

# La costruzione della galleria S. Elia lungo l'autostrada Messina-Palermo<sup>(\*)</sup>

## 1 — PREMESSA

Quando entro un ammasso roccioso si aprono due gallerie adiacenti, come nel caso della galleria S. Elia, è noto che si induce nel setto roccioso, che le separa, uno stato tensionale la cui entità cresce al diminuire dell'interasse tra i cavi. Si possono in pratica verificare tre situazioni:

● Caso a): gallerie a grande interasse.

Il setto di separazione risente in misura trascurabile della sovrapposizione degli stati tensionali trasmessi reciprocamente dai cavi e per ciascuno di essi la fascia di roccia a comportamento plastico è quella che si avrebbe nel caso di galleria singola.

● Caso b): gallerie a medio interasse. La distanza tra i cavi è tale da comportare una sensibile sovrapposizione delle tensioni trasmesse reciproca-

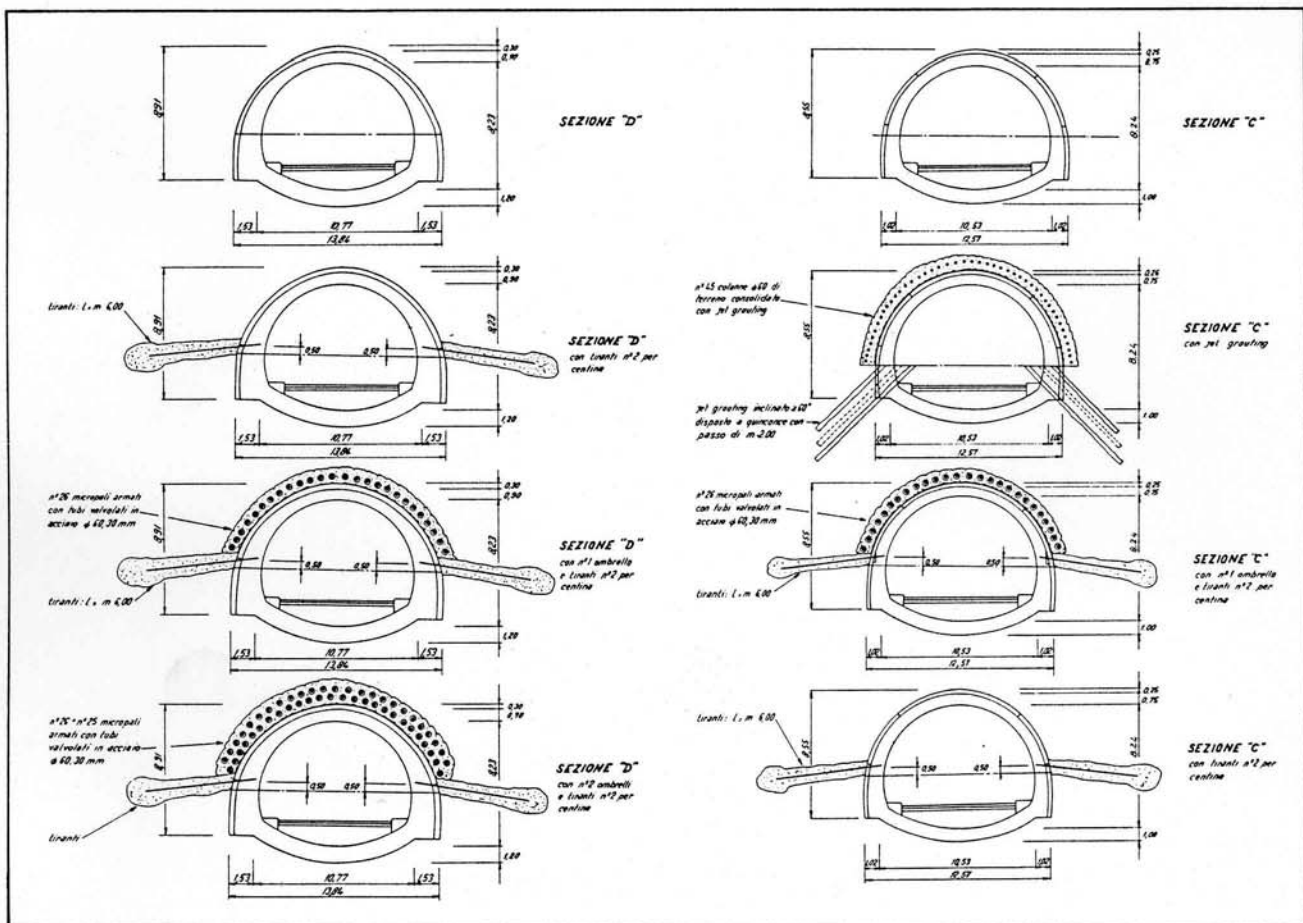
mente. Ciò si traduce in un'alternanza della situazione statica complessiva e quindi in un aumento della fascia a comportamento plastico relativa a ciascun cavo.

● Caso c): gallerie a piccolo interasse.

<sup>(\*)</sup> Relazione tratta da Autostrada Messina-Palermo. Tronco Buonfornello-S. Stefano di Camastra, lotti 33 bis - 33 - 32: "Problematiche costruttive e loro soluzioni" - Consorzio per l'Autostrada Messina-Palermo - 1988.

Fig. 1

Fig. 2



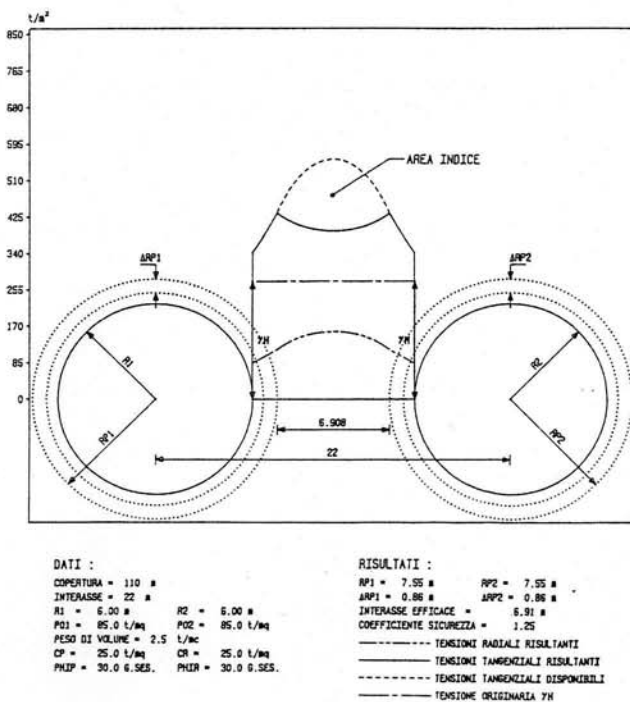


Fig. 3

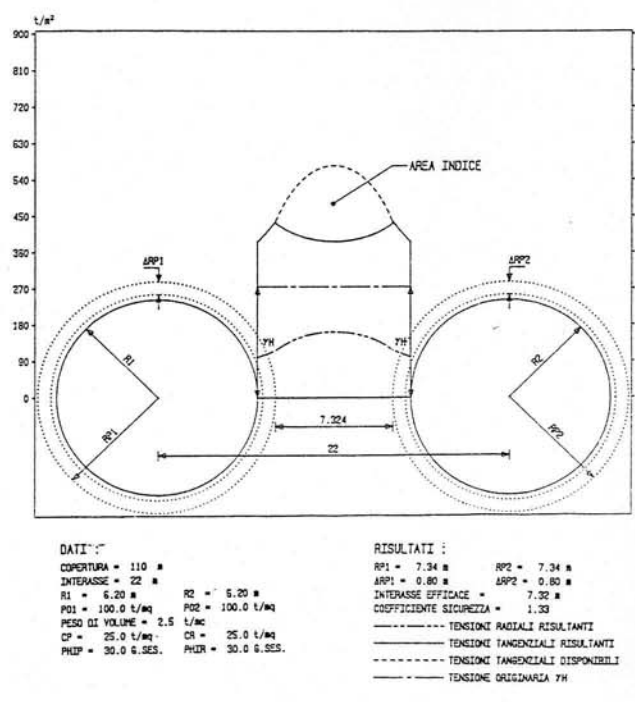


Fig. 4

se. La distanza tra i due cavi è tale da comportare la plasticizzazione dell'intero setto di separazione che può quindi offrire un contributo di resistenza trascurabile. Ciò comporta una deviazione del flusso degli sforzi indotti all'esterno del complesso individuato dall'insieme delle due cavità. Si forma così una fascia a comportamento plastico che è unica per le due gallerie, le quali in definitiva si comportano come una cavità singola. È superfluo rilevare che si tratta di una situazione limite e di estrema instabilità.

Da quanto sopra è evidente come l'importanza dei fenomeni plastici e quindi dei carichi gravanti sul rivestimento di una galleria a doppio fornice possa variare sensibilmente in funzione dell'interasse con cui si realizzano le due canne.

Il caso della galleria S. Elia è emblematico, nel senso che fin dall'inizio i due cavi hanno mostrato di risentire l'uno della presenza dell'altro (ci riferiamo per esempio, alle rotazioni subite dalle canne verso l'interno).

D'altra parte i calcoli di verifica dei manufatti di rivestimento, previsti per le varie classi di terreno del progetto ufficiale, trascurano la presenza del secondo fornice, che invece, alla luce del comportamento mostrato dalla galleria durante gli scavi, sembra opportuno considerare.

Si tratta in pratica di verificare la stabilità globale dell'opera.

Abbiamo quindi eseguito questo tipo di verifica mediante il metodo dell'"Area Indice" (Lunardi-Fattore 1974) adottando il programma di calcolo

"ARIND" (Lunardi-Bindi 1986), utilizzando parametri geotecnici medi dedotti da prove di laboratorio eseguite su campioni di arenaria, per poi eseguire il calcolo, a parità delle altre condizioni, una volta ipotizzando entro i cavi la presenza del rivestimento tipo C, quindi ipotizzando la presenza di quello tipo D.

*Rivestimento tipo C* (Fig. 3)

La potenza della zona plasticizzata al contorno di ciascun cavo aumenta di circa un metro rispetto al caso della galleria singola e l'interasse efficace, cioè lo spessore di roccia resistente che separa le due canne si riduce a poco più di 6 m di spessore. Il coefficiente di sicurezza è dell'ordine di 1,23.

*Rivestimento tipo D* (Fig. 4)

La potenza della zona plasticizzata al contorno di ciascun cavo aumenta di circa 80 cm rispetto al caso della galleria singola e l'interasse efficace è pari a 7,30 m circa. Il coefficiente di sicurezza è dell'ordine di 1,33.

Se ne deve concludere che per assicurare la stabilità globale delle due canne autostradali nel tempo è quanto meno opportuno, nella tratta considerata, adottare il rivestimento tipo D.

(Estratto dalla relazione Rocksoil n° 62.01. 86. 168 del 30. 10. 1986)

**2 — ESECUZIONE DEGLI IMBocchi LATO MESSINA**

L'attacco lato Messina della Galleria a

doppio fornice S. Elia, avrebbe comportato l'esecuzione di uno sbancaamento d'approccio in terreni prevalentemente incoerenti di scarse caratteristiche meccaniche, la deviazione della strada provinciale Cefalù-Gibilmanna, la demolizione di un fabbricato civile, e la successiva realizzazione di una galleria artificiale e del relativo portale.

Nella presente relazione si prendono in considerazione i problemi geotecnici relativi alla realizzazione dell'imbocco e si studiano adeguate tecniche operative che ne garantiscano la fattibilità (Figg. 5 e 6).

**2.1 - Problemi geotecnici**

L'imbocco della galleria interessa per uno sviluppo di circa 40 m a partire dall'inizio della galleria naturale, un deposito detritico costituito da elementi litoidi di varia pezzatura immersi caoticamente in matrice limosa.

L'attacco e l'attraversamento di questo deposito, considerata la natura eterogenea ed incoerente del terreno, si preannunciano piuttosto difficili, anche per la presenza della strada provinciale che sovrappassa le gallerie proprio sopra la zona d'imbocco.

Il progetto originario risolve il problema operando:

- lo spostamento più a monte della strada;
- la realizzazione di una profonda incisione del versante.

L'esame diretto in situ ed i risultati della campagna geognostica escluderebbero tuttavia la possibilità di adot-

tare questa soluzione, per una serie di motivi:

- lo spostamento dell'attuale provinciale verso monte comporterebbe la creazione di incisioni non trascurabili sulla coltre detritica già in stato d'equilibrio precario e quindi la necessità di realizzare adeguate opere di intervento strutturale in avanzamento e di protezione degli scavi;
- la creazione di profonde incisioni nel versante per realizzare le gallerie artificiali, come da progetto, provocherebbe pericolose decompressioni nella coltre detritica e richiami d'acqua verso gli scavi, mettendo in serio pericolo la stabilità delle costruzioni di civile abitazione sovrastanti;
- per l'impossibilità, anche se in via provvisoria, di eseguire sbancamenti con scarpate a pendenza 1/1, come risulterebbe imposto dalla presenza di costruzioni preesistenti limitrofe;
- la soluzione comporta tempi esecutivi piuttosto lunghi, senza considerare i rischi connessi all'innescò di fenomeni deformativi non contenibili sul versante in oggetto.

Si è studiata, allora, la possibilità di intervenire con adeguati sistemi di interventi strutturali in avanzamento, che consentano di procedere alle operazioni di imbocco senza spostare la strada provinciale, senza interrompere il traffico, ed arrecando il minimo disturbo al versante.

## 2.2 - Attacco della galleria

Dopo aver studiato accuratamente la situazione sia sotto il profilo morfologico che sotto quello geotecnico ed operativo, si è giunti alla conclusione che lo scopo di limitare il volume degli sbancamenti e non apportare varianti al tracciato della strada provinciale può essere ottenuto a patto di ricorrere ad adeguate e ben calibrate opere di intervento strutturale in avan-

zamento, operando, cioè, in maniera da evitare di aprire degli scavi se non dopo averne stabilizzato le future pareti perimetrali.

In questa ottica, in considerazione della singolare situazione geo-morfologica si propone:

- per il fronte d'attacco dei due fornicci, di intervenire strutturalmente sul terreno eseguendo una paratia di colonne di terreno trattato, che operi da contenimento dello scavo necessario per la preparazione dei portali di accesso al tunnel e che eviti, così, decompressioni del versante in adiacenza alla strada provinciale;
- per il perimetro di scavo delle due canne, di intervenire strutturalmente sulla fascia di terreno all'estradosso del profilo teorico di scavo in modo da impedire convergenze del cavo, evitando così anche il pur minimo cedimento del corpo stradale.

Particolarmente vantaggioso per raggiungere lo scopo appare l'impiego della tecnica di intervento strutturale jet-grouting che bene si adatterebbe per realizzare sia la paratia di testata dei tunnel sia la fascia di intervento strutturale dei cavi di avanzamento del deposito detritico (Fig. 5).

La paratia verrebbe ottenuta per accostamento di colonne di terreno trattato  $\varnothing 650$  mm, compenstrate e di lunghezza massima dell'ordine di 15 m.

Eseguito l'intervento strutturale si potrà procedere allo sbancamento, che dovrà essere spinto fino al piano di lavoro previsto per l'avanzamento in galleria. La paratia così realizzata dovrà essere munita di opportuni fori che impediscano l'accumulo di acqua a tergo che provocherebbero l'insorgere di dannose spinte idrostatiche.

## 2.3 - Avanzamento della galleria

Per l'attraversamento della coltre detritica ed il by-pass della strada pro-

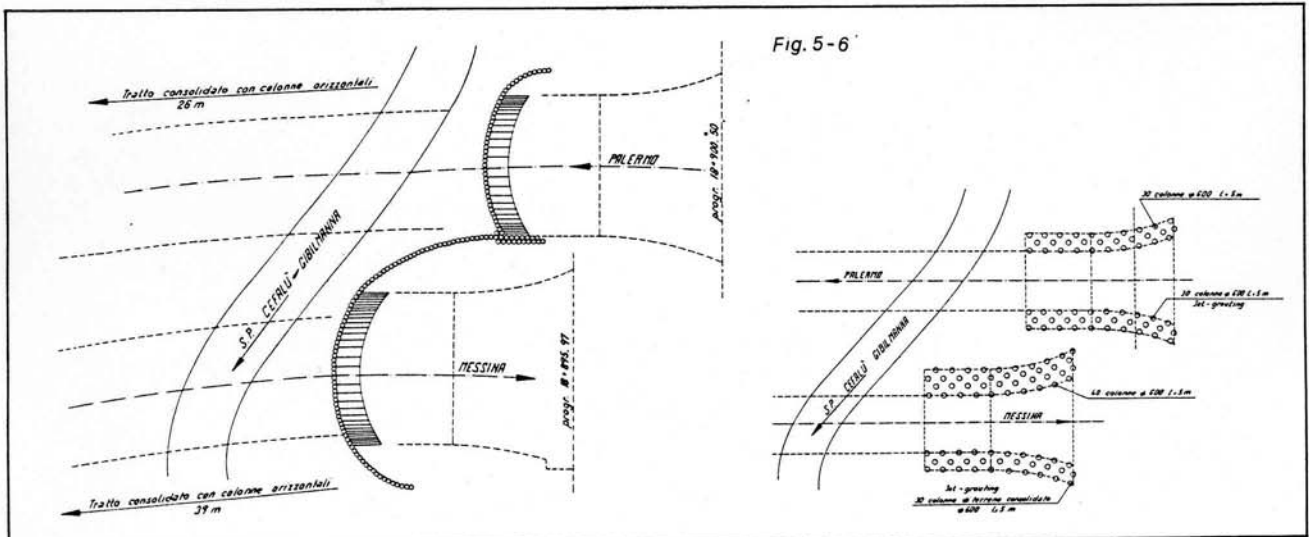
vinciale, si prevede di scavare la galleria a sezione parzializzata previa stabilizzazione preventiva a partire dall'imbocco.

L'intervento strutturale in avanzamento, se realizzato con i criteri nel seguito esposti e se eseguito con l'accuratezza e l'attenzione necessarie a garantire un lavoro a regola d'arte, permette di superare in piena sicurezza le difficoltà che l'attraversamento in galleria di terreni dotati di solo attrito può comportare; queste difficoltà sono per lo più connesse al meccanismo attraverso il quale un terreno incoerente, affrontato in sotterraneo, può raggiungere la stabilità.

Le esperienze maturate fino ad oggi e gli oggettivi riscontri che si sono ottenuti grazie a prove su modello appositamente predisposto, sono concordi nel far dipendere il raggiungimento dell'equilibrio dall'innescò dell'"effetto arco" attorno alla cavità. Tale effetto, che si può creare per via naturale grazie alla mobilitazione della resistenza d'attrito al contorno della stessa, si costituisce sempre a spese di importanti fenomeni deformativi che, se non prontamente contenuti all'atto dello scavo, possono provocare rifluimenti di materiale in galleria fino a causarne il crollo.

Tale meccanismo nei terreni incoerenti non può essere accettato, tanto meno quando si opera a fronte di deboli coperture ed al di sotto di strutture stradali dove anche il più piccolo fenomeno deformativo può innescare processi incontrollabili, ragione per cui diventa imperativo ricorrere alla creazione per via artificiale e preventiva dell'effetto arco indispensabile a garantire la stabilità in assenza di pur minime convergenze.

Tra i vari sistemi di intervento più o meno tradizionali che si hanno a disposizione per raggiungere lo scopo, si propone ancora il sistema "jet-



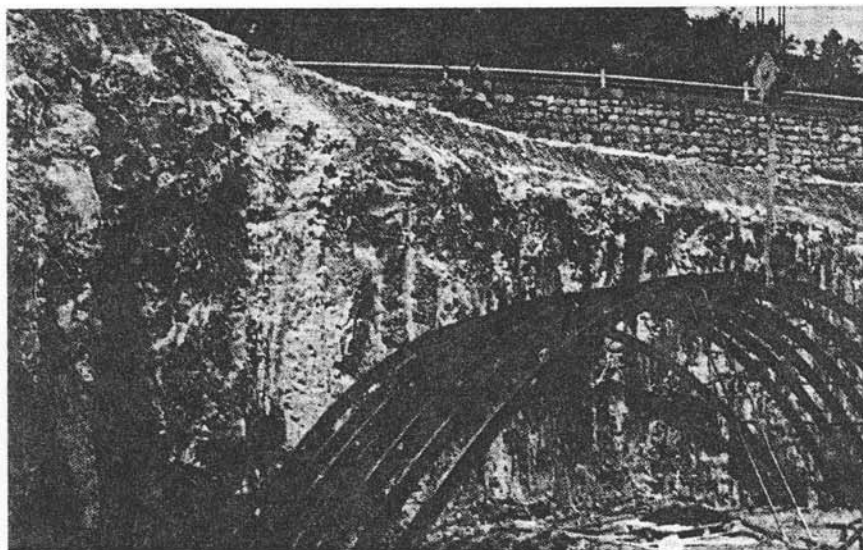


Foto 1

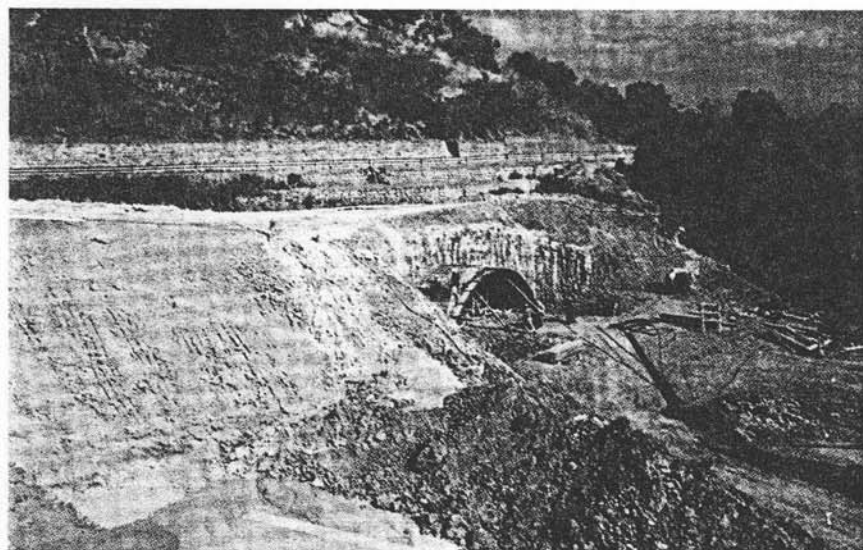


Foto 2

grouting" con cui è possibile trattare velocemente ed efficacemente volumi di terreno di forma e dimensioni controllate.

In pratica la realizzazione degli interventi di trattamento, dell'attacco e dello scavo della galleria può essere schematizzata in sei fasi distinte, tenendo presente che dovrà essere realizzato per primo il fornice di valle, quindi a seguire quello di monte:

- fase 1 esecuzione dello sbancamento d'approccio previa stabilizzazione degli scavi con interventi di jet-grouting;
- fase 2 realizzazione eventuale di un'aureola di fori drenanti e trattamento con il sistema jet-grouting della calotta per 13 m oltre il fronte d'attacco. Le colonne orizzontali di terreno trattato, compenstrate, possono prevedersi ad interasse di 45 cm in zona

calotta e di 50 cm circa in zona reni;

- fase 3 avanzamento a sezione parzializzata per circa 10 m, posizionamento centine e proiezione immediata di spritz-beton armato con rete elettrosaldata, per uno spessore di circa 10-15 cm;
- fase 4 esecuzione a partire dal nuovo fronte, di un'eventuale nuova serie di drenaggi e di un successivo tratto (circa 13 m) di colonne di terreno trattato inclinate, in calotta del 9% max rispetto all'asse della galleria, poste ad interasse  $i = 45-50$  cm su tutto il perimetro di scavo e trattamento dei piedritti nel tratto retrostante già scavato;
- fase 5 scavo dello strozzo nel tratto già totalmente trattato e proiezione dello spritz-beton sulle pareti; scavo dell'arco rovescio nel tratto di galleria già aperto, esecuzione delle murette e dell'arco rovescio;

- fase 6 getto del rivestimento definitivo in calcestruzzo armato con centine INP 200.

## 2.4 - Fondazioni dei portali e delle gallerie artificiali

Data la situazione morfologica e le caratteristiche dei terreni entro cui dovranno essere fondati gli artificiali della galleria S. Elia, appare consigliabile procedere ad un intervento strutturale preventivo degli stessi per conferirgli la necessaria capacità portante.

In caso contrario si renderebbe infatti necessario un approfondimento eccessivo delle fondazioni dei manufatti, il che obbligherebbe a praticare scavi profondi con conseguente decompressione del terreno circostante. D'altra parte il ricorso a fondazioni profonde su pali non è sempre conveniente, dato che esse dovrebbero attestarsi entro i livelli di terreno più consistenti, quindi essere di lunghezza non inferiore ai 15 m.

Tra i vari tipi di trattamento che potrebbero essere adottati per migliorare le caratteristiche del terreno, il sistema che più si adatta alla situazione geoidrologica e geotecnica esistente sembra ancora il sistema jet-grouting. Con esso è infatti possibile incrementare notevolmente la resistenza al taglio del terreno trattato senza alterare l'equilibrio geoidrologico sotterraneo, né innescare decompressioni nel versante, non richiedendo asportazione di materiale (Fig. 6).

Realizzando con questo metodo delle fondazioni dirette su terreno trattato, è possibile conseguire la necessaria capacità portante senza dover approfondire eccessivamente il piano di fondazione, come altrimenti si renderebbe necessario.

L'intervento può consistere nell'esecuzione di una maglia di colonne di terreno trattato in corrispondenza alle fondazioni degli artificiali. L'intensità del trattamento dovrebbe essere di una colonna ogni  $3 \text{ m}^2$  circa.

I dati geometrici dell'intervento sono riportati nei disegni di progetto.

## 2.5 - Conclusioni

L'imbocco lato Messina della galleria S. Elia interessa, per uno sviluppo di circa 40 m a partire dall'inizio della galleria naturale, un deposito detritico incoerente, caratterizzato da ridotta resistenza al taglio.

L'attacco e l'attraversamento di questo deposito appaiono difficili, considerata la presenza della strada provinciale che sovrappassa le gallerie proprio sopra la zona d'imbocco, e la presenza di alcune abitazioni limitrofe che impediscono la riprofilatura del versante con scarpate a pendenza

compatibile con le doti di resistenza meccanica dei terreni interessati. Appare quindi opportuno ricorrere, per realizzare l'imbocco della galleria, a tecniche di intervento strutturale preventivo sul terreno.

L'intervento di stabilizzazione proposto, grazie allo sfruttamento delle particolari caratteristiche offerte dalla tecnica di intervento strutturale sul terreno con jet-grouting, oltre a garantire la stabilità del fronte e del profilo di scavo in fase di addentramento, permetterà di procedere alle operazioni d'imbocco senza spostare la strada provinciale, senza interrompere il traffico, senza arrecare disturbo al versante, mantenendo inalterato l'equilibrio geomorfologico, nel rispetto della vigente normativa in materia ed in particolare del D.M. 21 gennaio 1981.

(Estratto dalla relazione Rocksoil n° 62.01. 86.41 del 25.06.1985)

### 3 — CONSOLIDAMENTI

I rilievi eseguiti nelle tratte fin qui scavate hanno evidenziato, in entrambe le canne, una prima tratta in detrito limo-sabbioso e limoso di color nocciola e una seconda caratterizzata da un litotipo essenzialmente argilloso di color nerastro con struttura finemente laminata.

Il litotipo argilloso esposto all'aria, quando in esso si viene ad incrementare la percentuale d'acqua, presenta tempi di sfioritura estremamente rapidi, con il conseguente decadimento delle sue caratteristiche intrinseche di resistenza.

Procedendo nello scavo, le variazioni litologiche intervenute, hanno coinciso con il decadimento delle caratteristiche intrinseche dell'ammasso, tanto da non consentire ai cavi di mantenersi in condizioni di stabilità anche a seguito della realizzazione delle opere di stabilizzazione provvisorie.

A causa dell'assenza di un adeguato sistema drenante si è verificato, a monte dell'imbocco della galleria, un fenomeno di instabilità del versante tale da coinvolgere i cavi con conseguenti forti decompressioni nei pressi del fronte culminante con un importante sfornellamento sulla canna di monte.

#### 3.1 - Superamento del fornello a progr. 160

Nella galleria in oggetto a seguito dell'effetto drenante del cavo si è verificata una concentrazione di acqua nelle zone dei fronti che con tutta probabilità ha innescato il movimento franoso del versante sovrastante gli imbocchi della galleria.

All'interno della canna per Messina una massa di terreno, decompressa a

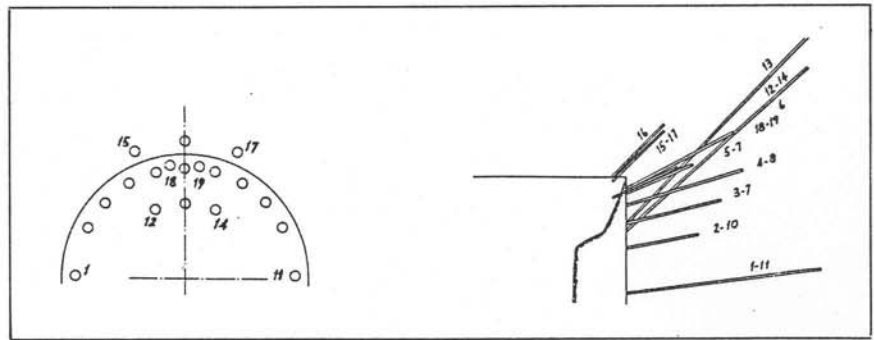


Fig. 7

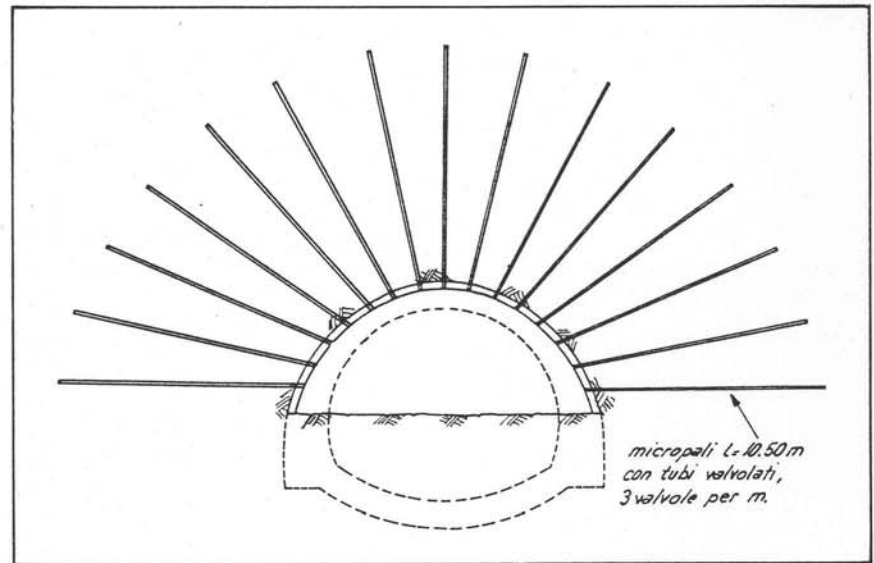


Fig. 8

seguito dell'evento franoso, è rifluita in galleria con il conseguente blocco dei lavori.

Gli interventi necessari al superamento del fornello e al prosieguo dello scavo in sicurezza possono essere così schematizzati:

- esecuzione di uno strato di spritz-beton sul materiale proveniente dal fornello;
- posizionamento di materiale arido che permetta un buon drenaggio delle acque;
- realizzazione, substrato a ridosso del fornello, di un tampone in calcestruzzo;
- esecuzione dall'alto dell'intasamento del vuoto creatosi per mezzo di iniezioni a bassa pressione di malta espansiva additivata con polveri di alluminio (Fig. 7);
- esecuzione, dopo il completamento dell'intasamento, di una doppia coronella di terreno consolidato con iniezioni ad alta pressione mediante tubi metallici valvolati da eseguirsi in avanzamento per tratta di 15 m fino al completo superamento della zona decompressa.

#### 3.2 - Dimensionamento degli interventi

##### Preconsolidamento radiale

Con riferimento alla situazione creata negli scavi fin qui eseguiti è possibile fare le seguenti considerazioni: nella zona ove le deformazioni del cavo sono state di entità tale da compromettere del tutto o in parte il getto del rivestimento definitivo occorre intervenire per contenere il fenomeno di plasticizzazione ed impedirne l'ulteriore estensione.

A tale scopo è necessario consolidare l'ammasso roccioso intorno al cavo in maniera da creare una fascia di roccia armata equivalente capace di fornire una pressione di contenimento sufficiente a garantire la stabilità del cavo a breve e a lungo termine.

L'intervento di preconsolidamento previsto tra le progr. 114 e 160 della pista per Messina e tra le progr. 132 e 185 della pista per Palermo, ha lo scopo di migliorare le caratteristiche intrinseche dell'ammasso. In particolare, in queste zone si esegue un trattamento di iniezioni ad alta pressione

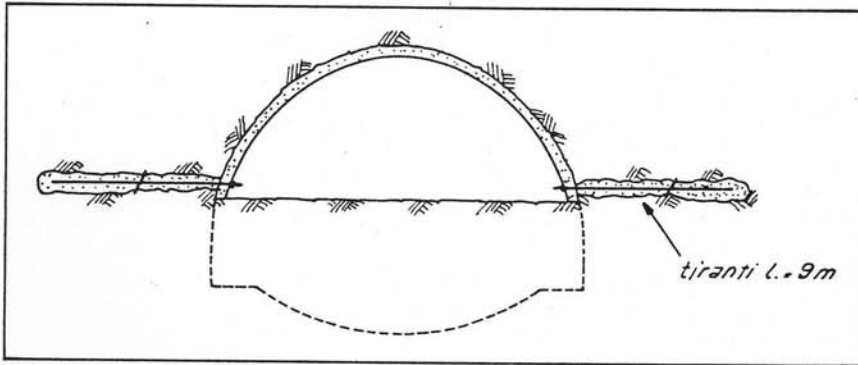


Fig. 9

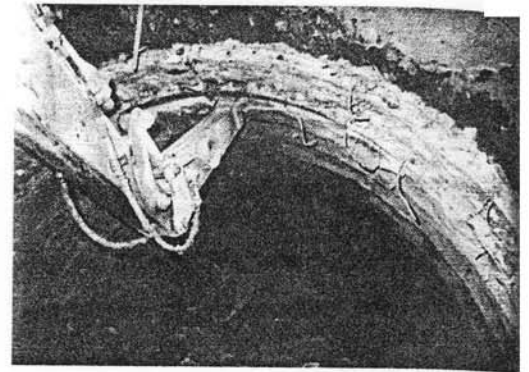


Foto 3

to con una doppia coronella di terreno consolidato con iniezioni ad alta pressione mediante tubi metallici valvolati sub-orizzontali posti ad interasse di 75 cm lanciati oltre il fronte di scavo per circa 15 m, con sovrapposizione fra due tratte successive di almeno 3 m.

Sovrapponendo le due coronelle con interasse di 60 cm si ottiene una fascia di terreno consolidato dello spessore di circa 1,20 - 1,40 m.

Oltre a garantire la stabilità del fronte, l'arco di terreno trattato è in grado di esercitare un'azione di contenimento atta ad impedire gli allentamenti a breve termine (Fig. 10).

(Estratto dalle relazioni Rocksoil n° 62.01.86.25 e 26 del 27.01.1986)

**Pietro Lunardi**

Docente di Consolidamento del Suolo e delle Rocce all'Università di Firenze

LE ILLUSTRAZIONI

- Fig. 1-2 - Sezioni tipo.
- Fig. 3 - Area Indice per cavità circolari adiacenti - Rivestimento tipo C.
- Fig. 4 - Area Indice per cavità circolari adiacenti - Rivestimento tipo D.
- Fig. 5 - Pianta dei consolidamenti.
- Fig. 6 - Interventi con jet-grouting.
- Fig. 7 - Disposizione del tampone.
- Fig. 8 - Interventi tipo B, consolidamento a raggiera.
- Fig. 9 - Sezione schematica degli interventi tipo B e C.
- Fig. 10 - Sezione schematica interventi tipo C.
- Foto 1 - Centine predisposte per l'esecuzione del pre-anello sotto la strada provinciale.
- Foto 2 - Imbocchi lato Messina, operazioni di scavo ed esecuzione del pre-anello dopo il trattamento con jet-grouting.
- Foto 3 - Gallerie S.Elia: ripristino del profilo di scavo a seguito dei notevoli cedimenti e asportazione delle centine.

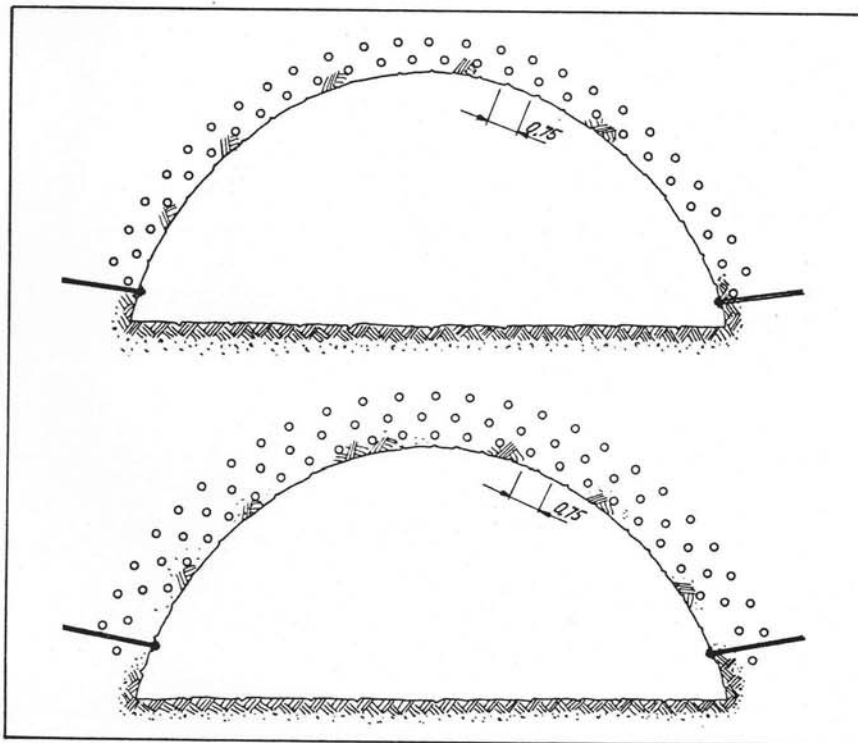


Fig. 10

mediante tubi metallici valvolati radiali della lunghezza di 10,50 m adottando una maglia 1,20x1,20 disposta e quinconce, garantendo così la formazione di un anello di terreno consolidato che collabora alla statica del rivestimento definitivo (Fig. 8).

*Tiranti sub-orizzontali*

All'atto dello scavo di ribasso, il concio di arco di calotta sotto cui viene asportato il terreno potrà contare, oltre che sul normale effetto tridimensionale di redistribuzione dei carichi sui conci limitrofi, sul vincolo costituito dalle colonne di terreno consolidato coagenti con la struttura tramite la

barra d'acciaio messa in trazione. Tale vincolo è in grado di esplicare una reazione sia in direzione orizzontale sia in direzione verticale, impedendo gli spostamenti della struttura in questa fase operativa delicatissima. Affinché sia garantita la resistenza allo sfilamento a seguito del tiro di esercizio, in considerazione dello stato di alterazione del materiale su cui si va ad operare, appare giustificata l'adozione di tubi di lunghezza  $L=9,00$  m (Fig. 9).

*Preconsolidamento in avanzamento*

Per il tratto ove si è verificato il fenomeno, il preconsolidamento sarà realizza-