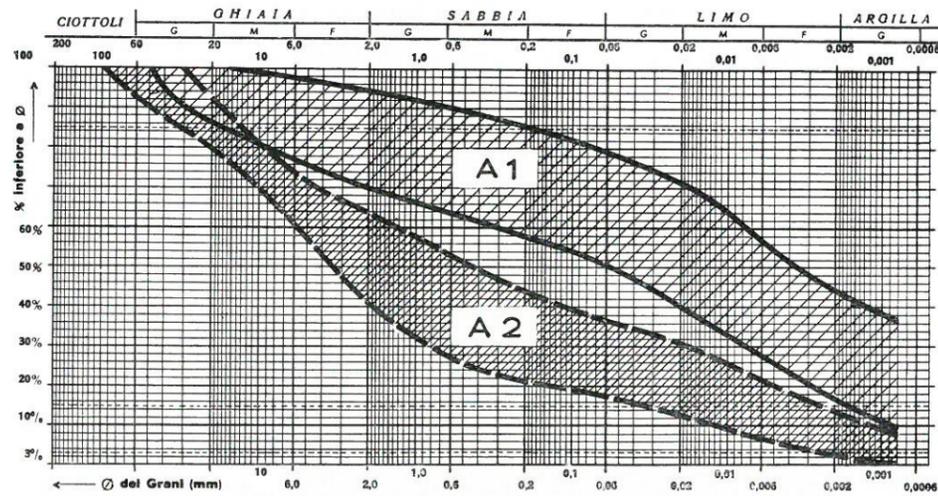


FIG. 28. - Galleria S. Giorgio - Campi granulometrici dei materiali detritici. Nella categoria A_1 si va dall'argilla limosa poco sabbiosa al limo argilloso con ghiaia e sabbia, nel gruppo A_2 sono compresi materiali costituiti in prevalenza da ghiaia e sabbia, con frazioni limo argillose dal 17 al 36%.

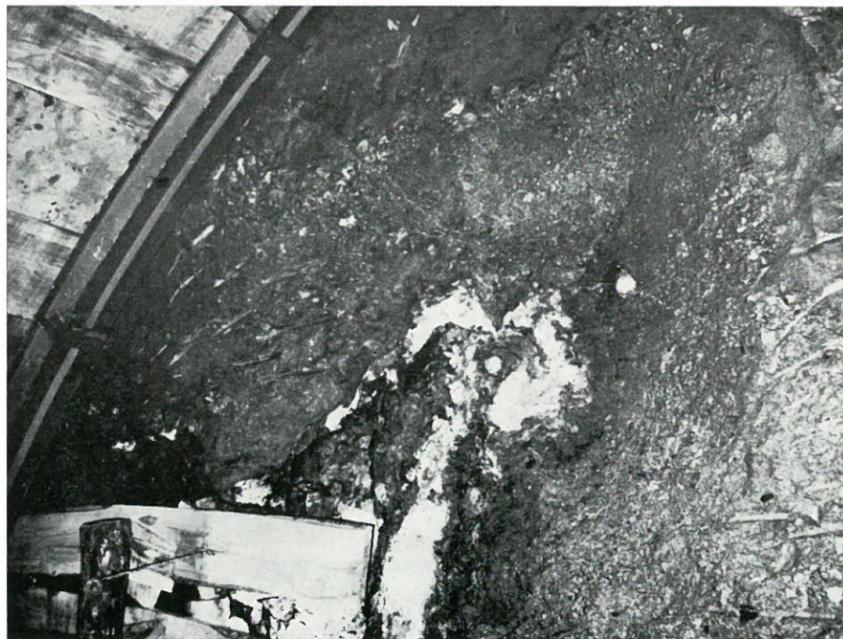


FIG. 29. - Galleria S. Giorgio - Terreno sul fronte di scavo; si distinguono bene due fori di iniezione e l'effetto dell'iniezione stessa, attorno ad uno di essi.

2) perforazione e posa in opera di canne a valvola lungo un tratto di 15 m oltre il muro tampone; iniezione ad alta pressione di miscele cementizie (tecnica del « claquage » adottata a causa della natura del terreno) seguita da un « finissaggio » con gel di silice. Per l'esecuzione del lavoro è stata usata un'unica grossa perforatrice a rotazione.



FIG. 30. - Galleria San Giorgio - Claquages nel terreno di miscela ternaria.

— Risultato ottenuto: al termine del trattamento lo scavo ha potuto procedere bene e con estrema sicurezza superare la zona del dissesto. Sulla figura 29 si ha una visione parziale del fronte della galleria durante lo scavo in corrispondenza di due tubi a valvola; si può notare come l'effetto macroscopico dell'iniezione attraverso il foro di sinistra, con la compattazione del terreno circostante, abbia localmente ridotto il contributo del foro di destra. La figura 30 mostra dei claquages di miscela ternaria e la deformazione subita da un foro a causa delle alte pressioni adottate.

GALLERIA CROCETTA - nuova superstrada di raccordo tra Paola e lo svincolo di Cosenza dell'autostrada Salerno-Reggio Calabria - lotto II - Ente Appaltante: ANAS - Impresa Generale: Fincosit (ex Salci) - Località: S. Fili (Cosenza).

— Natura dei terreni attorno alla galleria: 1) gneiss, 2) rocce scistose metamorfiche, 3) argille, limi e sabbie, trasgressive sulla formazione 2.

— Problema da affrontare: lo scavo della galleria Crocetta attraversando il contatto tra i terreni 2 e 3 ha provocato uno sfornellamento con formazione di un vero e proprio camino, riempitosi poi parzialmente per ulteriore franamento delle formazioni superficiali. Grande quantità di materiale ed acqua ha invaso la galleria.

— Soluzione attuata:

a) riempimento dall'alto dell'inghiottitoio (camino) mediante toutvenant grossolano e successiva cementazione di quest'ultimo con iniezioni;

- b) perforazione e posa in opera di canne a valvola metalliche e quindi iniezioni ternarie e chimiche. Scopo delle canne metalliche, oltre all'ottenimento di un normale buon consolidamento, è stato quello di « spinare » il terreno consolidato alla roccia sana lungo la probabile superficie di frana;
- c) esecuzione di fori di controllo del trattamento, anch'essi poi iniettati per assolvere alle stesse funzioni dei fori del punto b);
- d) posa di tubi drenanti per la captazione delle acque al contatto tra i terreni 2 e 3, al di sopra della zona intensamente trattata.

— Risultato ottenuto: lo scavo, abbattuto il solito tampone provvisorio di contenimento della frana, ha potuto superare normalmente la zona instabile ed entrare nella formazione 1 di gneiss più sani.

La figura 31 riporta lo schema dei trattamenti eseguiti e dei terreni interessati dal movimento franoso.

GALLERIA MADONNA DEL POGGIOLO - autostrada Sestri Levante-Livorno - tronco 1 - lotto 10 - Ente Appaltante: S.A.L.T. (Società Autostrada Ligure Toscana) - Impresa Generale: S.A.S. (Società Autostrade Strade), Roma - Località: Borghetto Vara (La Spezia).

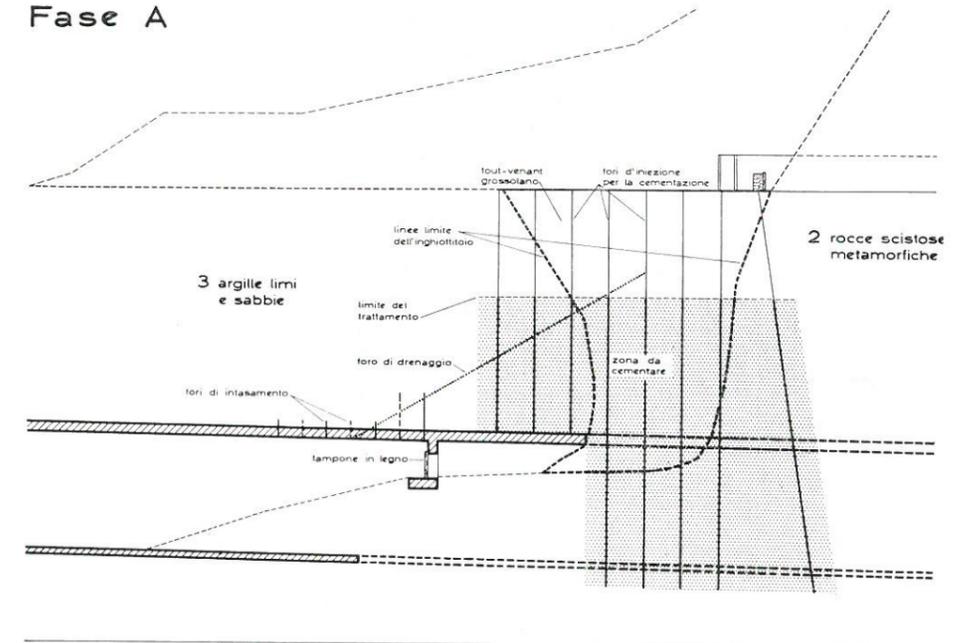
— Natura del terreno interessato dalla galleria nella zona del dissesto: arenaria fessurata, molto alterata e decomposta, con passaggi argillosi e fini fessure colme di sabbia silicea. Notevole quantità d'acqua percola attraverso le vie di materiale più permeabile.

— Problema da affrontare: durante il getto dell'arco di calotta, una quarantina di metri prima dello sbocco della galleria dal lato di Sestri Levante (canna Livorno-Sestri), si formava un rilascio dell'arenaria seguito da sfornellamento di materiale e forti venute d'acqua. L'Impresa riusciva poi a superare la zona critica e ultimare il getto di tutta la calotta antistante.

Il flusso dell'acqua attraverso le vie di rottura createsi ed i materiali degli strati più incoerenti dell'arenaria non poteva essere arrestato nella zona dell'incidente, che era stata sostenuta in modo provvisorio con puntellature e pannelli metallici; in breve lasso di tempo, con fenomeno progressivo a partire dal fornello, il rilascio del terreno dovuto al rammollimento delle frazioni argillose del terreno a causa dell'acqua si estendeva dalle due parti. Ne conseguiva il cedimento della superficie di appoggio delle imposte per la rottura e deformazione del terreno di fondazione raggiunto dalle acque filtranti e sottoposto a carichi sempre più elevati; quindi il dissesto della struttura di rivestimento con formazione di gravi lesioni e qualche volta di veri e propri distacchi di placche di calcestruzzo. Il tratto lesionato di lunghezza 55 m a partire dall'imbocco lato Sestri veniva allora puntellato con armature in legname e centine metalliche. La figura 32 mostra appunto i rinforzi provvisori a protezione della galleria lesionata.

— Soluzione adottata: ricompressione del terreno allentato spingendo fino a rottura dello stesso la pressione di iniezione delle miscele cementizie; propa-

Fase A



Fase B

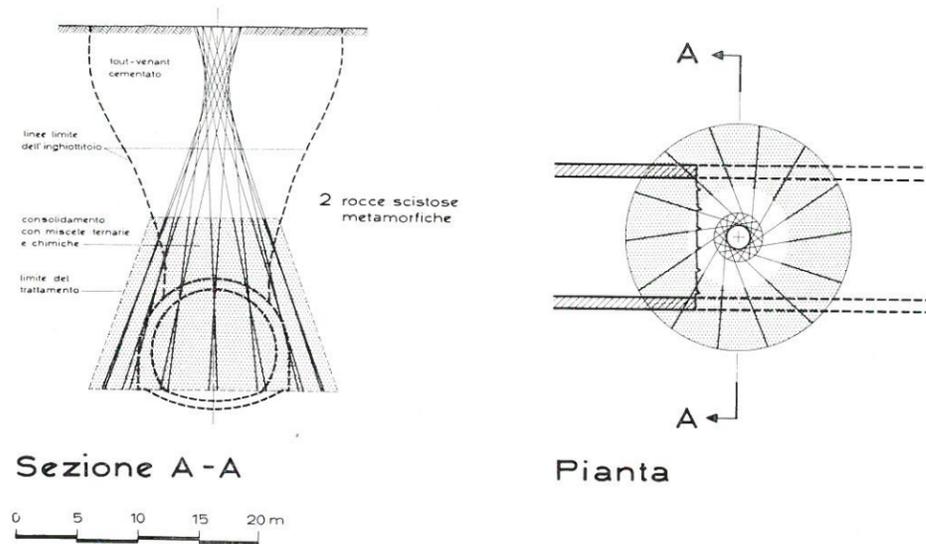


FIG. 31. - Galleria Crocetta - Schema dei trattamenti eseguiti e dei terreni interessati.



FIG. 32. - Galleria Madonna del Poggiolo - Armature provvisorie a sostegno dell'arco di calotta lesionato. Una sonda in perforazione per l'esecuzione dei fori di consolidamento.

gazione discontinua in seno alla massa da trattare (« claquage »); in seguito, impermeabilizzazione delle frazioni sabbiose e delle microfessure (nelle quali non è penetrata la miscela di cemento) mediante iniezione a pressione più moderata di gel di silice; posa infine di tubi drenanti per l'intercettazione dell'acqua ancora percolante all'esterno della zona trattata. La figura 33 riproduce la situazione e lo schema delle raggere di fori equipaggiati con tubi a valvola metallici. Durante il trattamento i movimenti della calotta hanno dovuto essere registrati in modo continuativo. Sono stati utilizzati apparecchi segnalatori automatici. Il trattamento di « claquage » ha comportato l'iniezione di un volume di miscela cemento-bentonite pari al 20 % del volume del terreno interessato, mentre il gel di silice a bassa pressione ha interessato fessure colme di sabbia secondo un volume pari al 10 % dell'intera zona trattata.

— Risultato ottenuto: con il pressimetro adatto per prove in roccia sono state fatte delle misurazioni del modulo elastico dell'arenaria in più punti prima e dopo il trattamento. Il modulo della roccia, risultato pari a 400 kg/cm^2 (valore medio) prima delle iniezioni, è salito a 1500 kg/cm^2 . I fori di carotaggio hanno sempre fornito buoni campioni con cementazioni evidenti; in più, in tutte le valvole iniettate è stata alla fine raggiunta la « pressione di rifiuto ». L'Impresa a tutt'oggi ha già rifatto 3 anelli di calotta di lunghezza di 3 m ciascuno; tolti i puntelli in legname e le centine nella zona del fornello ed eliminato il calcestruzzo della calotta, il terreno messo a nudo prima del nuovo getto è apparso ottimamente cementato e privo d'umidità. Il lavoro di ripristino della calotta è tutt'ora in corso.

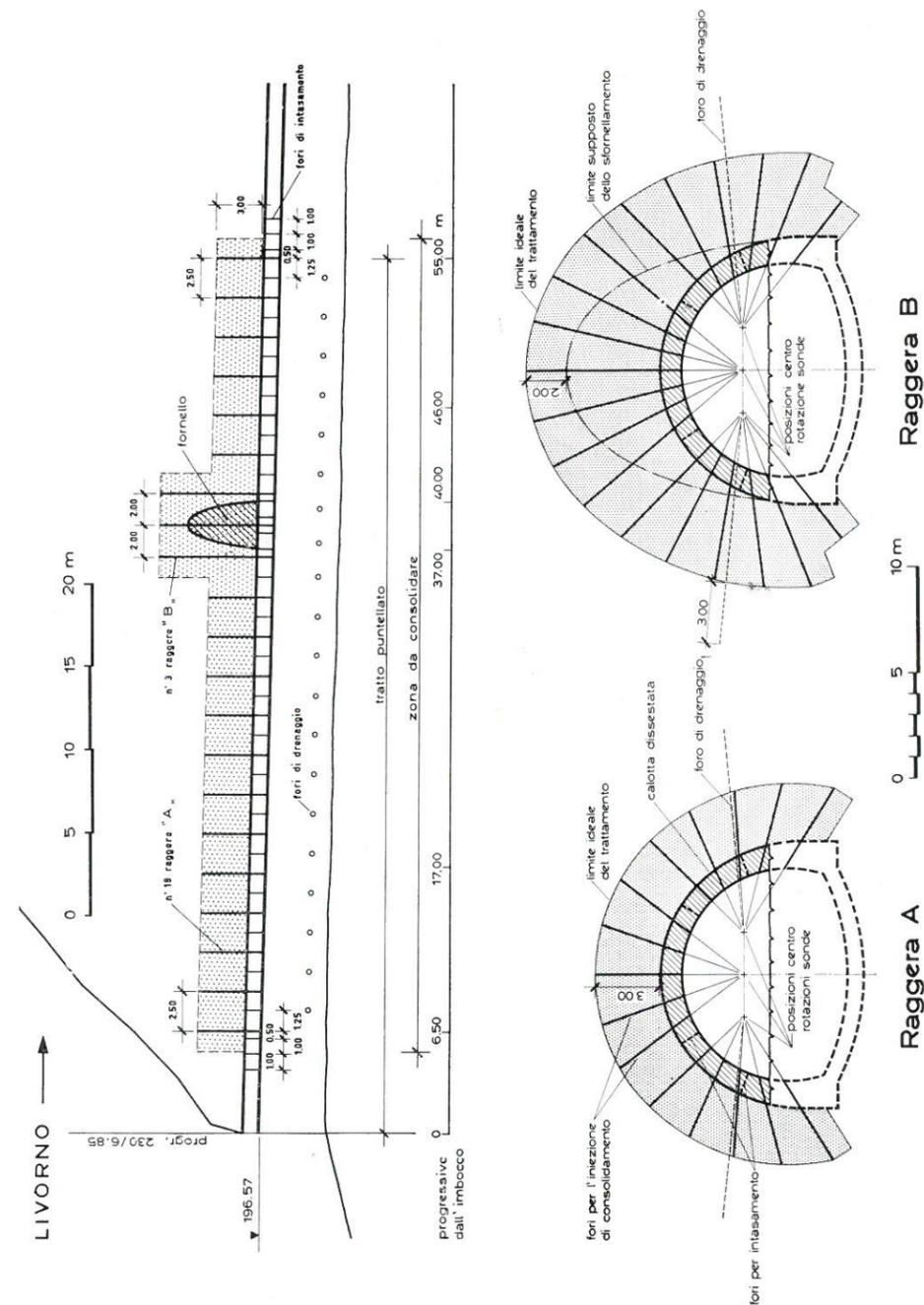


FIG. 33. - Galleria Madonna del Poggiolo - Schema del trattamento adottato per il consolidamento dell'arenaria deteriorata.

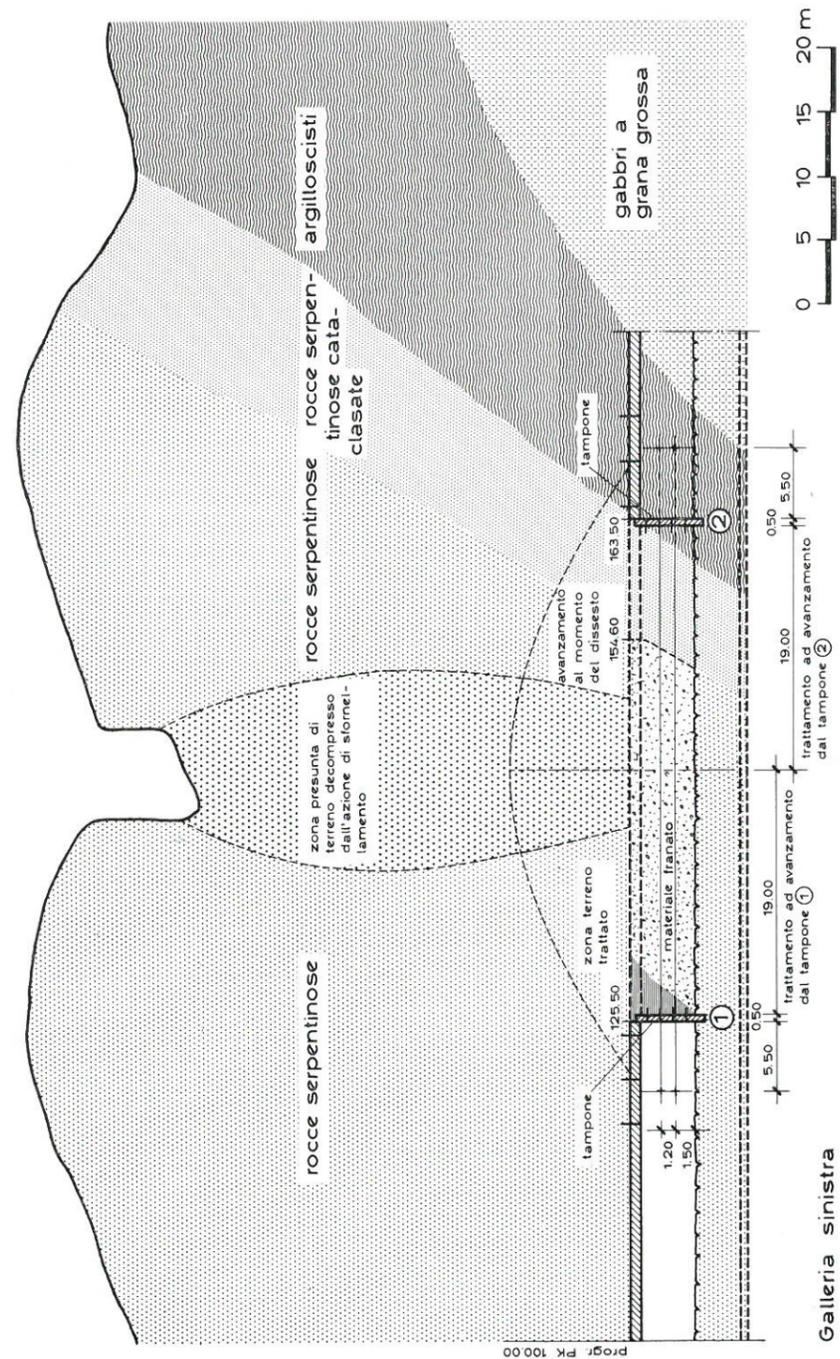


Fig. 34. - Galleria La Foce - Situazione della galleria nella zona del dissesto. Schema del trattamento « ad avanzamento ».

GALLERIA LA FOCE - autostrada Sestri Levante-Livorno - tronco 1 - lotto 5 - Ente Appaltante: S.A.L.T. (Società Autostrada Ligure Toscana) - Impresa Generale: C.M.C. (Cooperativa Muratori Cementisti), Ravenna - Località: Deiva Marina (La Spezia).

— Natura del terreno: partendo dall'imbocco lato Sestri la galleria penetra per 150 m circa in una roccia serpentinosi quasi completamente milonitizzata, con blocchi isolati di oficalciti, incontra quindi una zona di transizione, dove la roccia serpentinosi è fortemente cataclata; seguono degli argilloscisti con intercalazioni di straterelli calcarei per una lunghezza di 12 m. S'incontrano in seguito gabbri a grana grossa relativamente omogenei e poco fratturati.

— Problema da affrontare: l'avanzamento dello scavo della calotta della canna Livorno-Sestri è stato interrotto alla progressiva 155 lato Sestri da un improvviso rilascio di terreno che ha invaso la galleria per 30 m circa verso l'imbocco. Il dissesto si è esteso fino in superficie (50 m sopra l'asse della galleria) con la formazione di una grande voragine. La figura 34 mostra la situazione attuale della galleria; è stata pure segnata la zona presunta del terreno decompresso dall'azione di sfornellamento.

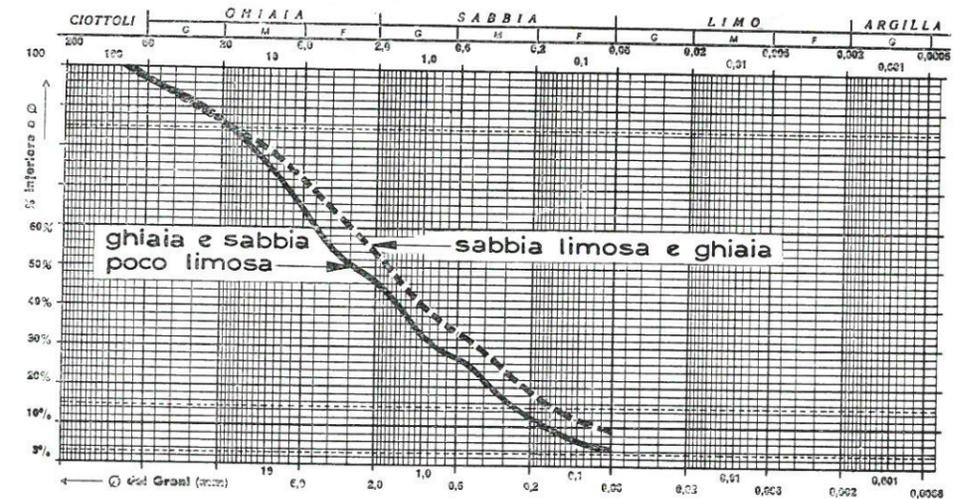


Fig. 35. - Galleria La Foce - Curva granulometrica del terreno appartenente alla frana in atto.

— Soluzione adottata: saranno eseguiti, mediante la posa di tubi a valvola in plastica, due trattamenti « ad avanzamento », l'uno a partire dal lampone n. 1 (lato Sestri) e l'altro a partire dal lampone n. 2 (lato Livorno) per una lunghezza totale di 38 m di galleria trattata. La figura 34 mostra schematicamente l'andamento dell'intervento. Il terreno, che allo stato naturale risulta non iniettabile, si lascia penetrare da miscele a base di silicato dove è stato decompresso dall'azione di sfor-

nellamento, come dimostra la curva granulometrica (figura 35) relativa a campioni estratti del materiale franato. Si prevedono iniezioni di miscele di cemento-bentonite (8 % del volume del terreno) seguite da gel di silice (12 % del volume del terreno).

Il lavoro è ora agli inizi.

Lo scavo, dopo l'intervento d'iniezioni, è stato in seguito eseguito ed ultimato con successo nei temi prestabiliti. Le foto n. 36, 37, 38 mostrano alcuni aspetti di questo lavoro (fornello e 2 particolari dello scavo con centine distorte). (*)

CONCLUSIONE

L'esperienza acquisita durante gli interventi sopra descritti invita, a mio avviso, a trarre qualche considerazione:

- trattamenti d'iniezione con miscele pregiate sono in grado di risolvere problemi molto delicati nell'ambito della costruzione di grandi gallerie; sono spesso indispensabili per superare certe situazioni originate dal disturbo arrecato al terreno dalle operazioni di scavo;
- è importante tenere conto anche dell'apporto che tali trattamenti conferiscono alla stabilità nel tempo dell'opera: ossia non è giusto considerare i trattamenti di consolidamento solamente quali mezzi temporanei utili durante la costruzione;
- un'attiva collaborazione tra direzione lavori, consulenti, imprese generali ed imprese specializzate, intesa alla ricerca in tempo utile dei metodi più opportuni d'intervento, può senza dubbio produrre interessanti risultati soprattutto in relazione alla economicità della realizzazione dell'opera.

(*) Nota aggiunta dall'autore il 4-4-1970 nella correzione della seconda bozza.



FIG. 36. - Galleria La Foce. Vista dall'alto della collina, sopra l'asse della galleria in costruzione, della bocca del «camino» formatosi in seguito al dissesto che ha riempito di materiale franato 30 m circa di scavo già completato.

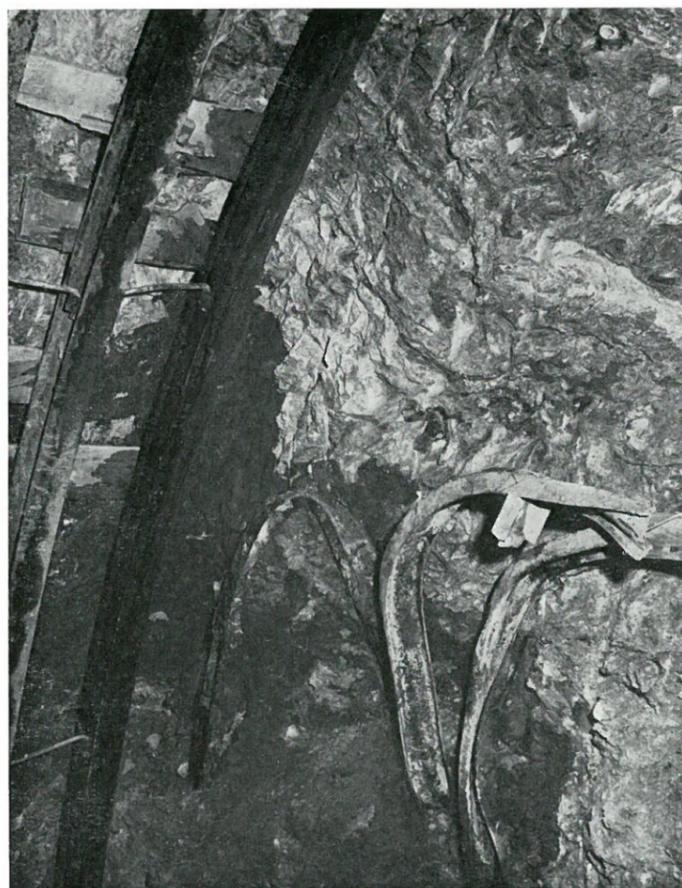


FIG. 37. - Galleria La Foce. Zona del dissesto durante gli scavi eseguiti dopo l'intervento di consolidamento con iniezioni di miscela silicato-acetato caricata con cenere di lignite. * Si possono notare: le centine che armavano la galleria prima del dissesto completamente accartocciate dal movimento franoso; il terreno franato, così bene ricompreso e consolidato da sembrare roccia; vene marroni di gel caricato con cenere; canne a valvole. Sopra le nuove centine sono infilati pochi marciavanti di protezione. L'arco di terreno all'estradosso dello scavo è stato reso autoportante dalle iniezioni. * (Brevetto Rodio).



FIG. 38. - Galleria La Foce. Particolare del fronte di scavo. Come si può facilmente notare non vi è traccia di « sineresi ». Le venate marroni sono formate dal gel caricato; se fosse gel puro, avendo provocato il « claquage » un'apertura dello spessore di 2÷3 cm, si sarebbe senza dubbio innescato il fenomeno della « sineresi ». Qui invece tutto appare normale e completamente asciutto. Il fronte di scavo è rimasto allo scoperto, non armato, per più di 20 giorni durante le feste natalizie.