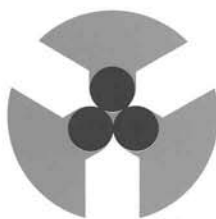


SOCIETÀ ITALIANA GALLERIE



**IL CONSOLIDAMENTO DEL SUOLO E DELLE ROCCE
NELLE REALIZZAZIONI IN SOTTERRANEO**

***SOIL AND ROCK
IMPROVEMENT IN UNDERGROUND WORKS***

Milano, 18-20 Marzo 1991

R. Bonasso, P. Ricci, P. Lunardi, A. Focaracci

**L'IMPIEGO DEL JET-GROUTING PER LO SCAVO DI UNA
GALLERIA URBANA A DEBOLE PROFONDITÀ**

JET-GROUTING IN A URBAN TUNNEL WITH LOW COVER

ESTRATTO/REPRINT

ATTI
PROCEEDINGS

VOL. II

L'IMPIEGO DEL JET-GROUTING PER LO SCAVO DI UNA GALLERIA URBANA A DEBOLE PROFONDITÀ

JET-GROUTING IN A URBAN TUNNEL WITH LOW COVER

Riccardo Bonasso, Ferrocemento S.p.A., Roma, Italia
Paolo Ricci, Ferrocemento S.p.A., Roma, Italia
Pietro Lunardi, Università di Parma, Parma, Italia
Alessandro Focaracci, Rocksoil S.p.A., Milano, Italia

Dopo aver esaminato brevemente le caratteristiche idrogeologiche nell'area in cui è inserita l'opera in esame, gli Autori descrivono i criteri progettuali e le soluzioni tecniche adottate nella realizzazione del sottopasso della Via C.Colombo a Roma.

The new subway in C.Colombo str. links the Ostiense ring-road and speeds up the traffic in a congested road-junction where the traffic is expected to increase as soon as the neighbouring Air Terminal will start working.

The first project included an excavation between diaphragms, that should have been done cutting C.Colombo str.

For that reason and for all the problems connected with the moving of the underground services, the above-mentioned project was set apart.

In July 1989 Ferrocemento Costruzioni and the Roman building company Lavori Pubblici S.p.A. proposed a project for the subway as a natural tunnel. In this way the traffic (10,000 cars/h) can continue without being interrupted.

The choice of the lay-out had to satisfy contrasting demands such as:

- the subway should not be too deep, in order to avoid long access slopes and a close contact with the water bed;
- the subway should not be too superficial, in order to prevent damages to the soil layer that contains the main lines of underground services.

The main part of the chosen lay-out is the 100 m natural tunnel under Via C.Colombo that joins the access and exit slopes, respectively 17 m and 218 m long, built between two diaphragms.

The tunnel standard section has an internal ray of 5.1 m and ground cover of 6.2 m. The underground route is entirely bending, it shows a 75 m ray and a 80° angle.

The major problems are those of the building of the natural tunnel in soil with poor geotechnical characteristics partially immersed in water, under less than 5 m covers and subjected to the dynamic forces of the traffic above.

The project, set up by Prof. P. Lunardi RockSoil S.p.A. of Milan takes advantages of the horizontal jet-grouting technique that leads to a solution of the statical and stability problems and permits a full-section, larger than 12 m excavation. The numerical calculation, carried out by a plane, non linear f.e.m., permitted the evaluation of the stress-strain behaviour of both soil and structure during the intermediate times, according to the chronological sequence of the stages of construction.

1. PREMESSA

Il nuovo sottopasso della Via C. Colombo permette di realizzare il collegamento con la circonvallazione Ostiense e di snellire il traffico in un nodo già congestionato, per il quale si prevede un ulteriore incremento del flusso veicolare con l'entrata in servizio del vicino Air terminal.

Il progetto originario prevedeva uno scavo tra diaframmi, realizzato interrompendo la C. Colombo. Per questo motivo e per i problemi connessi con lo spostamento dei sottoservizi presenti, il progetto stava per essere accantonato quando nel

Luglio 1989 la FERROCEMENTO Costruzioni e Lavori Pubblici S.p.A., impresa romana di lavori generali, presentò una proposta che prevedeva la realizzazione del sottopasso in galleria naturale.

La scelta del tracciato e della livelletta doveva rispondere alle contrastanti esigenze di non essere troppo profonda, per evitare rampe di accesso troppo lunghe e un eccessivo contatto con la falda, e nemmeno troppo superficiale per non creare danni alla fascia di terreno in cui sono posizionate le principali linee di sottoservizi.

In questo modo il traffico veicolare (10.000 veicoli/ora) poteva proseguire ininterrottamente senza alcuna limitazione.

L'elemento principale dell'opera è costituito dal sottoattraversamento della Via C. Colombo, realizzato completamente a foro cieco, della lunghezza di 100 m, che raccorda due rampe d'ingresso e uscita, rispettivamente di 179 m e 218 m, realizzate invece tra due ordini di diaframmi in c.a.

La sezione tipo in galleria ha un raggio interno di 5.10 m e un'altezza massima in calotta rispetto al piano stradale di circa 6.20 m.

Il tracciato in sotterraneo si sviluppa interamente lungo una stretta curva di 73 m di raggio, descrivendo un angolo di circa 80°.

Le problematiche fondamentali sono connesse alla realizzazione della galleria naturale in terreni dotati di scarsissime caratteristiche geotecniche, parzialmente immersi in falda, con valori di copertura inferiori a 5 m e sotto l'azione di carichi dinamici indotti dal flusso veicolare soprastante.

Il progetto, messo a punto grazie alla consulenza della ROCKSOIL S.p.A. del Prof. P. Lunardi di Milano, si è basato sull'applicazione della tecnologia del jet-grouting orizzontale, che ha permesso di risolvere i problemi statici e di stabilità dell'opera realizzando uno scavo a piena sezione su un diametro di oltre 12 m.

Il calcolo numerico, eseguito mediante un modello piano a E.F. non lineare in campo elasto-plastico, ha permesso la valutazione dello stato tenso-deformativo della struttura e del terreno, nelle varie fasi intermedie di funzionamento della struttura, secondo la sequenza cronologica delle operazioni previste per l'esecuzione.

2. QUADRO GEOLOGICO GENERALE

Da un punto di vista geologico, l'area in esame è ubicata alla base di una depressione valliva, dovuta ad un vecchio affluente del fiume Tevere (Marrana della Caffarella). Tale incisione viene ad interessare depositi fluvio-lacustri, risalenti al Siciliano Sup., caratterizzati da una notevole varietà di tipi litologici (ghiaie, sabbie, argille e travertini) con intercalazioni di materiali piroclastici, in parte colmata con depositi alluvionali, a seguito di una trasgressione, risalente al periodo dell'Olocene. Questi sono costituiti prevalentemente da limo-argilloso con presenza di materiale organico; inoltre si riscontrano con il crescere della profondità, inclusioni sabbio-ghiaiose. Il tutto poggia su un complesso del Pleistocene marino (Calabriano), costituito da argille, costituente la formazione di riferimento.

L'intervento antropico ha inoltre fortemente modificato la morfologia della zona ed ha portato alla formazione di una spessa coltre di terreno di riporto (10÷15 m di potenza) su cui è stata realizzata la Via C.Colombo, asse viario a 10 corsie per il collegamento con il quartiere dell'Esposizione Universale di Roma del 1942 (EUR).

La sezione di scavo è interessata dal contatto stratigrafico tra il soprastante riporto e il deposito limo-argilloso e viene intersecata poco al di sotto del piano dei centri (cfr. fig. 1).

Da un punto di vista geotecnico le indagini condotte hanno messo in evidenza una spiccata eterogeneità del materiale di riporto, per lo più costituito da frammenti di laterizi e da elementi piroclastici, a volte a diretto contatto tra loro, a

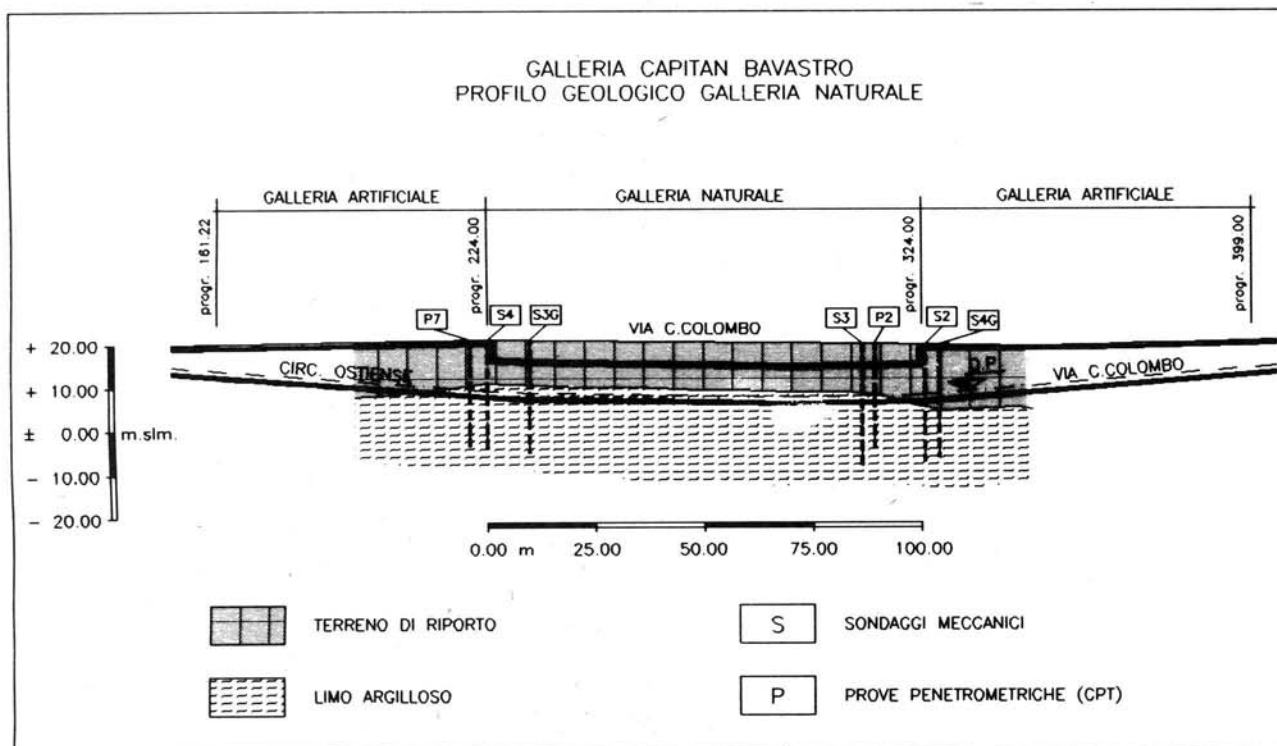


Fig. 1: Profilo geologico galleria naturale.
Tunnel geological profile.

volte immerso in una scarsa matrice limosa, ma in generale rimescolati in maniera del tutto casuale.

Il litotipo limoso-argilloso sottostante è caratterizzato dalla presenza di una marcata componente torbosa che lo rende particolarmente soffice e "areato", conferendogli caratteristiche meccaniche bassissime ($E=30+50 \text{ Kg/cm}$) in relazione anche alla presenza della falda, rinvenuta proprio al contatto tra i due terreni.

3. IL PROGETTO

L'apertura di una cavità comporta in generale una redistribuzione degli sforzi, sia in direzione trasversale che longitudinale, con conseguente incremento delle tensioni al contorno della galleria e già oltre il fronte di scavo. Il campo tensionale così generatosi dà luogo a fenomeni deformativi che tendono a far evolvere l'ammasso intorno al cavo verso una nuova situazione di equilibrio diversa dalla preesistente.

Nel caso in esame, le basse coperture in gioco unitamente alle scarse caratteristiche geotecniche del materiale e agli effetti dinamici dei carichi agenti, portano alla definizione di un quadro complessivo estremamente delicato, che consente di individuare, per la galleria in oggetto, un comportamento del fronte e del cavo sostanzialmente instabile, tipico di materiali incoerenti o semicoerenti.

I fenomeni deformativi connessi con tale redistribuzione delle tensioni sono molto accentuati e rilevanti, manifestandosi già oltre il fronte di scavo. Di conseguenza tali fenomeni producono una decompressione più spinta nell'ammasso e portano ad un decadimento progressivo delle sue caratteristiche meccaniche.

Tale decadimento fa sì che venga a mancare, nella creazione dell'effetto arco, l'apporto resistente del terreno al contorno della cavità, provocando in tal modo la mobilitazione della resistenza di fasce di terreno concentriche sempre più esterne a scapito di ulteriori deformazioni, inducendo quindi forme di instabilità irreversibile che possono facilmente coinvolgere, stante l'eseguità della copertura, anche le opere sovrastanti.

Risulta chiara dunque la necessità di procedere allo scavo della galleria mediante un criterio d'intervento preventivo di consolidamento, da realizzarsi in maniera sistematica prima dell'esecuzione degli avanzamenti, che consenta il controllo dello stato tenso-deformativo dell'ammasso, allo scopo di preservarne il più possibile le caratteristiche geotecniche medie, evitandone il decadimento altrimenti inevitabile.

In definitiva il requisito principale che si richiede all'intervento preventivo di consolidamento è la creazione di una fascia di terreno al contorno del cavo con migliori caratteristiche meccaniche prima di effettuare lo scavo, in modo di esercitare un'azione di contenimento tale da impedire gli allentamenti a breve termine e permettere così di procedere alle successive fasi di avanzamento sotto la garanzia di un "effetto arco" già operativo e non in via di formazione.

La tecnica di preconsolidamento prescelta è stata quella del jet-grouting in quanto permette da un lato di creare preliminarmente allo scavo fasce di terreno consolidato capaci di sopportare con limitate deformazioni lo scarico tensionale che si accompagna all'avanzamento del fronte, dall'altro risulta versatile ed affidabile sia nell'eterogeneo terreno di riporto sia nelle sottostanti alluvioni. L'uso di tale tecnica, unitamente all'adozione dello scavo a piena sezione con immediata chiusura dell'anello strutturale costituito dal rivestimento di 1ª fase (spritz e centine) e arco rovescio, dava le migliori garanzie sia in termini statico-deformativi, come dimostrato dal calcolo a E.F. eseguito (cfr. fig. 2), che operativi di cantiere.

L'intervento di consolidamento corrente si articolava in una doppia coronella di colonne jet-grouting ottenuta con la sovrapposizione di due trattamenti successivi della lunghezza media di 13 m su singoli step di scavo di lunghezza media 6.5 m. In questo modo si poteva operare con pressione di iniezione maggiore nei primi 6 m già contenuti nella corona di colonne precedente, e, quindi, ridurre la pressione nei restanti 6 m. Questo avrebbe consentito di evitare danneggiamenti nei

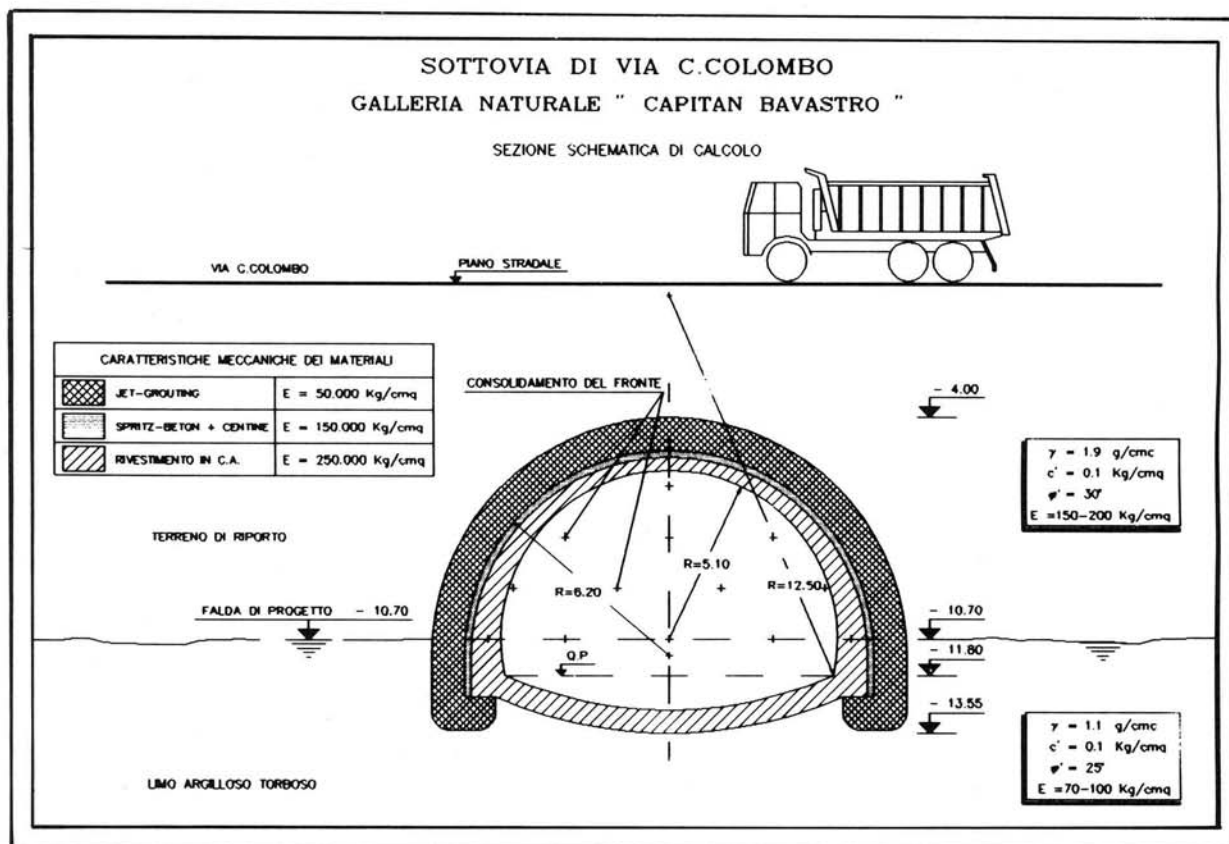


Fig. 2: Sezione di progetto.
Design standard section.

sottoservizi e inoltre ridurre la possibilità di sollevamento del piano stradale a causa delle iniezioni.

Il singolo intervento era esteso a tutto il contorno della sezione e prevedeva in una ristretta zona di calotta l'armatura delle colonne con tubi metallici $\varnothing 88.9$ mm $s=10$ mm. Il consolidamento del contorno era esteso anche al di sotto del piano di appoggio del rivestimento di prima fase per evitare locali fenomeni di punzonamento. Al consolidamento del contorno dello scavo, si è aggiunto un consolidamento del fronte con colonne consolidate armate con tubi in vetroresina della lunghezza di 12 m per ogni step di avanzamento di 6.5 m, allo scopo di effettuare uno scavo a piena sezione della galleria e, quindi, realizzare la chiusura inferiore dell'anello strutturale mediante l'immediata realizzazione, dopo ogni step d'avanzamento, dell'arco rovescio.

Mediante un'analisi numerica condotta con un modello piano a E.F. non lineare in campo elasto-plastico, è stato possibile simulare le sequenze operative previste in cantiere (consolidamenti, scavo e arco rovescio), allo scopo di valutare lo stato di sollecitazione e di deformazione durante le varie fasi di funzionamento della struttura.



Fig. 3: Attrezzatura per il jet-grouting.
Jet-grouting drilling machine.

4. STORIA DELLO SCAVO

La geometria del sottopasso ha richiesto un accurato studio degli interventi che dovevano sovrapporsi in un tracciato fortemente curvilineo con livelletta variabile. Quindi al fine di ottenere un rapido e preciso posizionamento della slitta di perforazione della sonda jetting si sono realizzate dime di traguardo che poste a tergo della macchina venivano collimate tramite un laser posizionato sulla slitta stessa.

A causa dei ristrettissimi tempi a disposizione, l'attacco veniva effettuato da entrambi gli imbocchi sfruttando l'alternanza delle fasi di consolidamento e di scavo in modo da ottenere un'accelerazione delle velocità di avanzamento.

L'abbattimento del materiale è stato condotto con escavatore dotato di dente ripper e il carico dello smarino sui dumper con pala cingolata.

Per il consolidamento in jet-grouting si è invece utilizzata un'apposita sonda jetting capace di adattarsi facilmente alla complessa geometria del trattamento (cfr. fig. 3).

Fin dall'inizio dello scavo si constatò la scadente natura delle alluvioni su cui veniva a collocarsi il piano di scavo.

Queste, già sature, venivano velocemente rimaneggiate sotto l'azione dei cingoli dei mezzi di scavo e dalle sensibili venute d'acqua provenienti dalla superficie di contatto riporto-alluvioni.

Si veniva, quindi, a creare rapidamente uno spesso strato di fango che rendeva molto difficoltose tutte le lavorazioni mano a mano che aumentava la tratta di scavo senza arco rovescio.

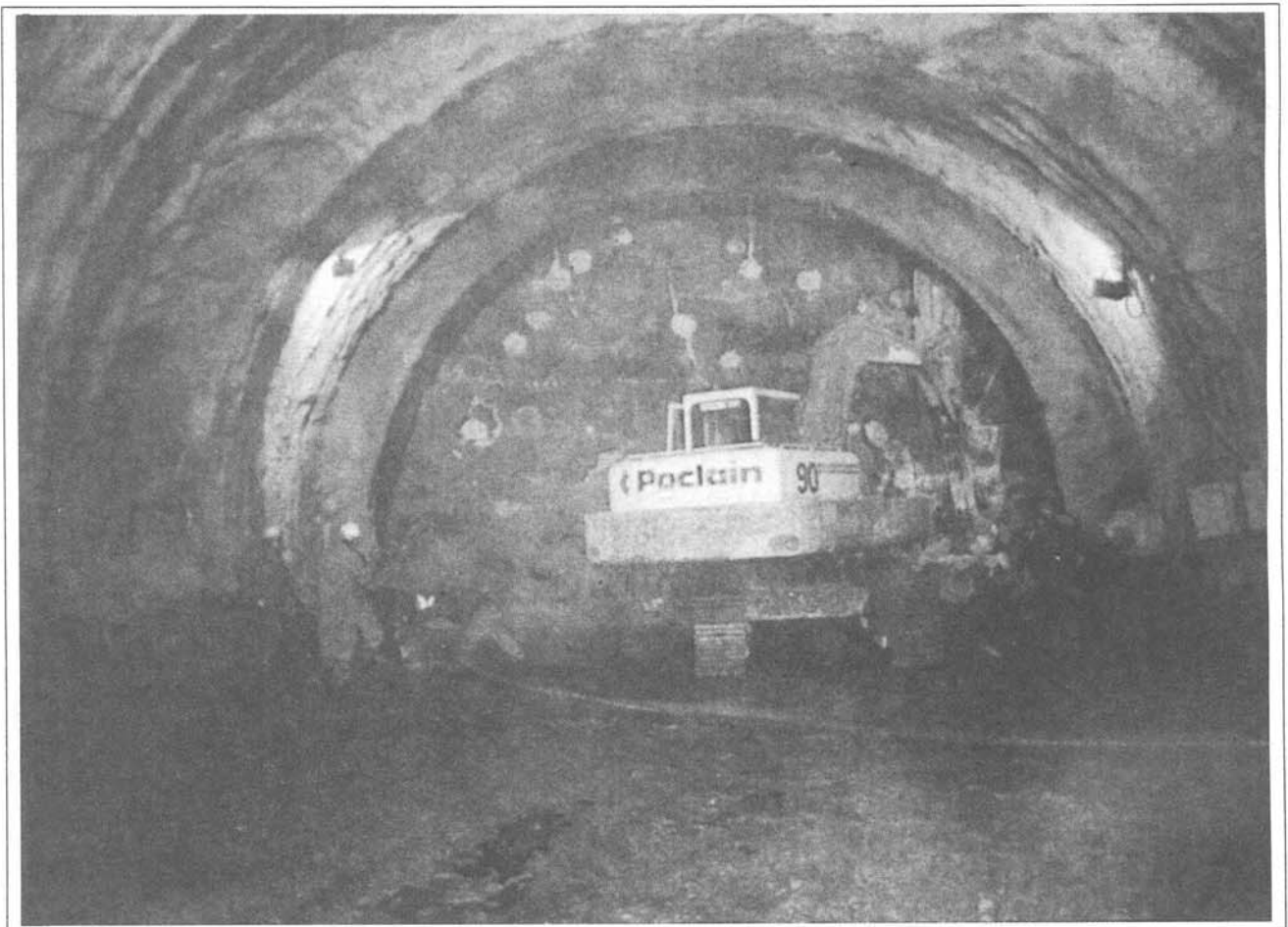


Fig. 4: Abbattimento della spalla in c.a. lato Ostiense.
Bridge abutment destruction.

A questo si aggiungeva che nella zona senza arco rovescio si aveva una sensibile influenza delle vibrazioni prodotte dalle macchine operatrici sui cedimenti dei piedi delle centine che invece si interrompeva dopo il getto dell'arco rovescio. Quindi, al termine di ogni step di avanzamento veniva realizzato il tampone di protezione del fronte in spritz-beton e, ad una distanza di 2+3 m da questo, lo scavo ed il getto dell'arco rovescio.

Durante lo scavo si è riscontrata la presenza quasi continua di manufatti ed opere d'arte anche di grosse dimensioni che si rinvenivano immersi nella massa di terreno di riporto.

Sul fronte di attacco lato Ostiense venivano incontrati prima una serie di pali in c.a. con trave di collegamento e pilastri a formare presumibilmente una spalla di ponte con piano di fondazione a circa quota 10.5 m (cfr. fig. 4).

Successivamente si rileva un fognolo in mattoni pieni di piccola sezione ($h=1$ m) con andamento trasversale alla sezione e quota di scorrimento 11.4 m e, quindi un muro di pezzame di tufo di notevole spessore (2 m) con fondazione al contatto terreno di riporto/alluvioni. Questo muro proseguiva con andamento rettilineo in direzione quasi parallela alla galleria artificiale di imbocco. La sezione del muro venne così a spostarsi sulla sezione della galleria da sinistra a destra interessando lo scavo per la quasi totalità della tratta eseguita da questo imbocco (cfr. fig. 5). Dall'altro imbocco lato Colombo analogamente fin dai primi metri scavati si sono incontrati manufatti di varia natura e consistenza. In particolare nella parte destra della sezione di scavo si sono rinvenuti due fognoli, uguali a quello incontrato sull'altro fronte, con andamento parallelo al rilevato, ma posti a quota diversa (il primo a quota di 14 m, il secondo a quota di 15.5 m). Il primo di questi fognoli risultava inoltre posto sopra un muro in pezzame di tufo di spessore 1.2 m.

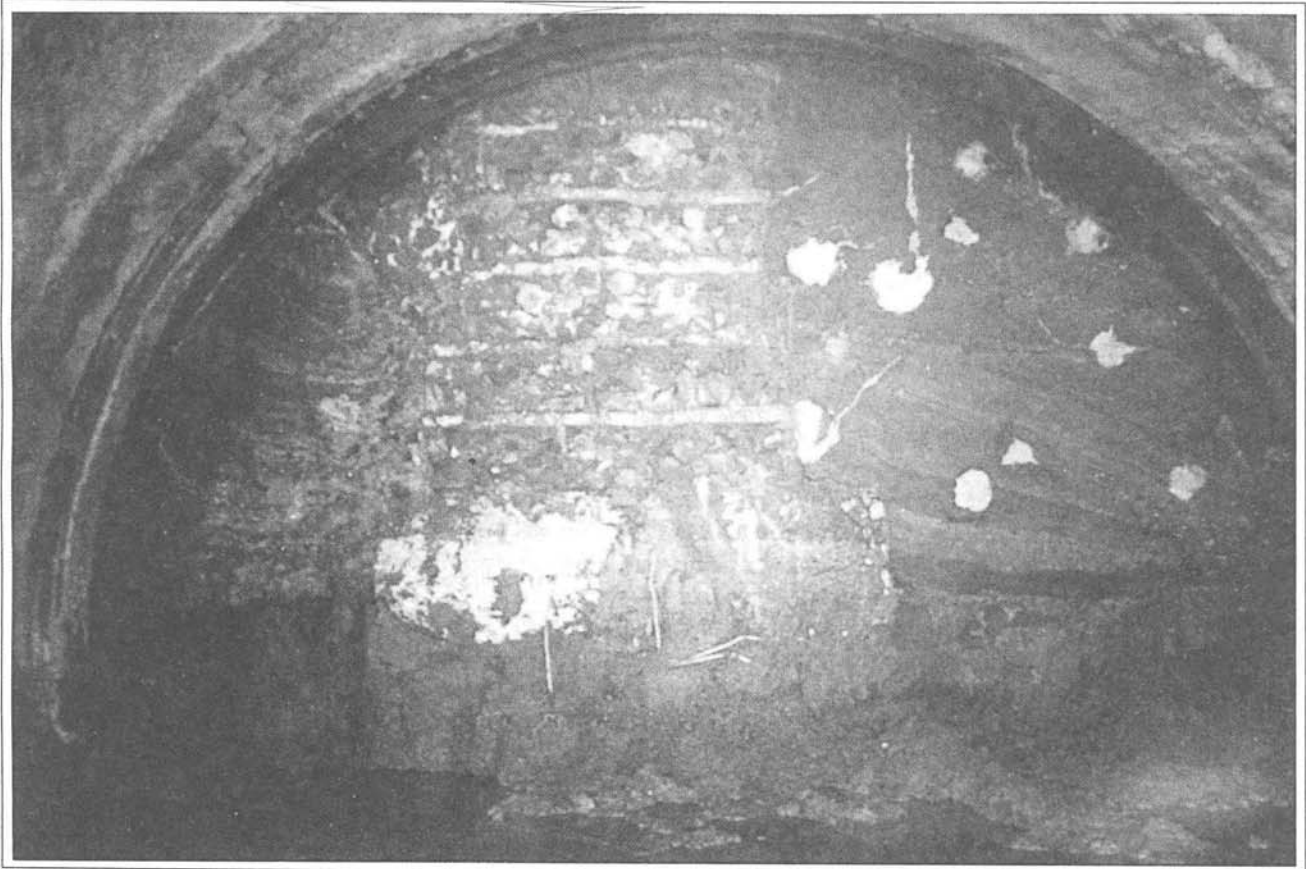


Fig. 5: Abbattimento del muro di tufo lato Ostiense.
Dry wall destruction.

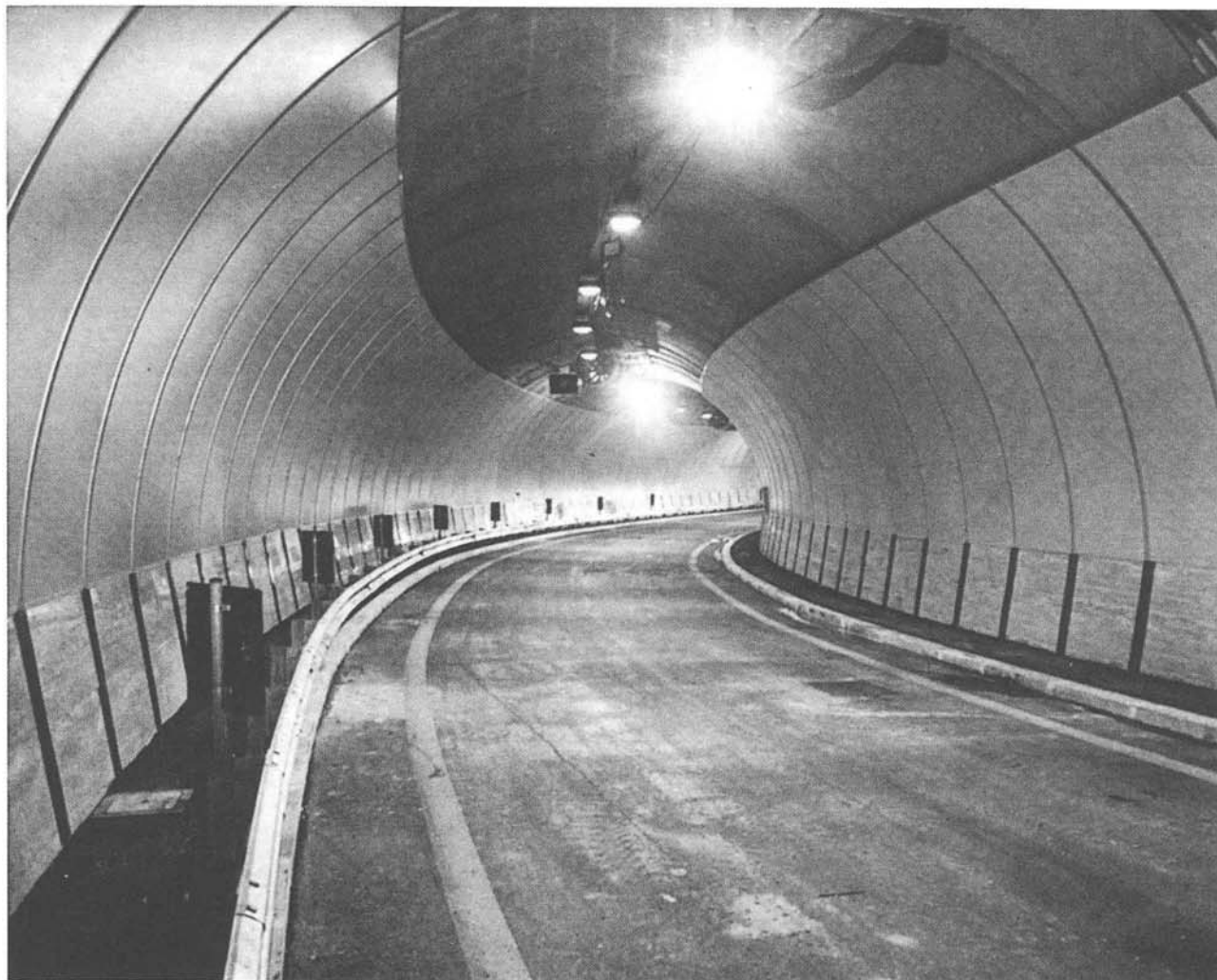


Fig. 6: Galleria ultimata.
Tunnel completed.

Con il procedere dello scavo questi manufatti venivano a spostarsi dalla destra alla sinistra della sezione per poi scomparire.

Per la demolizione dei manufatti rinvenuti si è comunque potuto far ricorso a potenti mezzi a percussione (martellone). Infatti i trattamenti eseguiti si sono dimostrati capaci di assorbire senza cedimenti le forti vibrazioni prodotte in tali occasioni. A questo proposito si deve riconoscere la particolare efficacia dell'unione del jet-grouting con le armature in vetroresina per la stabilizzazione del fronte in questi particolarmente difficoltosi passaggi.

Le venute d'acqua per entrambi i fronti di scavo sono andate aumentando con l'abbassamento della livelletta richiedendo in qualche caso il trattamento preventivo del piano di scavo con iniezioni jet-grouting che permettevano di ridurre il fenomeno di sprofondamento delle macchine operatrici.

La foratura della galleria veniva raggiunta il 21 Marzo 1990 e, quindi, a distanza di un mese veniva completato il getto del rivestimento definitivo (cfr. fig. 6).

5. MISURE IN CORSO D'OPERA

La realizzazione della galleria è stata coadiuvata da una campagna di rilevamenti di superficie e interni allo scavo.

Le misure di superficie consistevano nel controllo degli abbassamenti di caposaldi di livellazione posizionati lungo sezioni trasversali il tracciato della galleria. In aggiunta a questo, lungo la C.Colombo all'interno di una canalizzazione telefonica disposta trasversalmente all'asse della galleria e posta ad una profondità di 1.6 m dal p.c., si è potuto installare un particolare assestimento orizzontale che ha permesso di ottenere un monitoraggio praticamente continuo delle deformazioni subite dalla tubazione durante tutto il periodo di avvicinamento, passaggio ed allontanamento del fronte di avanzamento.

All'interno dello scavo sono state installate stazioni correnti di misura degli abbassamenti e di convergenza.

Alcune di queste sono state corredate anche di celle di pressione poste sotto il piede delle centine ed all'interno del rivestimento definitivo.

I valori delle deformazioni osservati sono risultati modesti e dello stesso ordine di grandezza di quelli previsti con il calcolo.

6. CONCLUSIONI

Il risultato conseguito è certamente di rilievo considerate le numerose difficoltà superate, bassa copertura, scadenti caratteristiche dei terreni attraversati, tracciato in curva a stretto raggio, intense vibrazioni prodotte dal traffico, presenza continua di acqua, interferenza con manufatti e sottoservizi, ridotti tempi esecutivi. Occorre rilevare inoltre che il costo dell'opera ed i tempi esecutivi sono stati nettamente inferiori a quelli che si sarebbero resi necessari per lo spostamento provvisorio delle importanti linee elettriche, telefoniche e condutture idriche intercettate senza considerare i notevoli disagi indotti in queste operazioni.

L'opera eseguita rappresenta certo un esempio per future realizzazioni in ambiente urbano laddove la complessità delle problematiche in superficie e l'impossibilità di soluzioni aeree induce a guardare al sottosuolo quale ormai unica fonte di nuovo spazio.

Un particolare ringraziamento agli Ing.ri Italo Leone e Paradisi della XV Ripartizione del Comune di Roma, e all'Ing. Ettore Pagani della Rocksoil S.p.A.

Lavoro:	Autostrada Messina-Palermo
Committente:	Consorzio per l'Autostrada Messina-Palermo
Impresa generale:	Pontello S.p.A.
Impresa specializzata:	Rodio S.p.A.
Progettazione esecutiva:	Rocksoil S.p.A.