

## Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'«Arco Cellulare»

Prof. Ing. Pietro Lunardi

### Riassunto

L'apertura di una cavità in terreni sciolti, se spinta oltre una certa luce di scavo, non è realizzabile con le metodologie tradizionali, specie se la copertura è ridotta come nel caso delle stazioni metropolitane, perchè non è possibile ottenere un consolidamento del terreno al contorno del cavo sufficiente per omogeneità e resistenza.

L'«arco cellulare» è una nuova metodologia costruttiva, ideata dallo scrivente, che consente di superare le difficoltà mediante la realizzazione dell'intera struttura portante, di contenimento del terreno e di rivestimento della cavità, ancor prima dello scavo.

Questa metodologia si sta applicando per la prima volta per la realizzazione della stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano, attualmente in corso di costruzione. La stazione, quando sarà ultimata, avrà un diametro esterno di 28,80 m ed una copertura di terreno incoerente di soli 4 m sotto l'abitato urbano.

### Premessa

Se la realizzazione di scavi a foro

cieco di grande dimensione ( $\varnothing > 15$  m) comporta normalmente problemi progettuali e costruttivi non comuni, ciò è dovuto principalmente all'entità delle masse di terreno mobilitate dallo scavo ed alla difficoltà, in fase operativa, tenuto conto della scala delle sezioni in gioco, di controllare qualsiasi tipo d'instabilità. Da questa considerazione deriva la necessità, da parte di chi si accinge a progettare e costruire una cavità di grandi dimensioni, di conoscere a fondo la natura dei terreni per poterne prevedere, in fase di diagnosi, la risposta deformativa allo scavo e per poter programmare, in fase di terapia, le fasi, le cadenze, i sistemi di scavo e gli interventi di stabilizzazione necessari a garantire l'autoportanza del cavo a breve ed a lungo termine.

In particolare dovrà essere tenuto ben presente come la canalizzazione del flusso di tensioni deviato dall'apertura della cavità ("effetto arco") possa essere controllata attraverso la scelta delle fasi di scavo e degli interventi di stabilizzazione e, di conseguenza, come la deviazione del flusso possa essere pilotata con i medesimi strumenti (fasi di scavo e strumenti di stabilizzazione)

nelle diverse situazioni geostrukturali e geomeccaniche dei terreni in gioco.

Tenuto conto poi che una galleria risulterà tanto più stabile quanto più l'«effetto arco», compatibilmente con la resistenza del mezzo, riesce a mobilitarsi vicino alle pareti di scavo, si dovrà allora operare affinché in ogni caso la canalizzazione delle tensioni avvenga in un terreno dotato di resistenza sufficiente a garantire che le sollecitazioni e le relative deformazioni si evolvano in campo elastico.

Si possono configurare, a questo punto, tre diverse situazioni:

a) l'«effetto arco» si mobilita in corrispondenza al profilo di scavo: se la resistenza e la deformabilità del terreno saranno sufficienti a garantire una risposta elastica agli stati di coazione indotti dall'apertura del cavo, la stabilità sarà garantita con la mobilitazione

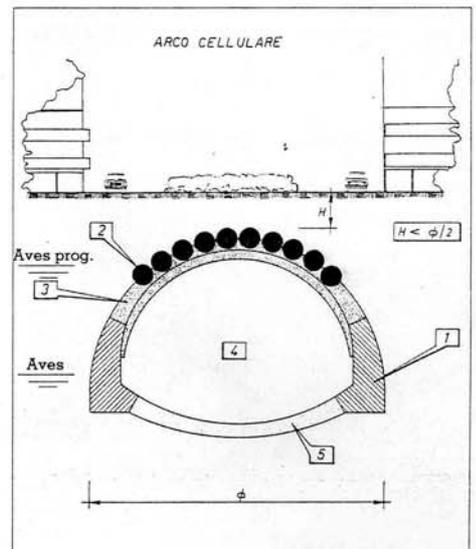
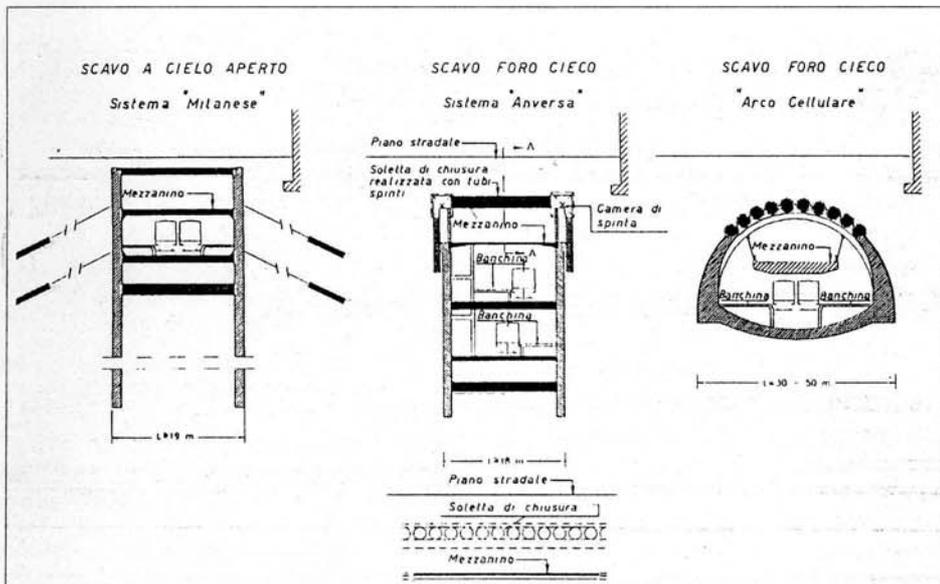


Fig.1 (a lato) - Evoluzione dei sistemi costruttivi per grandi cavità metropolitane: scavo a cielo aperto, «Sistema Anversa», «Arco Cellulare». Evolution des systèmes de construction pour les grandes cavités souterraines: creusement à ciel ouvert, «Système Anvers», «Arc Cellulaire». The evolution of construction systems for large metropolitan cavities: cut and cover method, «Antwerp System», «Cellular Arch».

Fig.2 (sopra) - Sintesi delle fasi esecutive dell'«Arco Cellulare»: 1) Getto dei piedritti; 2) Infissione dei tubi prefabbricati; 3) Getto dell'arco di calotta; 4) Scavo; 5) Getto dell'arco rovescio. Synthèse des phase exécutives de l'«Arc Cellulaire»: 1) bétonnage des piédroits; 2) enfoncement des tuyaux préfabriqués; 3) bétonnage de l'arc de calotte; 4) creusement; 5) bétonnage du radier.

Synthesis of the executive phases of the «Cellular Arch»: 1) casting the posts; 2) jacking the precast pipes; 3) casting the roof arch; 4) excavation 5) casting the invert.



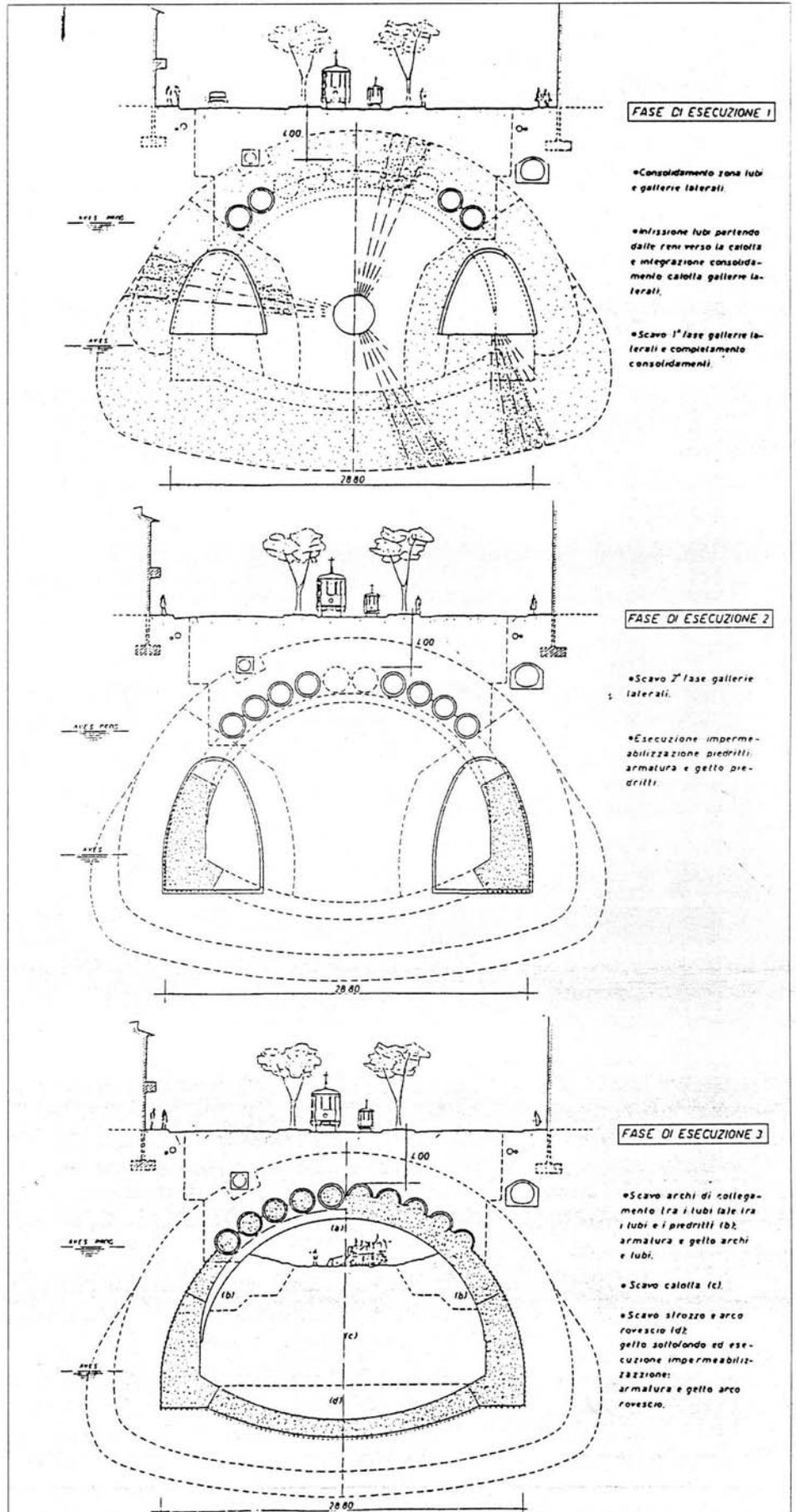
dell' "effetto arco" vicino alla cavità;  
**b)** l' "effetto arco" si mobilita lontano dal profilo di scavo: se il terreno reagisce anelasticamente agli stati di coazione indotti, il fenomeno di plasticizzazione che s' innesca al contorno della cavità, per poi propagarsi radialmente, produce lo spostamento della canalizzazione delle tensioni più all'interno dell' ammasso, ove lo stato tensionale di tipo triassiale risulta compatibile con le caratteristiche di resistenza del terreno; l' "effetto arco", che tende così a prodursi lontano dal profilo di scavo, potrà essere richiamato verso il cavo o per lo meno arrestato solo attraverso la realizzazione di adeguati interventi di stabilizzazione dell' anello di terreno plasticizzato;  
**c)** l' "effetto arco" non riesce a mobilitarsi. E' il caso dei terreni incoerenti o sciolti, in cui l' "effetto arco", non riuscendo a formarsi per via naturale come ai casi **a)** e **b)**, deve essere prodotto per via artificiale.

Se la cavità da realizzare ha sufficiente copertura ( $H > \varnothing/2$ ) da consentire l'impiego delle tradizionali tecniche di consolidamento (iniezioni a bassa pressione, jet-grouting, ecc.), una fascia di terreno trattato di adeguato spessore potrà garantire la corretta canalizzazione delle tensioni al contorno al momento dell' apertura del cavo e, di conseguenza, la mobilitazione artificiale dell' "effetto arco" in prossimità della calotta.

Se d' altra parte le coperture sono talmente ridotte ( $H < \varnothing/2$ ) da imporre una limitazione delle pressioni d' iniezione e quindi da impedire la realizzazione di consolidamenti con funzione statica al contorno del cavo, diventa imperativo ricorrere a sistemi costruttivi diversi.

A parte le tecniche di "scavo a cielo aperto" (fig. 1), non sempre attuabili specie in area urbana, sino ad oggi l' unico sistema disponibile per costruire a foro cieco grandi cavità corticali è stato il "sistema Anversa", adottato per la prima volta negli anni '70 per la costruzione di alcune gallerie della metropolitana nell' omonima città. Esso consiste nell' infiggere nel terreno, su un piano orizzontale, con il metodo dello

**Fig.3** Fasi esecutive di una galleria di grande luce con il sistema dell' "Arco Cellulare".  
*Phases exécutives d' un tunnel de grande flèche avec le système de l' "Arc Cellulaire".*  
*Executive phases of a large diameter tunnel using the "Cellular Arch" system.*



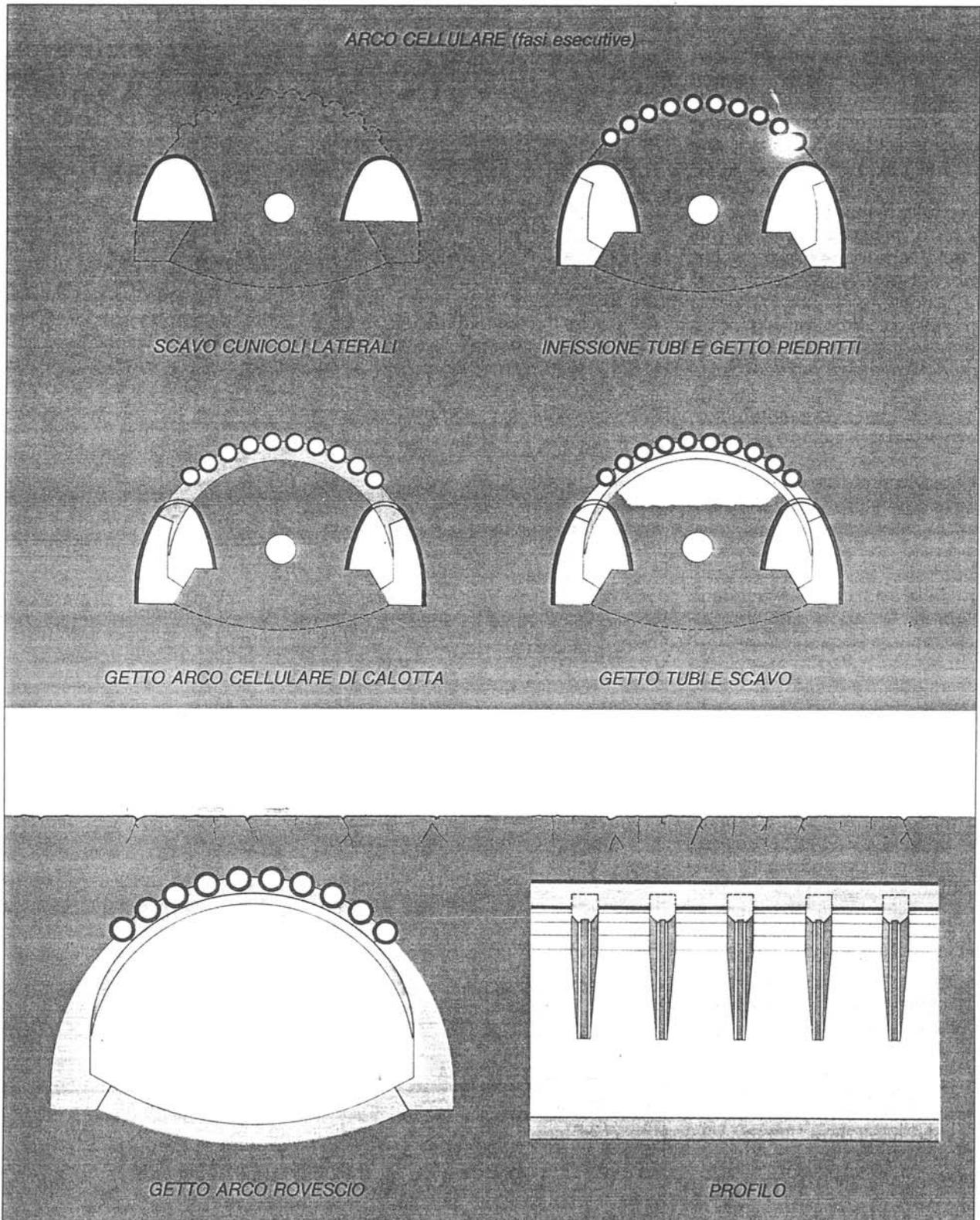


Fig.4 Fasi esecutive dell'"Arco Cellulare"  
Phases exécutives de l'"Arc Cellulaire";  
Executive phases of the "Cellular Arch"

spingitubo, una serie di tubi affiancati. Successivamente essi vengono armati e riempiti di calcestruzzo, mentre il terreno intorno viene trattato in modo da ottenere una piastra monolitica sotto cui iniziare i lavori di scavo (fig. 1). Con questo sistema fino ad oggi sono state realizzate, in terreno sciolto, gallerie di luce massima non superiore a 15 m. Oltre questa luce i tubi, che lavorano come travi appoggiate agli estremi, diventano eccessivamente deformabili ed i cedimenti in superficie diventano incompatibili con i vincoli generalmente imposti nelle aree urbane.

In alternativa al "sistema Anversa", l'unica strada che oggi appare percorribile sembra quella di realizzare, all'interno del terreno, un arco portante prefabbricato (di consistenza superiore a quella del terreno consolidato) prima ancora di procedere allo scavo vero e proprio della galleria.

Da questa considerazione è scaturita l'idea dell'"arco cellulare", un nuovo sistema costruttivo ideato e messo a punto dallo scrivente, che consente di aprire a foro cieco ed a piena sezione gallerie di dimensioni finora impensabili ( $\varnothing > 20$  m) in terreni incoerenti o semicoerenti a fronte di coperture anche inferiori al raggio di scavo.

## L'Arco Cellulare

L'"arco cellulare" (fig. 2) è una struttura composta assimilabile ad un graticcio a sezione semicircolare i cui elementi longitudinali (celle) sono costituiti da tubi in c.a. resi collaboranti da una serie di grosse centine trasversali (archi).

Sotto il profilo costruttivo è interessante sottolineare come questa struttura nasca dall'assemblaggio coordinato di tecnologie tutte già note ed ampiamente sperimentate.

Il sistema dell'"arco cellulare" rappresenta, infatti, una evoluzione del "sistema Anversa" già descritto: invece di utilizzare i tubi in modo da formare una piastra, prevede di infiggerli orizzontalmente nel terreno, secondo un profilo sub-circolare, in direzione longitudinale all'asse della futura galleria, e di irrigidire la struttura con collegamenti ad arco trasversali, che costituiscono la struttura portante principale, posti ad interasse adeguato. Si forma così, ancor prima di scavare la galleria, un graticcio semicilindrico di c.a. capace di garantire la perfetta canalizzazione delle tensioni al contorno del cavo, generando artificialmente l'"effetto arco" indi-

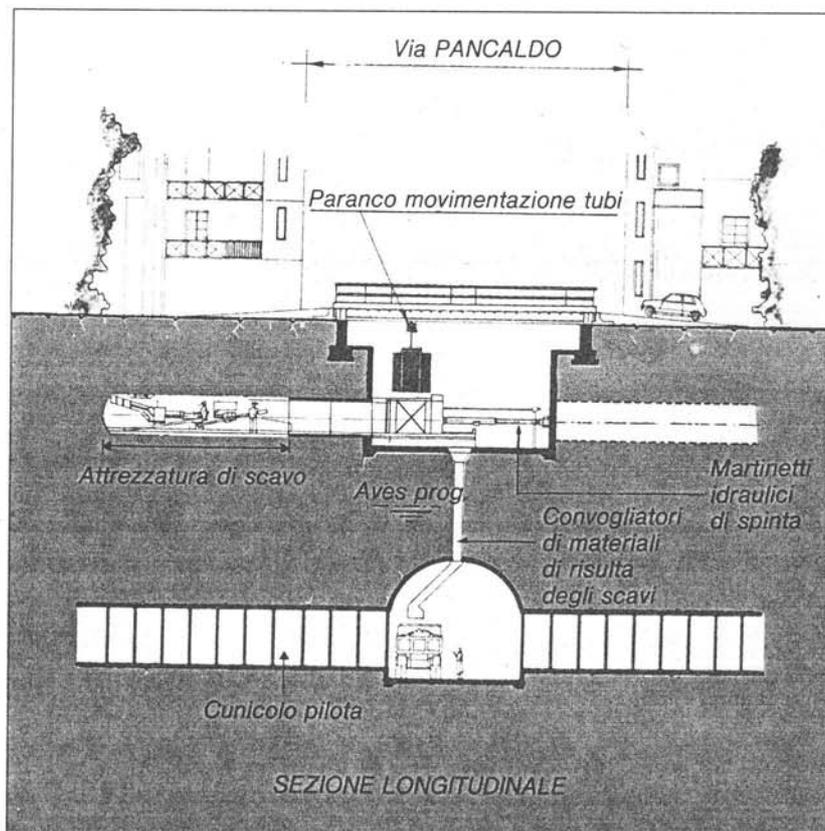
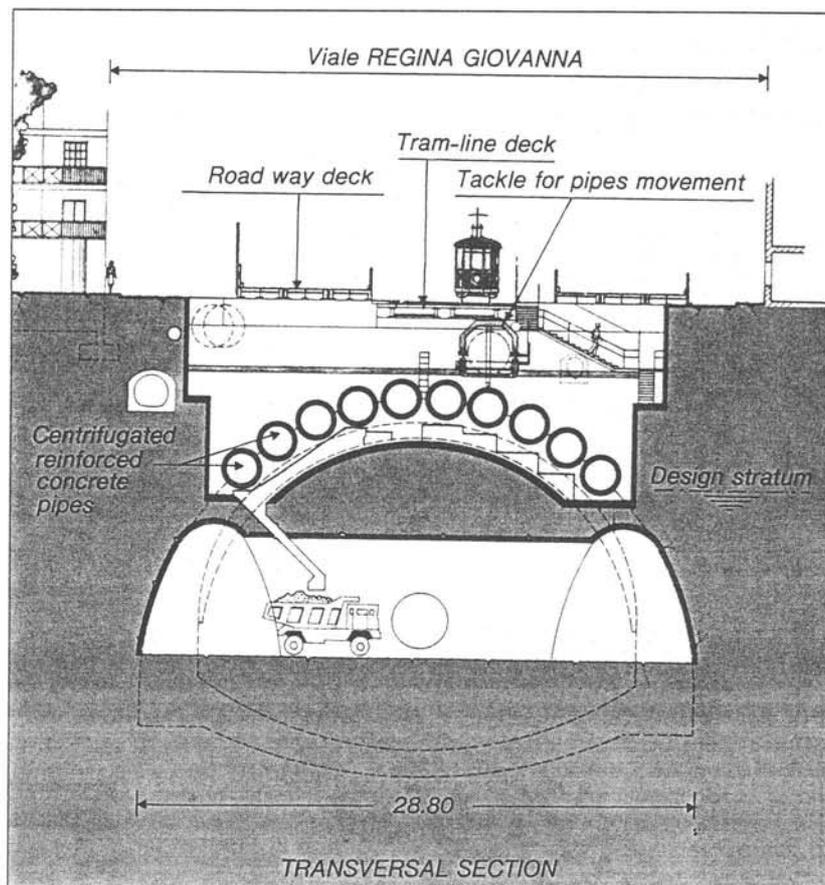


Fig.5 Sezione trasversale e longitudinale del pozzo da dove avviene l'infissione dei tubi. Sections transversale et longitudinale du puits pour l'enfonçage des tuyaux. Longitudinal and cross sections of the thrust shaft used for pipes jacking

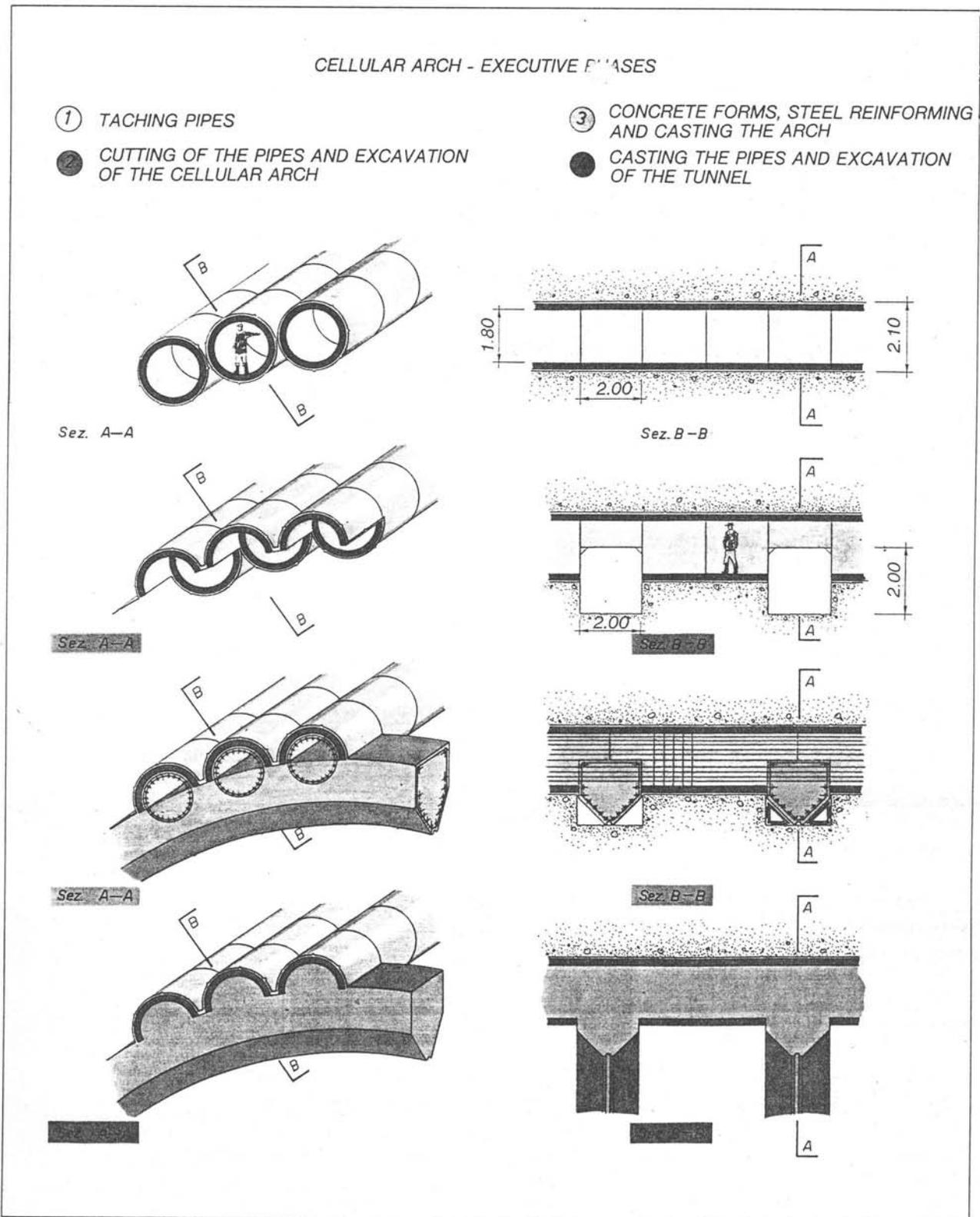


Fig.6 - Particolari costruttivi delle "celle" e degli "archi"  
 Détails de la construction de "cellules" et des "arcs"  
 Constructional details of the "cells and "archs"

spensabile per la stabilità a breve ed a lungo termine dell'opera da scavare.

La realizzazione pratica dell'"arco cellulare" avviene in 9 fasi principali (vedi figg. 3 e 4).

a) da una galleria di servizio, praticata in asse alla galleria finale, si eseguono preconsolidamenti sistematici del terreno al contorno delle future gallerie di piedritto ed eventualmente lungo l'arco di volta. E' da notare che il preconsolidamento in corrispondenza alla calotta della galleria ha lo scopo di conferire una leggera coesione al terreno e può non essere eseguito in molti tipi di materiale;

b) scavo delle gallerie di piedritto;

c) in un cantiere completamente indipendente da quello inferiore delle gallerie di piedritto avviene la preparazione delle camere di spinta per l'infissione (con il metodo dello spingitubo) in corrispondenza al profilo di calotta della futura galleria, di una serie di tubi accostati di c.a. (fig.5 e foto 1);

d) realizzazione dei microtunnels di calotta;

e) scavo, attraverso i microtunnels, delle casseforme (le cui pareti sono costituite dal terreno stesso), per il getto degli archi di collegamento in c.a.. Lo smarino del materiale avviene attraverso le gallerie laterali (fig. 6) ;

f) getto dei piedritti della galleria finale;

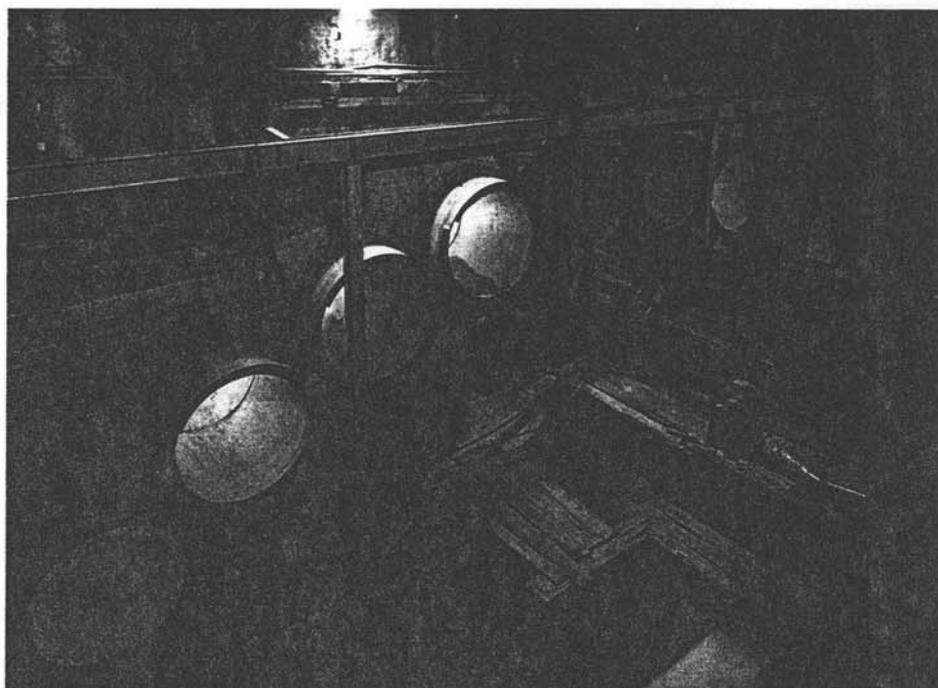
g) armatura e riempimento con calcestruzzo dei microtunnels longitudinali di calotta e degli archi trasversali di collegamento;

h) scavo del terreno all'interno della sezione della galleria finale sotto la protezione dell'"arco cellulare" già praticamente attivo;

i) getto dell'arco rovescio.

La caratteristica che rende questa tecnica vantaggiosa rispetto ai metodi tradizionali, e forse addirittura insostituibile, è il modo con cui avviene il passaggio dalla condizione di equilibrio iniziale del terreno indisturbato a quella di equilibrio finale a galleria finita.

I sistemi di avanzamento tradizionali fanno affidamento sull'effetto tridimensionale del fronte, che contribuisce in maniera determinante all'equilibrio a breve termine del cavo. Se, in relazione alla natura dei terreni ed agli stati tensionali indotti dallo scavo il nucleo di terreno al fronte si configura deformabile, le conseguenti deformazioni che s'innescano nell'ammasso prima dell'arrivo del fronte stesso devono essere accettate dal progettista a meno di ricorrere a pesanti e costosi interventi di



**Foto 1** Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: camera di spinta dopo l'infissione dei tubi - Station "Venezia" - Passante Ferroviario à Milan: puits de poussée après l'enfonçage des tuyaux - "Venezia" Station - Milan Railway Link: thrust shaft after pipes jacking.

preconsolidamento lanciati in avanzamento.

L'entità di queste deformazioni, nel caso di gallerie di grande luce, può essere notevole e, nel caso di gallerie metropolitane, si traduce in cedimenti in superficie non accettabili.

Al contrario, l'"arco cellulare", rinunciando al contributo statico del fronte, permette di minimizzare, e spesso annullare, questo tipo di deformazioni e quindi di realizzare scavi corticali, di luce altrimenti impensabile a foro cieco, senza provocare cedimenti apprezzabili in superficie. Impedire i fenomeni deformativi in certi tipi di materiale può portare a notevoli vantaggi anche nei riguardi delle spinte sul rivestimento.

In gallerie realizzate con metodi tradizionali, infatti, specie se i terreni sono scadenti ed alterabili, la progressiva decompressione del materiale, che si produce generalmente al contorno del cavo, porta a plasticizzazioni che si traducono inevitabilmente in deformazioni, quindi in spinte differite importanti sulle opere di rivestimento.

Al contrario l'"arco cellulare" operando un contenimento continuo del terreno al contorno del cavo con valori di  $\sigma_3$  relativamente contenuti, e comunque tali da conservare in elasticità il terreno circostante, permette di minimizzare l'entità di queste spinte e, in

definitiva, di conservare quasi inalterati gli equilibri preesistenti.

### **Un esempio progettuale: la Stazione Venezia del Passante Ferroviario Metropolitano di Milano**

Nell'ambito della costruzione della linea ferroviaria che dovrà sottopassare la città di Milano, era prevista la realizzazione della stazione Venezia, da eseguirsi a foro cieco, del diametro interno di 22.80 m.

Il diametro complessivo dello scavo risultava così di ~ 29 m, e se si considerano le coperture estremamente ridotte con presenza di sottoservizi e strutture preesistenti per i primi metri di terreno, 4 + 5 m, e la natura dei terreni, alluvioni recenti ed incoerenti parzialmente immerse in falda, si comprende come nel caso in esame risultassero enfatizzate le problematiche relative alla stabilità della cavità da costruire (fig. 7).

La progettazione iniziale prevedeva la realizzazione di un consolidamento eseguito in più fasi sul contorno dello scavo, l'esecuzione di due gallerie laterali, futura sede dei piedritti del rivestimento, lo scavo della volta con posa di un priverivestimento costituito da centine e spritz-beton e con getto del rivesti-

mento finale in c.a., ed infine il completamento dello scavo ed il getto dell'arco rovescio.

Questa tecnica, già ampiamente sperimentata con successo per le gallerie di linea ( $\varnothing = 8.80$  m) e per cavità di luce maggiore con sufficiente copertura ( $H > \varnothing/2$ ), risultò invece, a seguito di una prima serie di verifiche eseguite col metodo degli elementi finiti, non in grado di garantire, in questo caso particolare, una sufficiente sicurezza nei riguardi della stabilità dello scavo e del controllo dei cedimenti superficiali.

La simulazione numerica evidenziò infatti la formazione di ampie zone di terreno plasticizzato al momento dello scavo della calotta ed il raggiungimento di valori assai elevati per i cedimenti superficiali, del tutto incompatibili con il mantenimento della funzionalità delle strutture e dei sottoservizi preesistenti.

La causa di ciò è da attribuirsi all'impossibilità di poter realizzare un adeguato spessore di terreno consolidato nella zona di calotta, date le ridotte coperture ed il conseguente scarso confinamento del terreno, ed all'eccessiva deformabilità del prerinvolto.

La fig. 7 mostra comparativamente la geometria ed i consolidamenti eseguiti per la galleria di linea e per la Sta-

zione Venezia. In essa, in particolare, è riportata la sagoma della Stazione realizzata col metodo dell'"arco cellulare", a cui si è ricorso per superare le problematiche precedentemente esposte.

La figura 8 mostra un modello dell'"arco cellulare" costruito mediante elaboratore elettronico.

Le analisi agli elementi finiti eseguite per la galleria di stazione realizzata con il sistema dell'"arco cellulare" (vedi fig. 9) dimostrarono la validità della scelta progettuale in quanto, nel corso di tutti i 14 passi di calcolo corrispondenti alle varie fasi operative, non veniva evidenziata alcuna plasticizzazione importante del terreno ed i cedimenti superficiali calcolati non superavano il valore di qualche millimetro.

Confortati da questo risultato, prima di procedere nell'applicazione del sistema per la realizzazione della Stazione vera e propria, si ritenne opportuno approfondirne lo studio e la messa a punto eseguendo una prova, in scala reale, di infissione di tre tubi, in un terreno consolidato con diversa intensità, e del loro collegamento a mezzo di segmenti di arco, previa demolizione parziale dei tubi stessi (foto 2). La prova venne strumentata con estensimetri incrementali per il rilevamento delle

deformazioni del terreno durante le varie fasi di lavoro, in modo che potesse costituire anche un'utile verifica alle incertezze del modello numerico non sempre sufficientemente attendibile nella sua bidimensionalità.

La sperimentazione permise di acquisire la certezza che il disturbo provocato al terreno dalle suddette operazioni, è praticamente inesistente. I massimi cedimenti superficiali misurati risultarono inferiori al millimetro.

Forti dell'esperienza maturata con la sperimentazione, si sono quindi iniziati i lavori per l'esecuzione vera e propria della stazione "Venezia".

## Conclusioni

Oggi quando si parla di ricavare spazi nel sottosuolo di centri urbani si è portati sempre di più a ricercare soluzioni a foro cieco piuttosto che a cielo aperto per una serie di motivi tra i quali i più importanti sono:

- a) è sempre più difficoltoso interferire, con cantieri urbani, con il traffico di superficie già al limite del collasso;
- b) l'apertura di cantieri per scavi a cielo aperto in zona metropolitana produce disservizi e danni di cui non è facile

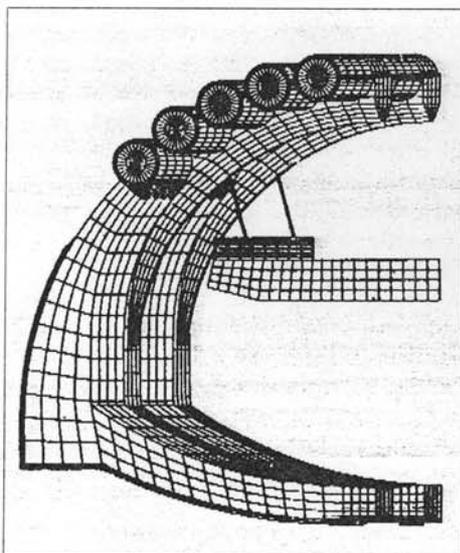
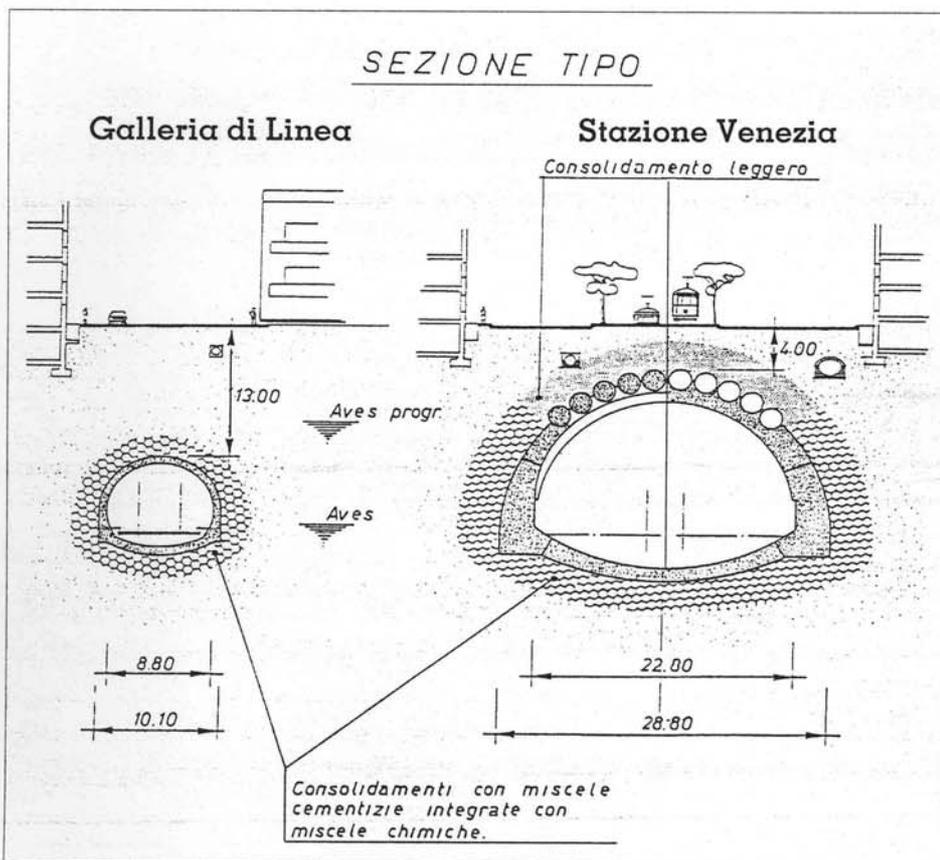
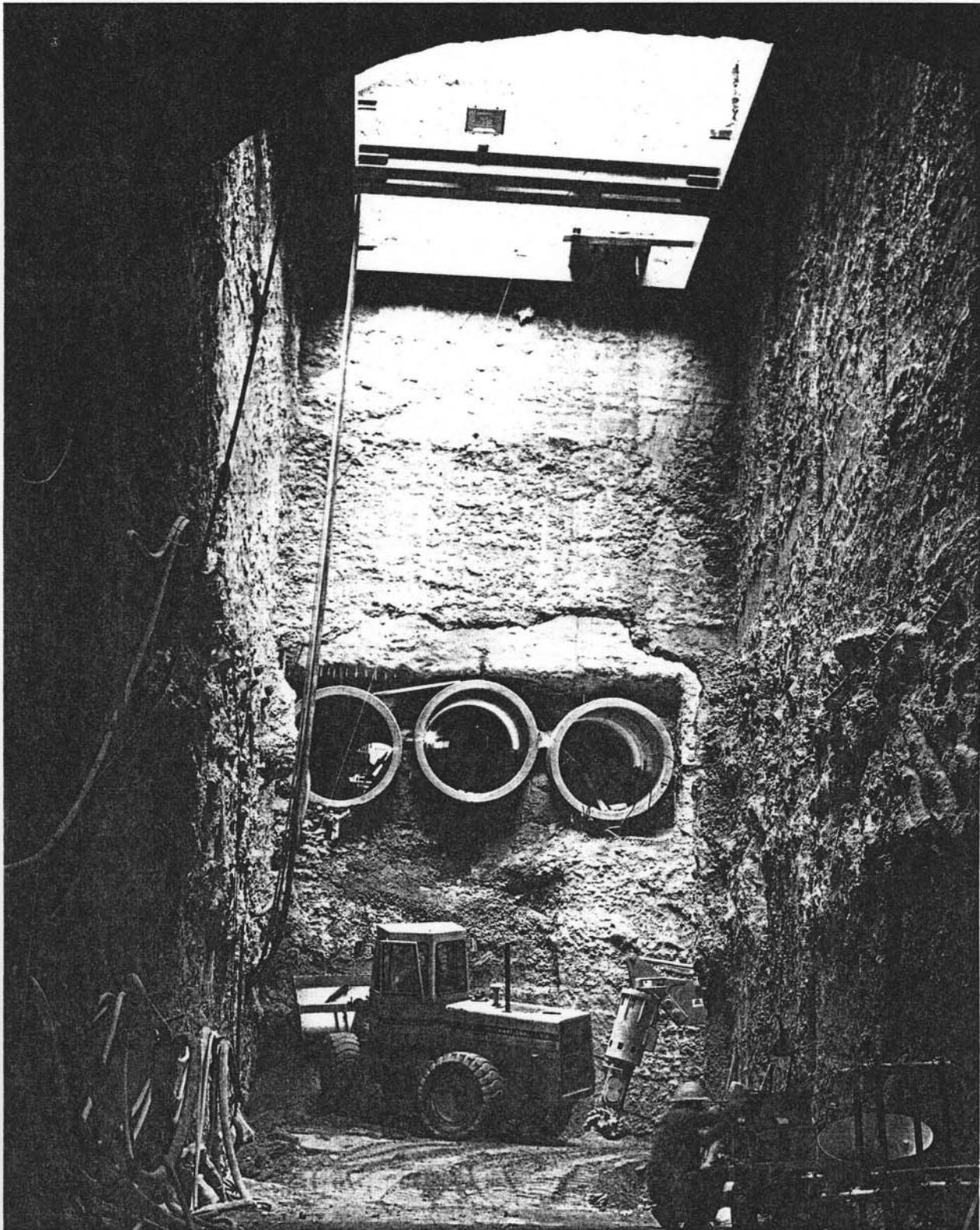


Fig. 8 - (sopra) Modello tridimensionale dell'"arco cellulare" ottenuto mediante elaboratore. Modèle tridimensionnel de l'"Arc Cellulaire" obtenu par ordinateur - Cad three dimensional model of the "Cellular Arch"

Fig. 7 - (a lato) Passante Ferroviario di Milano: Sezione tipo di una galleria di linea e della galleria di stazione (Venezia). - "Passante" Ferroviaire metropolitana de Milan: sections type d'un tunnel de ligne et du tunnel de la station "Venezia". - The Milan railway Link: typical section of a route tunnel and of the "Venezia" station tunnel



**Foto 2** - Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: campo prove, risultato dopo l'infissione dei tubi in scala reale  
Station "Venezia"- Passante Ferroviario à Milan: terrain d'essai, résultat après l'enfoncement des tuyaux en échelle réel  
"Venezia" Station - Milan Railway Link: tests field, result of pipes jacking in real scale.

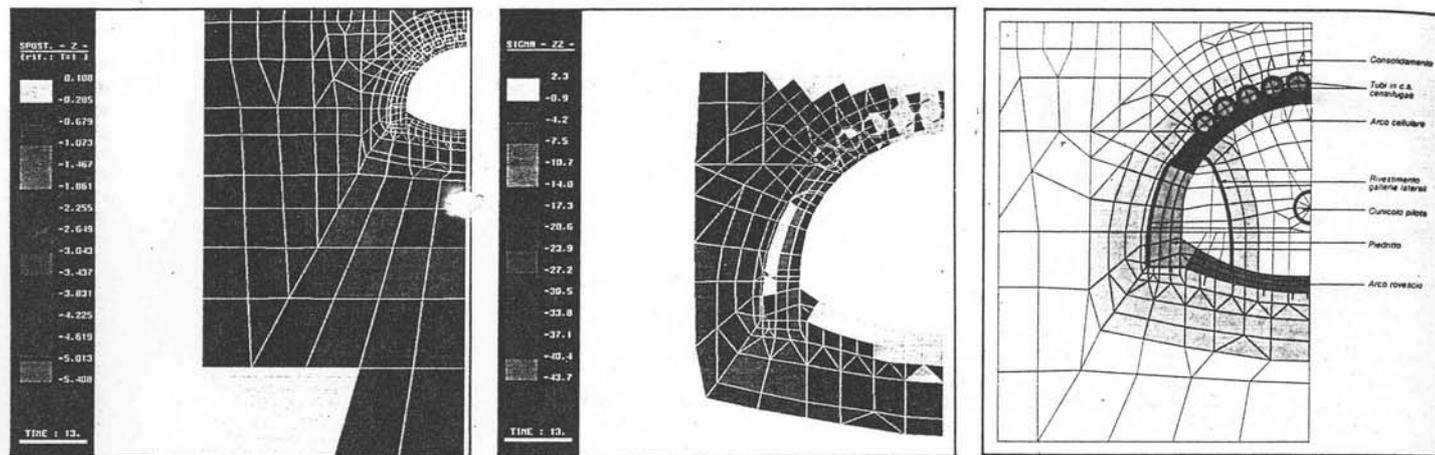


Fig.8 - Esempi di output grafico dei calcoli eseguiti con un programma per elaboratore agli elementi finiti non lineari: particolare della maglia utilizzata, spostamenti e tensioni verticali dopo il getto dell'arco rovescio (unità di misura: Kg<sub>p</sub> e cm). - Exemples de production graphique des calculs effectués avec un programme pour ordinateur aux éléments finis non linéaires: détail de la maillage utilisée, déplacements et tensions verticales après le bétonnage du radier (unité de mesure: kg<sub>p</sub> et cm). - Examples of graphic output of finite non-linear elements calculations: details of the mesh used, as well of the vertical displacements and stresses after invert casting (units: Kg<sub>p</sub> and cm).

valutare i costi reali diretti ed indiretti, parametro che dovrebbe essere tenuto presente nei confronti tra costi di scavo a foro cieco ed a cielo aperto.

Il metodo dell'"arco cellulare" permette di realizzare a foro cieco ed a piena sezione cavità di notevoli dimensioni anche con coperture assai ridotte ed in terreni difficili. Per questo motivo la sua applicazione sembra adeguata soprattutto all'ambiente cittadino e comunque ovunque sia necessario provocare il minimo disturbo a strutture preesistenti. La Stazione Venezia del Passante Ferroviario Metropolitano della città di Milano, attualmente in esecuzione, con i suoi quasi 29 m di luce e soli 4 m di copertura è una conferma della validità del metodo.

Si ritiene oltremodo possibile il raggiungimento di luci di scavo ancora maggiori, dal momento che la metodologia si presta, variando opportunamente le dimensioni degli archi e delle cellule (tubi) e l'interasse tra gli archi stessi, ad essere adeguata con estrema flessibilità

### Summary

The excavation of cavities in loose ground, exceeding a certain dimension, are not feasible using traditional methods, especially if the overburden is small, as often takes place in underground railway stations.

This is mainly due to the following reasons:

- it is not possible to consolidate the ground around the cavity in such a way as to sufficiently guarantee homogeneity and resistance as compared with

the high state of stress caused by the excavation;

- pre-lining structures are too flexible. The "Cellular Arch" method allows these difficulties to be overcome by creating the complete earth supporting structure and cavity lining even before the excavation is started. This method has been devised by the Author for constructing the "Venezia" Station of the Milan Railway Link which, when completed, will have an inside diameter of 28.80 m and only 4 m loose soil overburden.

The development phases of the Station using this new method are the following:

- consolidation, from a central service trench duct, of the ground along the perimeter of the side tunnels;
- two-steps excavation of the side tunnels and completion of ground consolidation along the perimeter of the station tunnel, followed by concrete pouring of the posts;
- jacking, from a thrust shaft, of 10 micro tunnels consisting of reinforced concrete 2.1 m diameter pipe segments;
- excavation of drifts connecting the micro tunnels, and the side tunnels. These drifts will constitute the formwork within which the cellular arches will be constructed;
- steel reinforcing and concrete pouring of the arches and micro tunnels;
- excavation of the station tunnel in several phases and simultaneous finishing of the vault;
- excavation and casting by sections of the invert.

Before applying the method, com-

plex experiments were carried out by driving into the ground, consolidated at various strengths, three sets of r.c. circular members: the tests had the aim of verifying the feasibility and of perfecting all the construction details.

During the tests, measurements were performed of the surrounding soil movements in addition to dilatometer tests, plate loading tests from the inside of the tubes and sonic coring.

The tests have been completed by simulating building two arches connecting the tubes.

The experiment gave positive results, and allowed any reserves on feasibility to be removed, with the result that currently the first "real" application is under construction, in the Porta Venezia tunnel station.

### Resumé

La réalisation d'une cavité en terrains meubles, au-delà de normales ouvertures de creusement, n'est pas praticable avec les méthodologies traditionnelles, surtout si le recouvrement est réduit comme dans les cas de stations de metro.

Cela est dû principalement à deux raisons:

- il n'est pas possible d'obtenir une consolidation homogène du terrain autour de l'excavation avec une résistance suffisante en relation à l'état de forte tension provoquée par le creusement;

- la structure du pré-rivêtement apparaît excessivement déformable.

La méthodologie de "l'arc cellulaire" permet de dépasser ces difficultés au moyen de la réalisation de l'ensem-

ble de la structure porteuse, du maintien du terrain et du revêtement de la cavité, avant même d'effectuer le creusement. Elle a été conçue par l'Auteur pour la réalisation de la "Station Venezia" du Passante Ferroviario à Milan, une liaison souterraine du chemin de fer, dont la cavité, aura un diamètre externe de 28.80 m, avec un recouvrement du terrain meuble de seulement 4

m.

Les phases de réalisation de la gare avec cette nouvelle technologie sont:

a) consolidation, à partir d'une galerie centrale de service, du terrain alentours des tunnels latéraux;

b) creusement en deux phases des tunnels latéraux et achèvement de la consolidation du terrain sur tout le périmètre de l'excavation, puis bétonnage

des piédroits en b.a.;

c) réalisation à partir d'un puits de poussée, avec la méthode du pousse-tube, de 10 micro-tunnels constitués par des tuyaux en b.a. de 2.1 m de diamètre;

d) creusement de tunnels de liaison entre les microtunnels et entre ceux-ci et les tunnels latéraux. Ces liaisons constituent le coffrage dans lequel seront réalisées les arcs cellulaires;

**Foto 3** - Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: punto di raccordo tra la galleria di piede ed il cunicolo trasversale futura sede di un arco.

- Station "Venezia" - Passante Ferroviario de Milan: liaison parmi le tunnel latéral et le tunnel transversal qui deviendra le siège d'un arc

- "Venezia" Station" - Milan Railway Link: connection between the side tunnel and the cross-drift that will house an arch



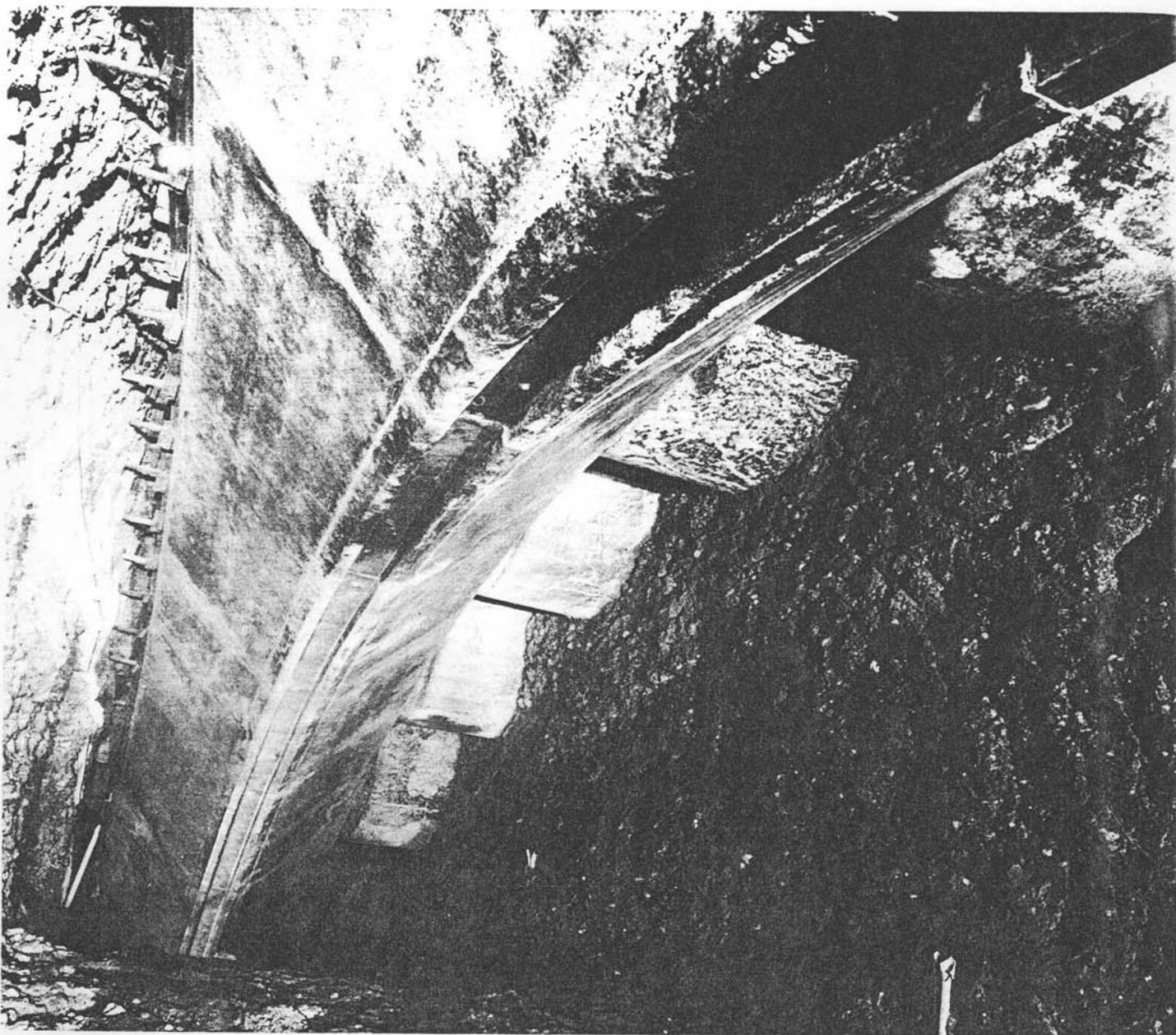


Foto 4 - Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: il primo arco è stato disarmato!  
- Station "Venezia" - Passante Ferroviario à Milan: le premiere arc est décintré!  
- "Venezia" Station - Milan Railway Link: the formwork of the first arch has been removed!

e) armature et bétonnage des arcs et des micro-tunnels;

f) creusement en plusieurs phases du tunnel principal et exécution en parallèle des finitions superficielles de la voûte;

g) creusement et bétonnage du radier.

Avant d'adopter cette méthodologie de travail, dans le but d'en vérifier la possibilité de réalisation et de mettre au point tous les aspects de con-

struction, on a effectué une expérimentation complexé, pendant laquelle on a enfoncé dans le terrain consolidé avec des intensités différentes, trois séries d'éléments circulaires en b.a..

Pendant l'essai on a effectué des mesures de déformation sur le terrain alentours, des essais de dilatomètre, de charge sur plaque de l'intérieur des tuyaux, et de carottage sonique.

L'essai est terminé par la simulation

de la réalisation de deux arcs de liaison entre les tuyaux.

L'expérimentation a donné un résultat positif et a permis de dissiper toute réserve sur la possibilité de réalisation de la méthode, dont est maintenant en cours la première "véritable" application sur le tunnel de la "Station Venezia".