



PIETRO LUNARDI
Docente Università di Firenze

PROGRESSO TECNOLOGICO NELL'UTILIZZO DEGLI SPAZI SOTTERRANEI

Oggi quando si parla di ricavare spazi nel sottosuolo di centri urbani si è portati sempre di più a pensare a scavi a foro cieco piuttosto che a cielo aperto per una serie di motivi:

- è sempre più difficoltoso, nei centri urbani, interferire con il traffico di superficie già al limite del collasso;
- l'apertura di cantieri per scavi a cielo aperto in zona metropolitana produce disservizi e danni di cui non è facile valutare i costi reali diretti ed indiretti, che dovrebbero essere tenuti in conto in sede di confronti tra costi di scavo a foro cieco ed a cielo aperto;
- i progressi compiuti in campo di progettazione di opere in sottosuolo, soprattutto per quanto concerne il calcolo numerico, permettono di affrontare la realizzazione delle stesse opere con minor alea di rischio e con la possibilità di pianificare il lavoro sia in termini di costi che di tempi esecutivi;
- il progresso tecnologico in fatto di sistemi di scavo e tecniche di consolidamento permette di affrontare tutte le situazioni di scavo a foro cieco anche nelle condizioni geotecniche più delicate, arrecando il minimo disturbo alle strutture superficiali preesistenti;
- il calcolo numerico nel campo della progettazione, con le modellazioni matematiche sempre più raffinate, e le tecnologie avanzate nel campo della costruzione, hanno contribuito a ridurre i costi delle opere in sottosuolo avvicinandoli a quelli delle stesse opere eseguite a cielo aperto.

Oggi progettare un'opera in sottosuolo in un centro urbano vuol dire saper prevedere e saper regimare i fenomeni deformativi. I fenomeni deformativi nel caso dei terreni sciolti, che sono quelli che purtroppo caratterizzano i sottosuoli dei principali agglomerati urbani d'Italia: da Milano a Roma, da Bologna a Firenze, da Genova a Napoli e Catania, tutte città dove si stanno progettando metropolitane ed opere di servizio nel sottosuolo, il progettista sa già in partenza che non può e non deve accettarli. Quindi fin dal *momento della progettazione* egli deve organizzarsi in maniera non solo da prevederli in anticipo ma anche da evitarli e bloccarli prima del loro insorgere perché il fenomeno deformativo in terreni sciolti in centri urbani, accettato anche minimamente, vuol dire collasso del cavo e quindi collasso e crollo delle opere in superficie.

Quando definiamo sciolti i terreni dei nostri centri urbani, intendiamo che mancano di coesione. Mancare di coesione vuol dire che quando si aprono gli scavi non può instaurarsi l'«effetto arco» necessario per l'autoportanza del cavo. Questa autoportanza, non avendo la possibilità di innescarsi naturalmente, bisogna crearla artificialmente, con tecnologie nuove: tecnologie di preconsolidamento o di presostegno.

In definitiva progettare significa *diagnosticare* i fenomeni deformativi e saper *produrre una terapia* per contenerli ed annullarli.

Che strumenti abbiamo a disposizione per conseguire questo obiettivo?

Se nella *fase di diagnosi* abbiamo a disposizione strumenti nuovi di previsione dei fenomeni deformativi (calcoli con le linee caratteristiche, modelli agli elementi finiti, calcoli numerici in generale), in quella di *terapia* abbiamo gli strumenti di regimazione, che ci permettono di contenere e bloccare questi fenomeni deformativi fin dall'inizio.

Passiamo brevemente in rassegna tutti questi strumenti, la cui tecnologia è stata in gran parte sviluppata in Italia e che adesso stiamo esportando in tutto il mondo.

Sono tecnologie interessanti, nuove, che hanno veramente ribaltato quello che è il modo di progettare e costruire opere in sottosuolo.

Innanzitutto ricordiamo le tecnologie tradizionali: ci riferiamo al sistema delle iniezioni tradizionali (fig. 1) eseguite in avanzamento dall'interno di un cunicolo praticato in asse alla futura galleria. Si creano così delle aureole di gusci di terreno consolidato dello spessore medio, per gallerie dell'ordine di dieci metri di diametro, di tre metri: circa un terzo di diametro.

INIEZIONI TRADIZIONALI

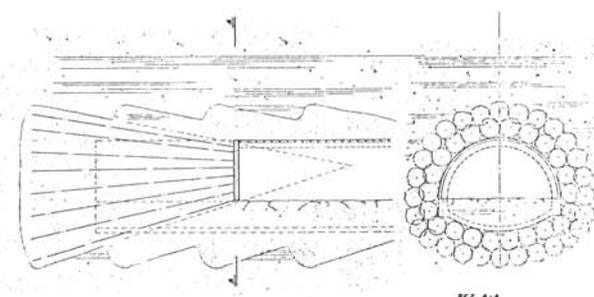


Fig. 1.

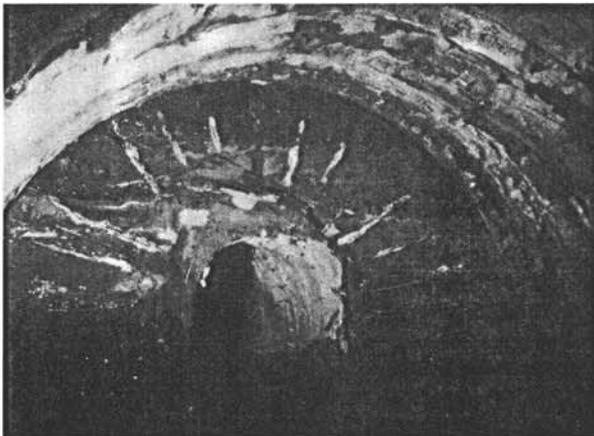


Fig. 2.

Questa tecnologia è stata impiegata per il passante ferroviario di Milano, la cui galleria corrente è stata eseguita previo scavo di un cunicolo pilota da cui sono state eseguite iniezioni radiali di tipo tradizionale al contorno dello scavo definitivo. La fig. 2 mostra il cunicolo pilota, i tubi usati per le iniezioni radiali al contorno, e come il terreno inizialmente sciolto abbia raggiunto una certa consistenza.

In alternativa è possibile operare dall'alto, cioè in verticale, creando il preconsolidamento dalla superficie per poi eseguire in sicurezza lo scavo della galleria.

Un'altra tecnologia che è stata messa a punto in questi anni proprio da noi italiani è quella del jet-grouting in orizzontale. Essa consiste nella creazione in avanzamento di gusci di terreno di buona resistenza eseguiti per accostamento di colonne di terreno consolidato in maniera da precontenere il terreno oltre il fronte di avanzamento (vedi fig. 3). In questo modo è poi possibile eseguire lo scavo protetti dal guscio e quindi in condizioni di stabilità.

La fig. 4 si riferisce alla galleria «Campiolo», scavata in detrito, dove si è realizzata la prima applicazione al mondo della tecnica di preconsolidamento mediante jet-grouting in orizzontale. La figura mostra il fronte della galleria e le colonne di terreno trattato.

JET-GROUTING ORIZZONTALE

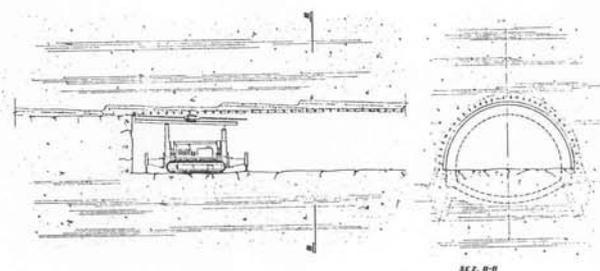


Fig. 3.

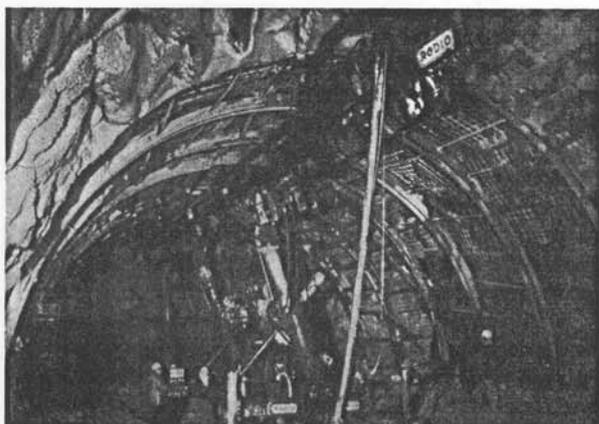


Fig. 4.

Le figg. 5 e 6 si riferiscono invece ad un sottopasso autostradale in corso di realizzazione in Brasile, nella città di Campinas: due gallerie da 15 metri di diametro, sotto lo scalo ferroviario con due metri e mezzo di copertura, in terreni sabbiosi, in falda. È certamente una delle condizioni peggiori in cui si possa operare ed è stata affrontata e superata con il sistema jet-grouting in



Fig. 5.

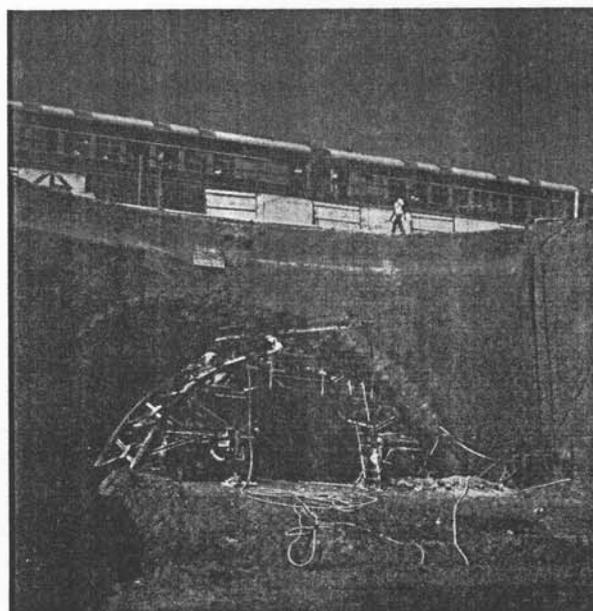
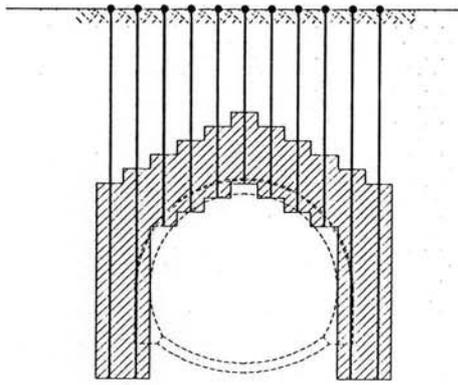


Fig. 6.

orizzontale. Si vedono gli accessi alle due gallerie e l'imbocco della galleria, addirittura di diciassette metri di diametro. Nonostante la copertura di soli due metri e mezzo il traffico ferroviario non è mai stato interrotto.

Anche il jet-grouting può essere eseguito, in alternativa, dall'alto, in verticale. La fig. 7 mostra lo schema di un'applicazione di questo tipo fatta dagli italiani per la metropolitana di Singapore dove il problema era costituito dalle argille, molto alterate nella parte superficiale, poggianti su roccia. La parte più scura è il preconsolidamento eseguito, appunto, con il sistema jet-grouting in verticale prima di eseguire lo scavo.

Un altro sistema di preconsolidamento e precontenimento, importato e perfezionato in Italia recentemente, è quello del pretaglio meccanico (fig. 8), che sfrutta l'azione di una macchina munita di una grossa lama che taglia, in avanzamento, il terreno al contorno del profilo del futuro scavo. Si realizza così una fessura sul perimetro del fronte che sarà riempita successivamente con spritz-beton fibrorinforzato. Si ottengono in pratica dei «tegoli» profondi tre metri e mezzo e sovrapposti l'uno sull'altro che proteggono il fronte e lo scavo in avanzamento permettendo di ottenere la stabilizzazione del cavo ancora prima di scavarlo. La fig. 9 mostra la macchina usata per praticare il pretaglio.



INIEZIONI TRADIZIONALI
DAL PIANO CAMPAGNA

Fig. 7.

gallerie dal diametro di circa dieci metri, si è passati a spessori di sessanta, settanta centimetri con il sistema jet-grouting in orizzontale ed a spessori di quindici centimetri con il pretaglio meccanico (fig. 10). Questo vuol dire che le tecnologie che abbiamo a disposizione ci permettono, a parità di energia impiegata, di concentrarla in spazi sempre più piccoli ottenendo incrementi di resistenza sempre più significativi.

Si è passati, infatti, dalla resistenza di $15 \div 20$ kg/cmq del terreno consolidato con il sistema tradizionale, a resistenze dell'ordine dei $50 \div 60$ kg/cmq del terreno consolidato mediante jet-grouting, a resistenze dell'ordine dei 150 kg/cmq con il pretaglio meccanico. Questo ci consente oggi di contenere lo spessore dei consolidamenti e di affinare sempre più le tecniche di avanzamento ottenendo gli stessi effetti da un punto di vista statico a parità di costi, anzi forse anche con costi ridotti.

Adesso vediamo rapidamente cosa vuol dire ricavare grandi spazi, cioè grandi luci in sotterraneo. La fig. 11 il-

PRETAGLIO MECCANICO

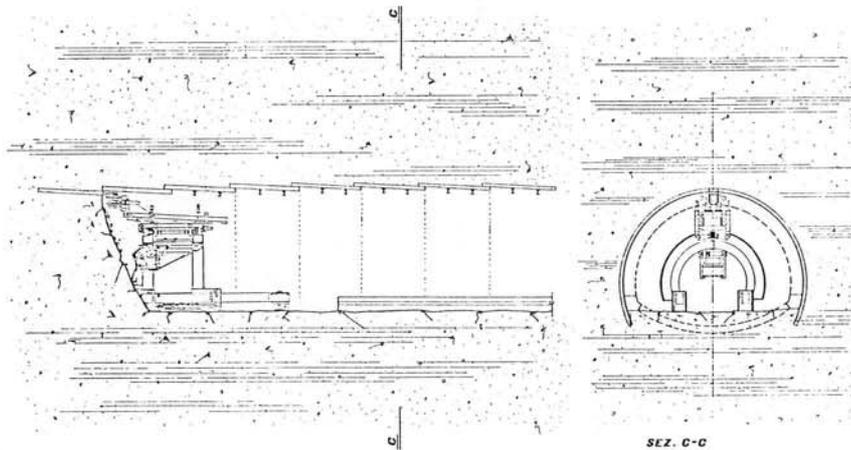


Fig. 8.

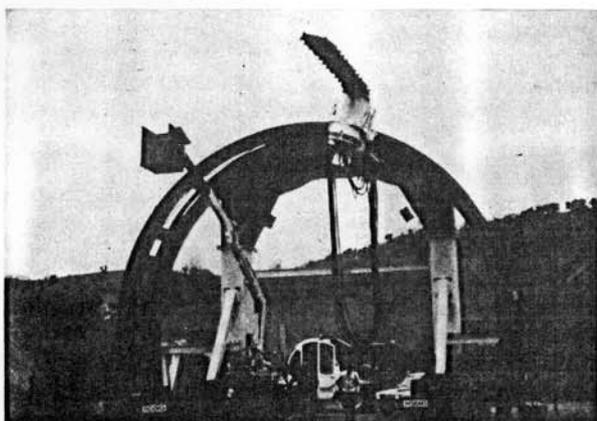


Fig. 9.

Ci sembra interessante sottolineare che con il passare degli anni e con il conseguente perfezionamento delle tecnologie d'intervento si è ridotto lo spessore necessario per consolidare il terreno attorno ad una galleria: dai tre metri circa necessari con le iniezioni tradizionali per

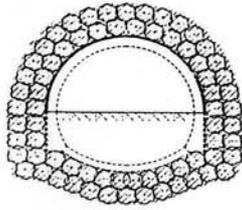
lustra l'evoluzione dei sistemi lavorativi impiegati per ricavare grandi luci in centri urbani.

Il sistema più antico, cui si ricorre a tutt'oggi dove è possibile, prevede di realizzare delle trincee a cielo aperto, costruire tutte le strutture interne e poi ricoprire.

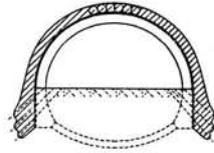
In questo modo si sono ricavate luci in sotterraneo ampie fino a circa $20 \div 30$ m. Questo tipo di lavorazione ha l'inconveniente di provocare molti disservizi al traffico in superficie e quindi anche molti costi non valutabili, ma certamente elevati.

Il sistema Anversa, adottato per la costruzione della metropolitana nell'omonima città, permette di realizzare a foro cieco luci fino a diciotto metri. Si realizza creando due piccole gallerie laterali, da queste vengono spinti, con il sistema dello spingitubo, dei tubi prefabbricati che, una volta infissi, vengono armati e riempiti di calcestruzzo. Dalle stesse gallerie si realizzano anche i diaframmi che poi devono sostenere i tubi stessi. Questi, accostati l'uno all'altro, costituiscono il tetto sotto il quale, poi, si scava l'opera.

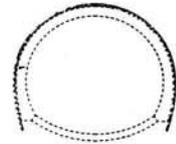
L'«Arco Cellulare» è una tecnologia nuovissima. Essa nasce dall'assemblaggio di tecniche conosciute: lo spin-



INIEZIONI TRADIZIONALI
SUB-ORIZZONTALI



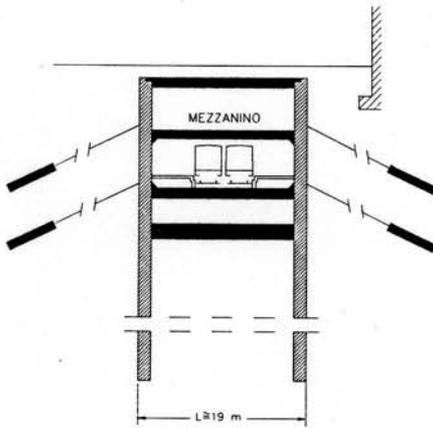
JET-GROUTING
SUB-ORIZZONTALE



PRETAGLIO
MECCANICO

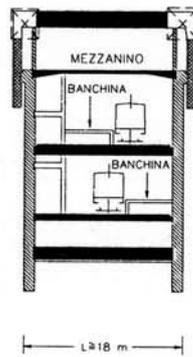
Fig. 10.

SCAVO A CIELO
APERTO



SCAVO A FORO CIECO

SISTEMA " ANVERSA "



ARCO CELLULARE

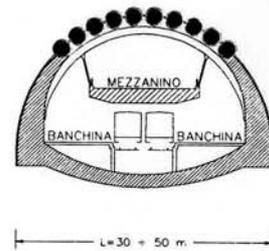


Fig. 11.

SEZIONE TIPO

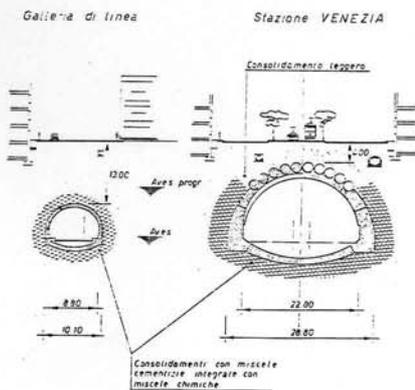


Fig. 12.

gibuto, che ad Anversa veniva eseguito in senso trasversale, in questo caso viene eseguito in senso longitudinale alla galleria, parallelamente all'asse. La fig. 12 mostra la Stazione Venezia del passante ferroviario, in concessione alla Metropolitana Milanese S.p.A., per la cui realizzazione si sta applicando per la prima volta al mondo questo sistema tecnologico. Si tratta di una galleria di trenta metri di diametro, con quattro metri di copertura e falda quasi al livello del rene. È una delle condizioni peggiori in cui si possa operare. Un'opera del genere fino ad ieri era considerata irrealizzabile. La tecnica dell'«Arco Cellulare» invece ne ha permesso la realizzazione addirittura senza alcuna interruzione del traffico in superficie. Accanto è riportata la sezione tipo della galleria corrente di 8 m di luce. Dal confronto scaturiscono evidenti le dimensioni eccezionali della galleria della Stazione Venezia.

L'«Arco Cellulare» viene costruito in più fasi successive (fig. 13):

a) consolidamento, da un cunicolo centrale di servizio, del terreno al perimetro delle future gallerie laterali;

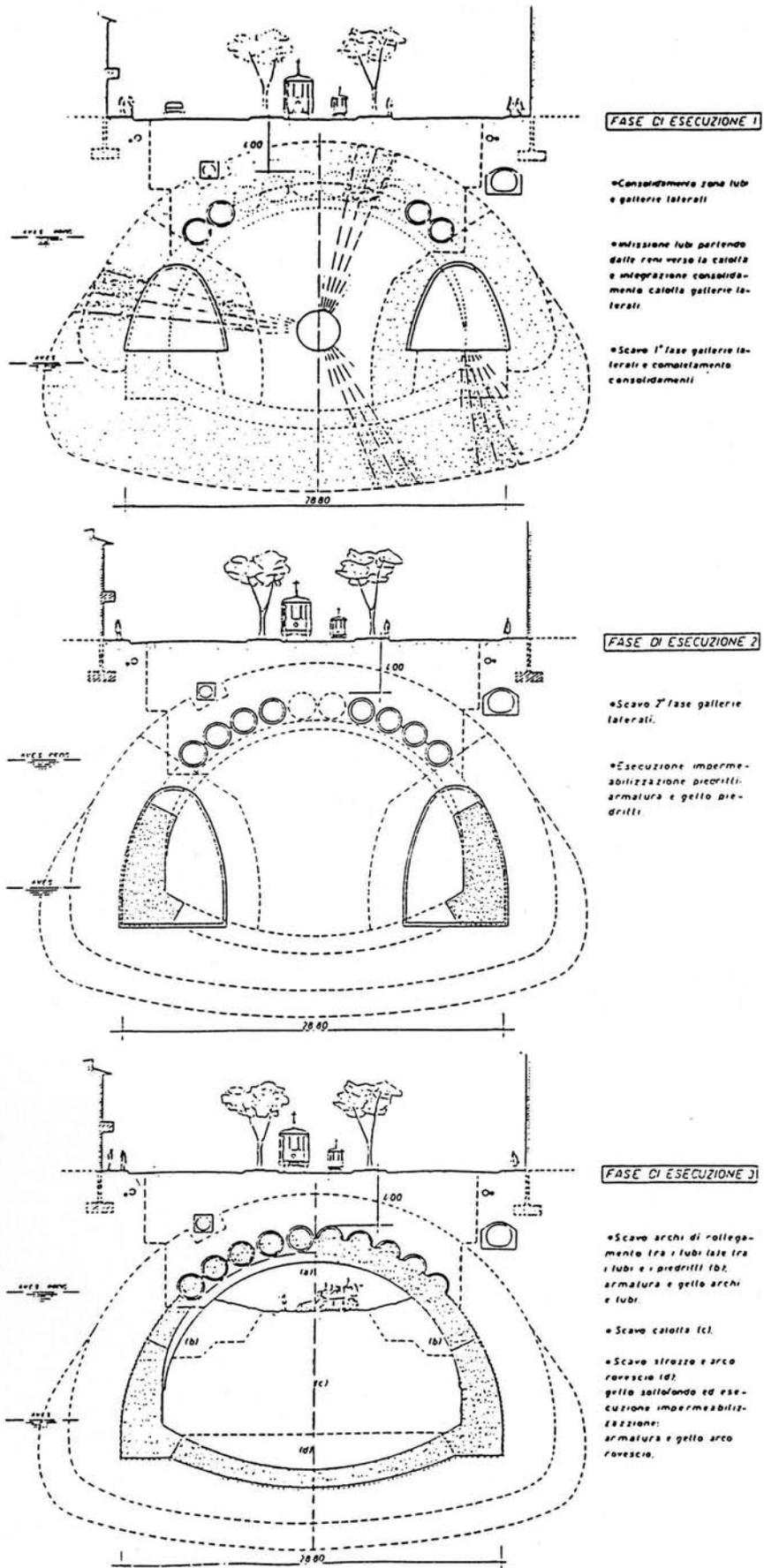


Fig. 13.

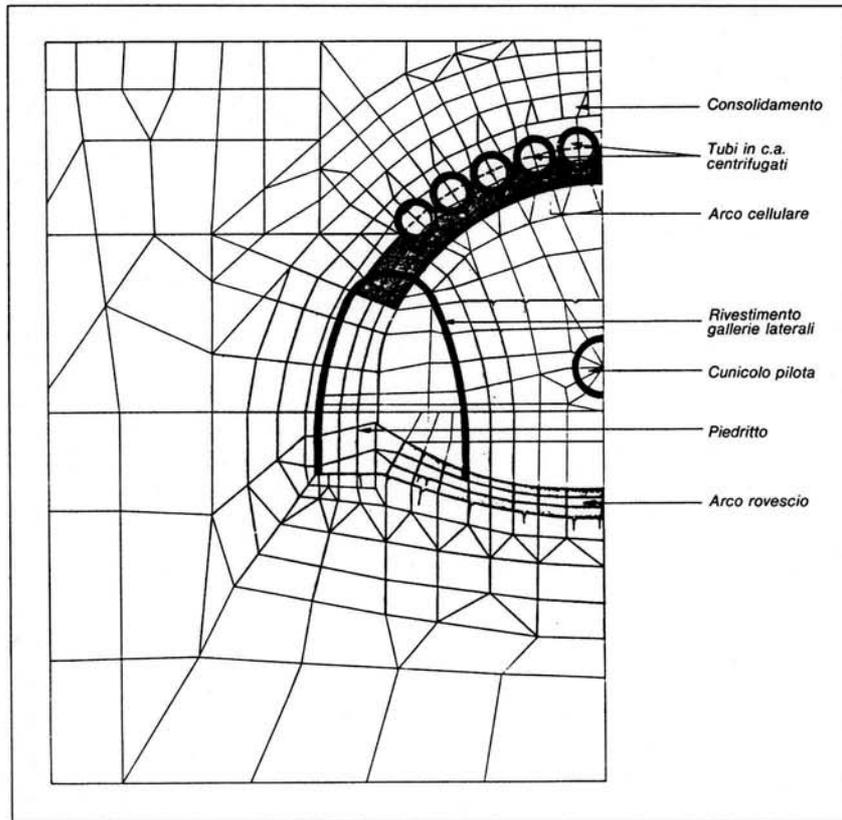


Fig. 14.

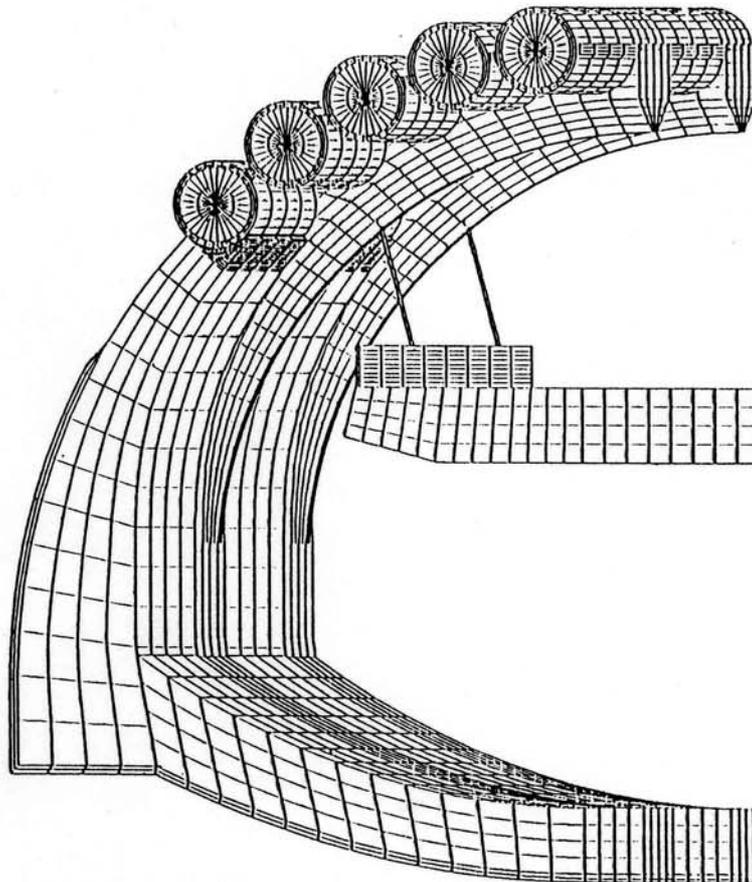


Fig. 15.

- b) scavo in due fasi delle gallerie laterali e completamento del consolidamento del terreno su tutto il perimetro della galleria di stazione, quindi getto dei piedritti in c.a.;
- c) realizzazione da un pozzo di spinta, con il metodo dello spingitubo, di 10 microtunnels costituiti da tubi in c.a. di 2.1 di diametro;
- d) scavo di gallerie di collegamento tra i microtunnels e tra questi e le gallerie laterali. Questi collegamenti costituiscono il cassero entro cui si realizzeranno gli archi cellulari;
- e) armatura e getto degli archi e dei microtunnels;
- f) scavo in più fasi della galleria di stazione e contemporanea esecuzione delle finiture superficiali della volta;
- g) scavo e getto a campioni dell'arco rovescio.

Questa struttura è da considerarsi non un preconsolidamento ma un presostegno: praticamente il terreno non era in grado di crearsi un effetto arco naturalmente quindi l'abbiamo dovuto creare artificialmente costruendo la struttura prima di scavare la galleria. Questo in pratica è il tema centrale del progetto.

In fig. 14 è riportato il modello agli elementi finiti con cui si è valutato il comportamento della struttura nelle varie fasi operative.

Vediamo poi la foto della camera di spinta, realizzata a circa un terzo della lunghezza dell'intera stazione, da cui vengono infissi i dieci tubi da cui poi partiranno le lavorazioni degli archi.

La fig. 15 mostra un modello tridimensionale della struttura realizzato mediante elaboratore, di come essa sarà una volta terminata. Internamente le dimensioni della Stazione saranno di 22 + 23 metri di diametro e circa diciotto metri d'altezza.

Vorrei, per concludere, sottolineare i meriti che hanno i tecnici della Metropolitana Milanese S.p.A., l'ing. Ognà, l'ing. Colombo, l'ing. Magliani, l'ing. Testa, l'ing. Cavagna, soluzione, per aver permesso l'esecuzione e l'introduzione di questa nuova metodologia, che è, come si è detto, la prima volta che si applica nel mondo, e ringraziare il Consorzio GIEMME nella persona dell'ing. Longo, che sta realizzando l'opera e che ha avuto il coraggio di accettare questa nuova soluzione.