

IL JET-GROUTING NEL CONSOLIDAMENTO DI IMBOCCHI DI GALLERIE AUTOSTRADALI

L. FAORO

Zollet Ingegneria - S. Giustina Bellunese

P. LUNARDI

Facoltà di Ingegneria - Università di Firenze

M. PASQUINI

Costruzioni Callisto Pontello S.p.A. - Firenze

INTRODUZIONE

Nella costruzione del Lotto 33 bis dell'Autostrada Messina-Palermo, la galleria S. Elia viene ad interessare con le sue opere di imbocco l'esistente strada provinciale Cefalù-Gibilmanna, ricavata con sbancamento a mezza costa sul versante W del vallone S. Elia, in una situazione di precaria stabilità del versante data la natura incoerente del terreno.

Viene descritta la variante operativa attuata rispetto alla soluzione progettuale iniziale, che ha permesso di eliminare la costruzione di due previste deviazioni stradali (Fig. 1), assicurando il mantenimento della viabilità e dell'attuale stabilità del versante interessato.

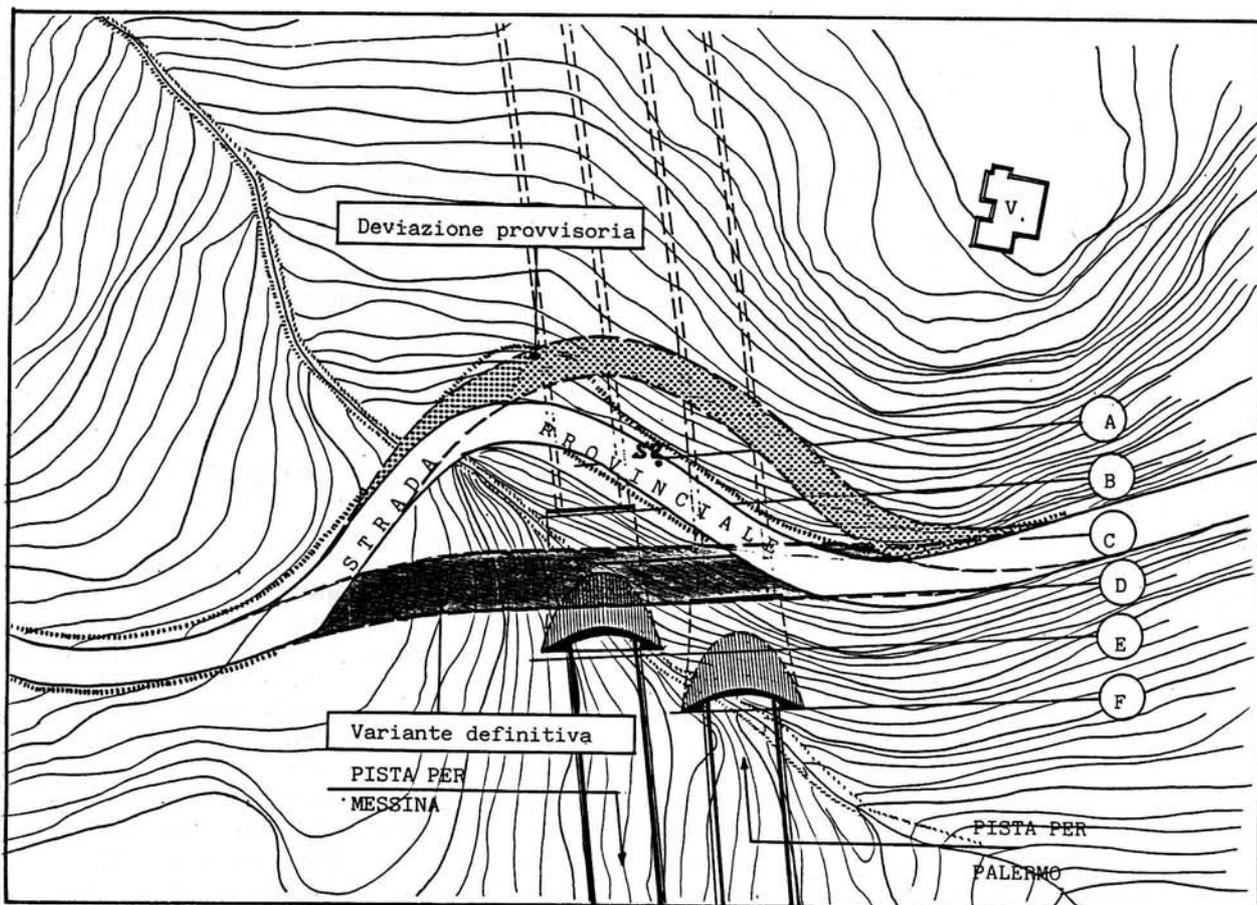


FIG. 1 - Imbocchi della galleria S. Elia - Previsione progettuale

1. QUADRO GEOLOGICO-GEOTECNICO GENERALE

1.1. Morfologia

Il lotto 33 bis dell'Autostrada Messina-Palermo si sviluppa in un territorio caratterizzato da versanti più o meno acclivi, chiaramente influenzati dalla litologia dei terreni ivi affioranti e dalle loro condizioni strutturali.

L'inclinazione dei pendii varia, infatti, in funzione di particolari situazioni locali, con valori di acclività abbastanza accentuati in presenza dei termini litologici più compatti.

Nel complesso il panorama è quello tipico di una morfologia giovane e poco evoluta; ciò è confermato dall'andamento pressoché rettilineo dei corsi d'acqua principali e dalla quasi totale assenza d'incisioni secondarie.

1.2 Litologia

I terreni interessati dall'autostrada fanno parte della serie flyschoida appartenente a formazioni coesive di origine sedimentaria sovrapposte tra loro in seguito ad azioni orogenetiche; essi appartengono al Complesso Panormide ed all'alloctono Complesso Sicilide posto a tetto del Complesso Basale.

I litotipi affioranti nella zona d'imbocco della galleria "S. Elia" sono prevalentemente costituiti da alternanze argilloso-arenacee o marnoso-arenacee di età compresa tra il Cretaceo ed il Miocene Inferiore.

La stratigrafia è costituita dai seguenti termini in successione rispettivamente da quello più profondo a quello più superficiale :

- Flysch Numidico (Oligocene-Miocene Inf.);
- Formazione di Polizzi (Cretaceo Sup.-Oligocene);
- Tufiti di Tusa;
- Flysch di Reitano (Oligocene-Miocene Inf.);
- Depositi Alluvionali Recenti;
- Detriti di falda.

In particolare i depositi alluvionali recenti si rinvencono sul fondo del vallone S. Elia per un'estensione limitata e con spessori modesti; si tratta di depositi grossolani arrotondati, di diametro variabile da pochi centimetri fino a qualche metro, immersi in matrice sabbioso-siltosa.

Le frazioni più grossolane sono

costituite dai termini arenacei del Flysch Numidico e di Reitano, mentre quelle più fini derivano dai termini più teneri (argilliti).

Lungo i versanti, invece, sono presenti con una certa diffusione materiali detritici provenienti dallo smantellamento delle formazioni sopra indicate. In genere piuttosto spigolosi, di dimensioni estremamente variabili da pochi centimetri a qualche metro, sono immersi in una matrice limosa e limo-argillosa.

Il materiale grossolano è rappresentato da arenarie, quarzoareniti e siltiti, la matrice varia da un limo-sabbioso a sabbie limose medio-fini di colore bruno-giallastro.

La potenza di queste coltri detritiche è molto variabile e nel caso particolare del versante interessato raggiunge i 16,80 m (come riscontrato nel sondaggio S2, sul ciglio della strada provinciale in asse autostrada - Fig. 1).

2. SITUAZIONE PLANO-ALTIMETRICA DEGLI IMBOCCHI

La Foto 1 mostra il prospetto del versante rispetto al piano di lavoro predisposto per l'imbocco della galleria della pista per Messina; è evidente che l'innescio di qualsiasi fenomeno franoso interesserebbe immediatamente anche la stabilità della villetta posta a NW dell'imbocco. La sezione schematica in asse alla stessa galleria (Fig. 2) mostra che la copertura in asse della strada provinciale non supera i 4 m, mentre la distanza dal ciglio strada è dell'ordine di 7 m.

3. RISULTATI DEI SONDAGGI PRELIMINARI

3.1. Stratigrafia

Nella zona indagata è stata condotta un'intensa campagna geognostica nel corso della quale sono stati eseguiti :

- 3 sondaggi (S2, S3, S4) per complessivi 56.5 m di perforazione;
- 60 prove S.P.T. (Standard Penetration Test);
- 4 saggi con escavatore spinti sino a 5 m da p.c. (Sa3, - Sa4 - Sa5 - Sa6);
- 1 prelievo di campione rimaneggiato e ricostituito in laboratorio (C4), in prossimità della trincea Sa3.

L'esame accurato di tutta la documentazione in nostro possesso ha



FOTO 1 - Prospetto del versante dal piano di lavoro dell'imbocco pista per Messina.

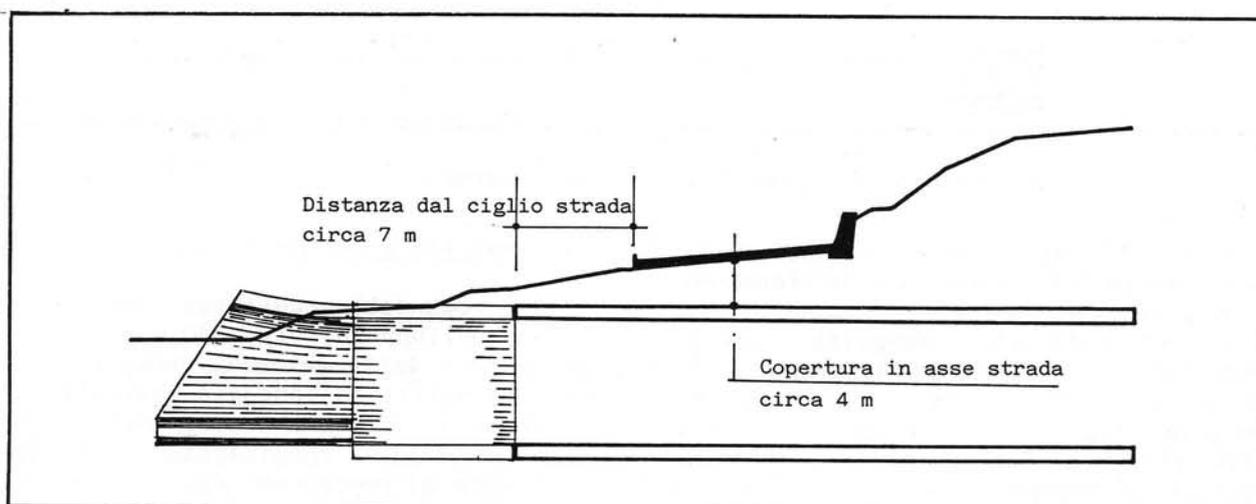


FIG.2 - Situazione altimetrica dell'imbocco della pista per Messina rispetto alla strada provinciale Cefalù - Gibilmanna

permesso di individuare con sufficiente precisione i tipi di terreno che sono direttamente interessati dalla realizzazione dell'imbocco lato Messina della galleria "S. Elia" e su cui poggeranno le fondazioni dei portali e delle gallerie artificiali.

La zona d'imbocco della galleria viene a trovarsi in un grosso mammellone che da Cozzo S. Elia diparte in direzione Messina. Esso è costituito da detrito limo-argilloso color nocciola con alta percentuale di frammenti spigolosi arenacei grigio-verdastri di dimensioni comprese tra 0,1 e 1 m, inclusi caoticamente nella matrice fine.

Nella zona si è evidenziata, infatti,

la prevalente presenza di una coltre detritica caoticizzata di potenza variabile tra 12 e 19 m, caratterizzata da elementi litoidi grossolani inglobati casualmente in matrice limo-sabbiosa ed argillosa. Al letto del detrito si trova la formazione di Polizzi, composta da marne argillose fittamente stratificate e fratturate (vedi sezioni e profili geologici). Fig. 3.

L'analisi granulometrica del campione C4 prelevato nel detrito ha mostrato la presenza di una frazione argillosa del 20%.

Il saggio Sa5, realizzato nel detrito a quota 141 m circa, ha intercettato una falda libera alla profondità di 3.14 m

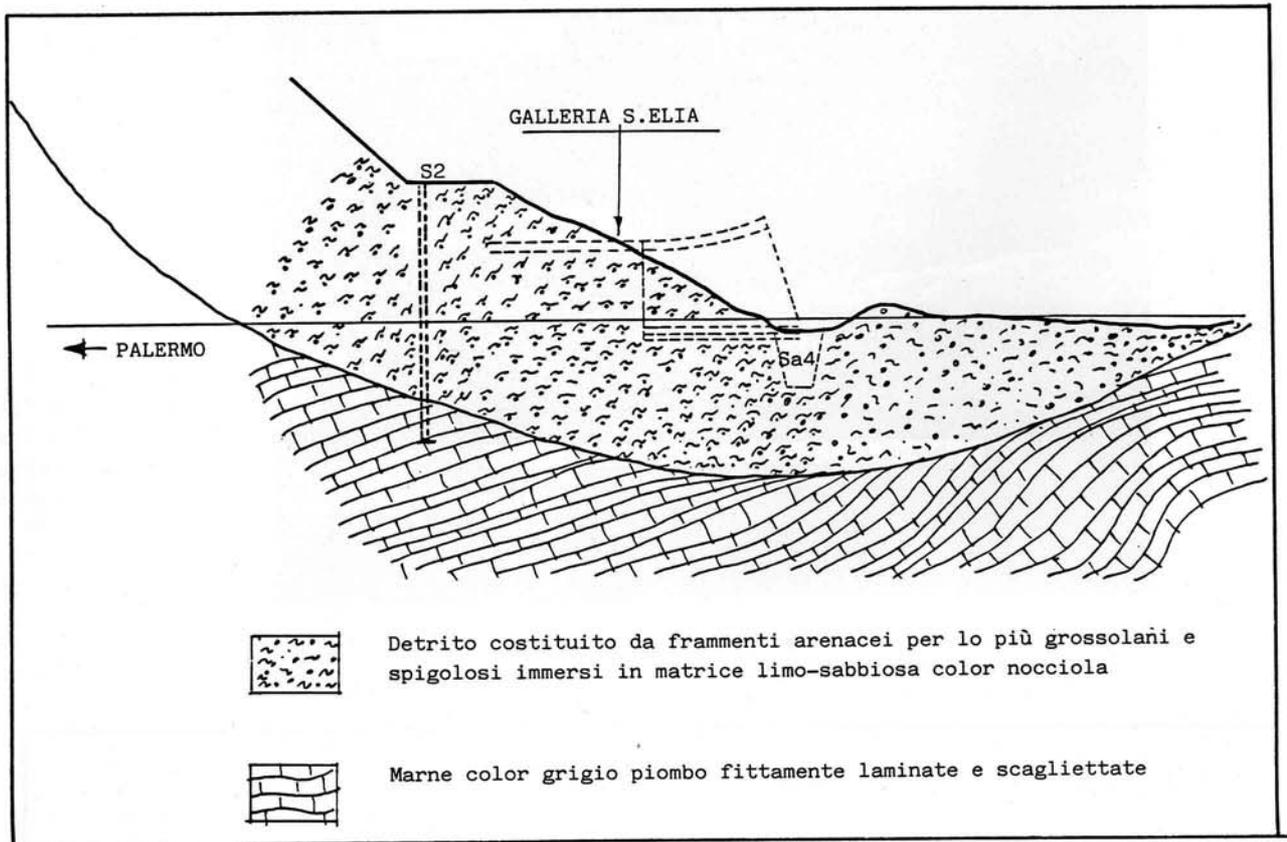


FIG. 3 - Sezione geologica in asse della pista per Palermo

da p.c., il cui livello è abbastanza suscettibile di variazioni in funzione della piovosità.

Le ricognizioni eseguite hanno evidenziato uno stato di decompressione del materiale in posto, sintomo di precaria stabilità; ciò è confermato dalla presenza sul terreno di alcune fratture di trazione.

3.2. Caratteristiche geotecniche

Le prove S.P.T. in foro eseguite nella zona indagata hanno fornito valori medi superiori a 30 colpi/piede; tuttavia si deve considerare che nella zona presso i portali della galleria "S. Elia" vi è abbondante presenza di materiale litoide grossolano che può influenzare i risultati della prova portando a valori eccessivamente ottimistici.

Su questa base si è ritenuto quindi di attribuire ai terreni in esame, per i necessari calcoli di verifica, i seguenti parametri geotecnici medi di prima analisi :

- peso di volume 1,8 ÷ 2 t/mc
- angolo d'attrito efficace 30 gradi
- coesione efficace 0 t/mq

3.3 Stabilità generale del versante

L'imbocco della galleria interessa, per uno sviluppo di circa 40 m a partire dall'inizio della galleria naturale, un deposito detritico come già descritto.

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

Il progetto originario prevedeva di risolvere il problema operando lo spostamento più a monte della strada mediante la realizzazione di una profonda incisione del versante.

L'esame diretto in situ, ed i risultati della campagna geognostica hanno portato ad escludere, in accordo con la D.L., la possibilità di adottare questa soluzione, per una serie di motivi :

- lo spostamento dell'attuale strada provinciale verso monte comporterebbe la creazione d'incisioni non trascurabili sulla coltre detritica già in stato d'equilibrio precario e quindi la necessità di realizzare

- adeguate opere di consolidamento 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;
 - l'impossibilità di eseguire sbancamenti con scarpate a pendenza 1/1, anche se in via provvisoria, come risulterebbe imposto dalla presenza di costruzioni preesistenti limitrofe;
 - la lunghezza dei tempi esecutivi, senza considerare i rischi connessi all'innescio di fenomeni deformativi non contenibili sul versante in oggetto.

In considerazione di quanto su esposto, l'Impresa ha elaborato una variante operativa con l'adozione di un sistematico pre-consolidamento mediante jet-grouting delle zone di imbocco delle gallerie naturali e di fondazione delle gallerie artificiali e dei portali, eliminando la necessità di spostare la strada provinciale e di interrompere il traffico ed eliminando ogni disturbo al versante.

4. CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO

4.1. Determinazione dei parametri operativi

Colonna N°	Profondità m	Pressione atm	Quantità cemento qli/m	Quantità miscela l/m	Rapporto H ₂ O/ccm. miscela	Tempo di estrazione sec. per 4 cm	Volume totale rifluito l	NOTE
1	5.00	300	2,5	333	100 γ = 1,50	15	450	Si aprono fessure parallele alla scarpata
2		500	2,5	333		11	700	Si nota l'aprirsi di fessure parallele alla scarpata durante l'iniezione
3		400	1,5	200		8	200	L'acqua di perforazione si disperde nel terreno
4		400	1,5	200		8	300	L'acqua di perforazione esce bene per tutto il foro
5		400	1,5	200		8	nullo	L'acqua di perforazione si disperde
6		400	2,5	333		13	500	Si aprono fessure parallele alla scarpata

TAB. 1 - Modalità esecutive delle colonne jet-grouting di prova

Per la determinazione dei parametri operativi ottimali per le operazioni di jet-grouting, sono state eseguite 6 colonne di prova combinando variamente passo, dosaggio della miscela, pressione e velocità di iniezione. La zona di prova più rappresentativa è stata individuata in prossimità dell'imbocco lato Messina, in corrispondenza della scarpata intermedia alle due piste, alla quota del piano di lavoro per l'imbocco della pista di monte, cioè a quota -5.00 m circa rispetto all'intradosso del rivestimento della galleria naturale, con l'andamento planimetrico indicato (Fig. 4). Le modalità esecutive delle colonne di prova sono riportate nella Tab. 1.

4.2 Scelta dei parametri ottimali

La messa a nudo delle colonne di terreno consolidato di prova è stata effettuata dopo una maturazione di 3 giorni; è stata riscontrata la presenza casuale di grossi massi che, abbinata alla disomogeneità del terreno, ha portato all'ottenimento di zone continue di terreno trattato in cui la miscela cementizia ha rimescolato e consolidato la componente argillosa, avvolgendo i blocchi presenti in essa, e formando delle lame di "laquage" che si dipartono per oltre un metro dall'asse delle colonne. In base all'esame delle colonne di prova sono state prese le seguenti decisioni operative :

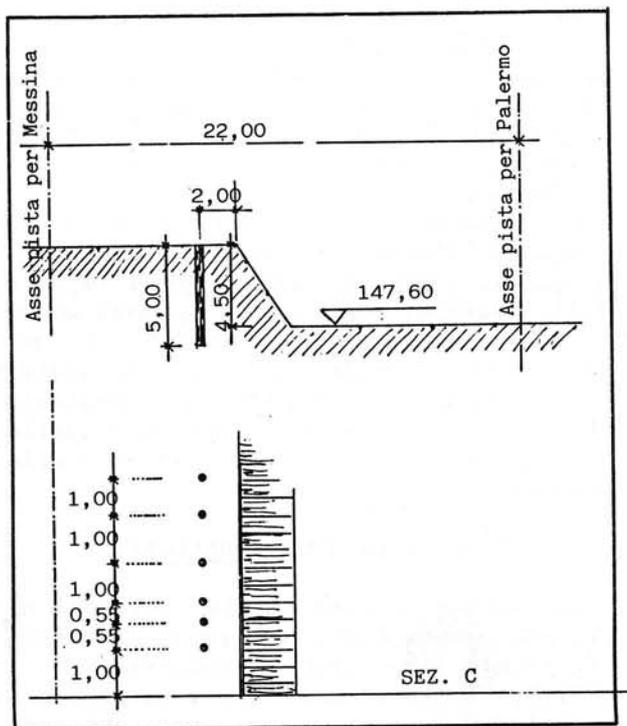


FIG. 4 - Schema geometrico colonne consolidate di prova

- adottare i parametri operativi impiegati nelle colonne 3, 4 e 5;
- diminuire l'interasse per le colonne verticali, portandolo a 0,45 m, e fissare a 0,40 m l'interasse delle colonne di consolidamento orizzontale, per tenere conto della disomogeneità del terreno, della presenza dei trovanti e delle possibilità di deviazione, anche rilevanti, durante la perforazione.

4.3. Schema geometrico del consolidamento

Nel quadro della già citata precaria stabilità del versante, l'impostazione generale è stata quella di non aprire uno scavo, se non dopo averne stabilizzato le future pareti perimetrali. E' stata perciò attuata una sistematica campagna di consolidamento su tre direttrici principali :

- per il fronte di attacco dei due fornicci, il terreno è stato consolidato eseguendo una paratia di colonne verticali in jet-grouting che operi da contenimento dello scavo per la preparazione degli imbocchi di accesso alla galleria e che eviti così

decompressioni del versante in adiacenza alla strada provinciale (Fig. 5a);

- per il perimetro delle due canne è stata consolidata la fascia di terreno all'estradosso del profilo teorico di scavo, in modo da impedire convergenze nel futuro cavo, evitando così anche il pur minimo cedimento del corpo stradale (Fig. 5b);
- per le zone di fondazione delle gallerie artificiali e dei portali, è stato eseguito un trattamento di jet-grouting verticale, in ragione di una colonna ogni 3 mq. circa, essenzialmente per incrementare la resistenza a taglio del terreno senza alterare l'equilibrio geoidrologico sotterraneo, né innescare decompressioni nel versante, eliminando la necessità di un approfondimento eccessivo delle fondazioni dei manufatti (Figg. 5).

5. CONCLUSIONI

5.1. Risultati geotecnici

La tabella 2 riporta i principali risultati delle prove comparative sui terreni prima e dopo il consolidamento. I valori di C (coesione, espressa in ton/mq.) e di φ (angolo di attrito interno) dei campioni di terreno naturale sono stati ottenuti con prove triassiali anisotropiche non drenate, sia da campionature del sondaggio preliminare S2 e della trincea Sa4, sia da prelievi effettuati durante lo scavo di preparazione degli imbocchi, dove soltanto il campione N° 25 è indisturbato.

I campioni di terreno consolidato (Foto 2) sono stati prelevati come cubi, e sono stati poi formati in laboratorio in carote di 50,4 mm di diametro per 100,8 mm di lunghezza; la prova triassiale di questi ultimi campioni è stata eseguita con cella Hoek da 70 Mpa.

Ogni campione indicato è composto da tre provini ad ognuno dei quali è stato imposto un σ_3 multiplo del precedente fino ad ottenere graficamente tre punti giacenti sulla stessa retta (Figg. 6 e 7). La pressione piezometrica viene calcolata analiticamente nel primo gruppo di campioni, mentre viene trascurata nella prova triassiale Hoek del secondo gruppo.

In conclusione, si può ritenere estremamente soddisfacente il risultato

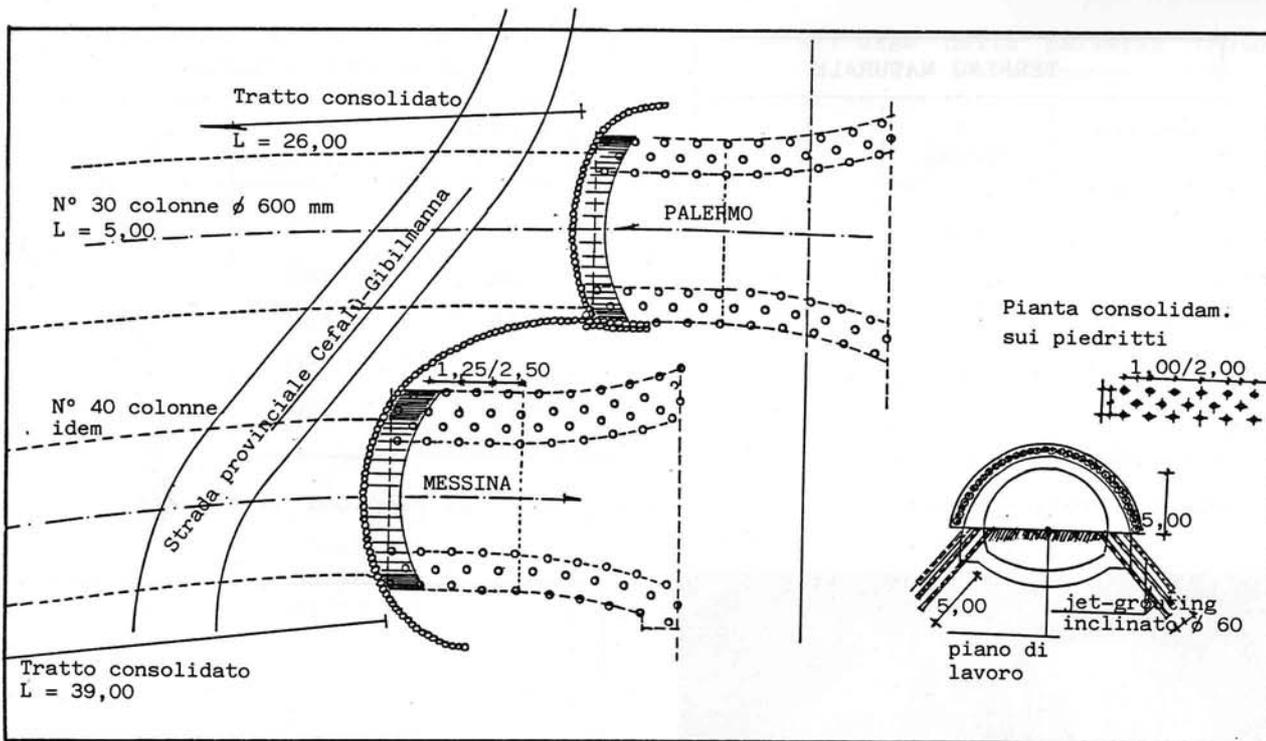


FIG. 5a - Planimetria generale dei consolidamenti verticali

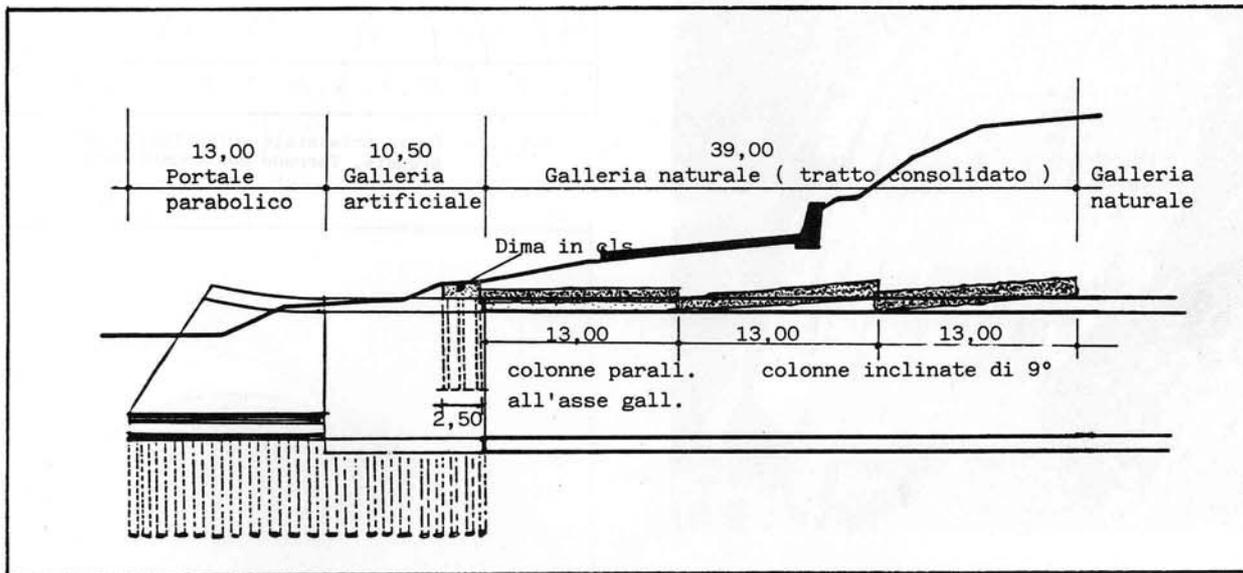


FIG. 5b - Sezione del consolidamento in asse pista per Messina

degli interventi di consolidamento, in quanto si sono avuti aumenti del valore medio della coesione da 1,8 a 134 ton/mq. e del valore medio dell'angolo di attrito interno da circa 17° a circa 40°. Tre prove di taglio diretto (tipo Hoek) sul terreno consolidato hanno confermato quanto sopra, con valori medi

di 112 ton/mq. per la coesione e 36° per l'angolo di attrito interno.

5.2. Considerazioni tecnico-operative

A parte la ragionevole sicurezza dell'ottenimento di buoni risultati tecnici nell'impiego del jet-grouting

TERRENO NATURALE			TERRENO CONSOLIDATO		
Campione N°	C Ton/mq	φ	Campione N°	C Ton/mq	φ
21	1,5	17°	31	120	39°
22	2,0	16°	32	150	41°
23	1,9	17°	33	130	39°
24	2,0	18°	34	150	40°
25	1,6	15°	35	120	38°

TAB 2 - Prove comparative triassiali e di taglio su campioni di terreno prima e dopo il consolidamento.

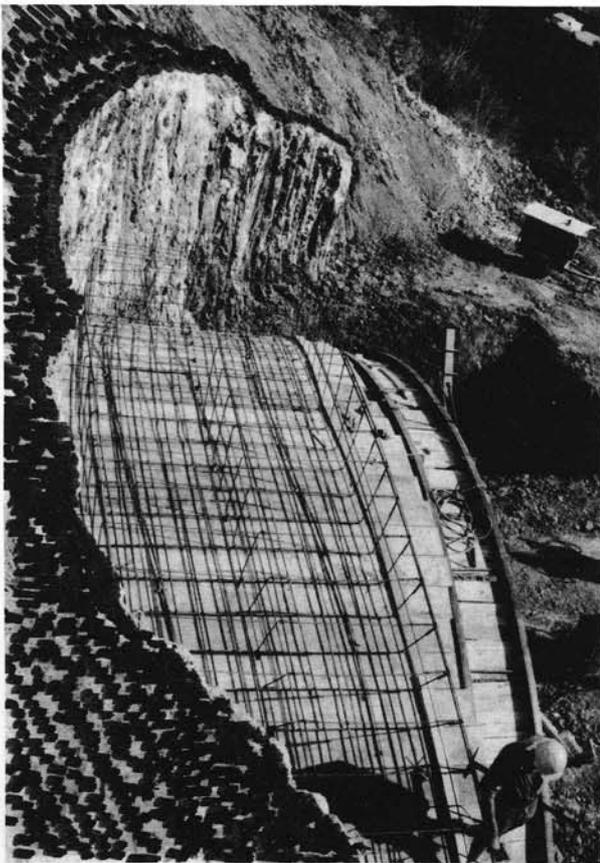


Foto 2 - Vista della paratia verticale di terreno consolidato e preparazione della dima di centraggio per il trattamento di jet-grouting orizzontale.

come mezzo di consolidamento, un fattore importante nell'ottica dell'Impresa utilizzatrice è stata la relativa rapidità dei tempi di esecuzione e la modesta interferenza con il programma dei lavori, favorita, indubbiamente, dalla possibilità di lavorare su due fornici adiacenti in parallelo. Per

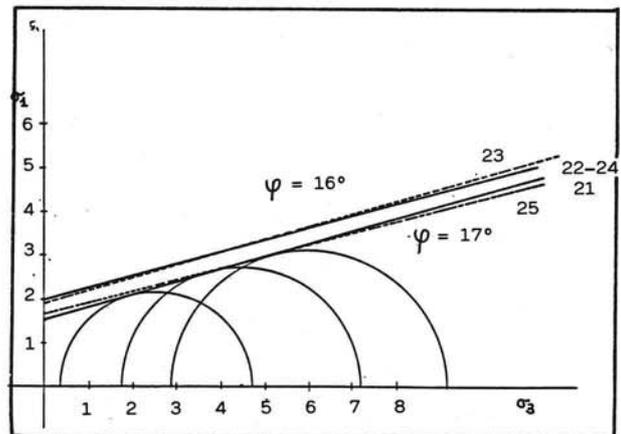


FIG. 6 - Prova triassiale anisotropica non drenata. Terreno non consolidato

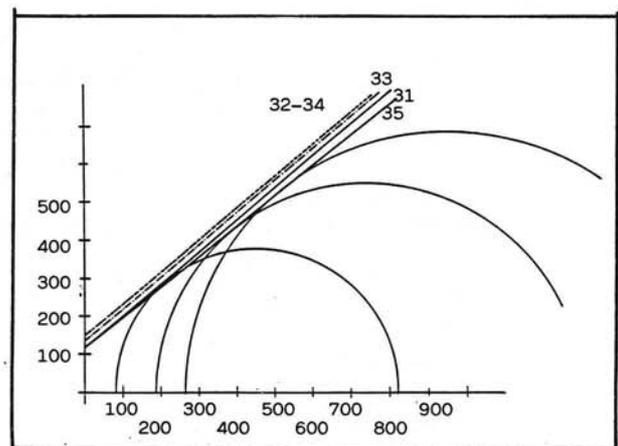


FIG. 7 - Prova triassiale Hoek. Terreno consolidato

poter lavorare su due fornici in parallelo è obiettivamente stato imperativo ricorrere alla creazione, in via preventiva, dell' "effetto arco", indispensabile a garantire la stabilità in assenza di pur minime convergenze del cavo.

In pratica la realizzazione degli interventi di consolidamento dello attacco e dello scavo della galleria può essere schematizzata in sei fasi distinte, realizzate da prima nel fornice di valle e proseguite poi, alternate, su quello di monte :

Fase 1 - esecuzione dello sbancamento di approccio previa stabilizzazione con interventi di jet-grouting in verticale;

Fase 2 - realizzazione, ove necessario, di un aureola di fori drenanti e trattamento con jet-grouting orizzontale della calotta per 13 m oltre il fronte d'attacco. Le colonne orizzontali di terreno consolidato, compenstrate, sono state eseguite ad interasse di 40 ± 45 cm in zona calotta e di 50 cm in zona reni;

Fase 3 - avanzamento a sezione parzializzata per circa 10 m, posizionamento delle centine e applicazione 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 una eventuale nuova serie di drenaggi e di un successivo tratto (circa 13 m) di colonne di terreno consolidato inclinate in calotta del 9% max. rispetto

all'asse della galleria (Foto 3), poste ad interasse $i = 45 \pm 50$ 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 consolidato ed applicazione 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.

La funzione principale della fascia di terreno consolidato mediante jet-grouting è impedire gli allentamenti immediati che si ripercuoterebbero direttamente in superficie con grave danno per la sovrastruttura stradale e gli edifici civili, e ripartire le spinte dissimmetriche che si manifestano nel lungo termine ridistribuendole sul rivestimento definitivo, che potrà essere così di spessore più contenuto.

Considerate le piccole coperture esistenti tra la calotta della futura galleria e la strada provinciale, i carichi permanenti ed accidentali dinamici dovuti al transito veicolare, si è calcolato che la fascia di terreno consolidato realizzata all'estradosso della galleria poteva essere sollecitata da tensioni di compressione dell'ordine



FOTO 3 - Esecuzione del preconsolidamento sub-orizzontale in calotta.

di 600 t/mq e da tensioni tangenziali di circa 30 t/mq, valori compatibili, in via provvisoria, con la resistenza del terreno trattato. A fronte di tali sollecitazioni si possono prevedere convergenze radiali massime millimetriche.

Lo strato di spritz-beton armato con rete elettrosaldata, agendo a stretto contatto con il terreno trattato, agisce da manto protettivo che, in virtù delle elevate caratteristiche meccaniche che lo contraddistinguono, è in grado di fornire una pressione di confinamento superiore a 20 t/mq, e quindi di incrementare la resistenza delle colonne jet-grouting.

Esso costituisce, in accordo con i principi informativi caratterizzanti l'intervento proposto, un importante elemento di transizione, con rigidità intermedia tra quella del terreno consolidato e quella del rivestimento definitivo: in caso di sisma sarà così estremamente smorzato l'effetto delle onde di taglio su quest'ultimo che, risultando meno sollecitato, potrà garantire la tenuta della canna, pur immersa in una massa di materiale incoerente.

Il compito del manufatto in calcestruzzo armato con centine e chiuso con arco rovescio è, infine, impedire i cedimenti a lungo termine che possono essere conseguenza di fenomeni a carattere viscoso o di spinte singolari fortemente dissimmetriche, non certo improbabili all'interno di una massa incoerente a granulometria fortemente eterogenea facilmente influenzabile, a fronte delle ridotte coperture, anche dagli eventi meteorici esterni.

5.3. Considerazioni economiche

Il metodo di consolidamento mediante jet-grouting, pur non essendo in assoluto una procedura economicamente poco impegnativa, garantisce un ottimo rapporto finale tra costo e qualità/sicurezza del risultato (ove, ovviamente, sussistano i necessari presupposti geomorfologici). In particolare per l'intervento sopra descritto, a parte ogni altra considerazione di ordine viario, si è riscontrato anche un modesto risparmio nell'impegno di spesa, come desumibile dai dati di massima esposti in tabella 3.

- Intervento di consolidamento con jet-grouting per sottopassare la strada provinciale	a corpo	610	
- Prolungamento muro di controripa a monte	ml 20	25	
- Ulteriore galleria naturale in sostituzione delle artificiali	ml 39	<u>275</u>	
		910	910 +
- Costo delle gallerie artificiali abolite	ml 59	575	
- Economia per la non esecuzione delle deviazioni della strada provinciale	a corpo	156	
- Economia sui necessari interventi di consolidamento del versante	a corpo	219	
- Economia per le mancate espropriazioni	a corpo	<u>69</u>	
		1019	<u>1019 -</u>
Importo totale delle economie			109

TAB. 3 - Schema comparativo dei costi di esecuzione dei lavori in alternativa (in milioni di lire).