

**UN METODO COSTRUTTIVO CONSERVATIVO E DI PRECONTENIMENTO DEL CAVO PER GRANDI CAVITA'
IN TERRENI DIFFICILI**

**A GREAT CAVITY BUILDING TECHNOLOGY FOR LOOSE SOILS WHICH ALLOWS THE CONFINING GROUND
PRESSURE TO BE MANTAINED**

Pietro LUNARDI, Università di Parma, Italia

Enzo LUONGO, Milano, Italia

Mario MICHELUZZI, Consorzio Giemme (Grandi Lavori, Fincosit, Mazzi, Romagnoli,
Astaldi, Vianini Lavori), Italia

Enrico Maria PIZZAROTTI, Rocksoil S.p.A., Milano, Italia

Angelo TESTA, M.M. "Strutture ed infrastrutture per il territorio" S.p.A., Milano,
Italia

Si descrivono gli aspetti progettuali ed applicativi del metodo dell'"Arco Cellulare" con riferimento all'esempio della Stazione Venezia del Collegamento Ferroviario Passante di Milano, attualmente in corso di realizzazione.

The excavation of cavities in loose ground, exceeding a certain dimension and at shallow depth, is not feasible using traditional methods: in fact it is not possible to consolidate the ground around the cavity in such a way that homogeneity and resistance is sufficiently guaranteed. This is the case of the "Venezia" station in the Milan Railway Link (fig. 1) currently under construction: the external diameter of excavation (28.80 m), the limited overburden (4+5 m), the presence of major surface structures and the nature of partially saturated soils are the numerous problems of the construction of this cavity.

To overcome these difficulties a new building method has been developed, the "Cellular Arch" which permits the creation of the complete ground supporting structure and cavity lining even before the excavation is started.

The main supporting structure in the "Cellular Arch" system is formed by pipes, fixed in the ground along a semi-circular profile and parallel to the longitudinal axis of the tunnel, and transversal arches. In this way a semi cylindrical reinforced concrete grid, able to guarantee the perfect canalization of boundary cavity stresses, takes place, artificially providing an "arch effect", necessary to the short and long term stability of the work.

Before applying the Cellular Arch Method to the Venezia station tunnel, which is 220 m long, many numerical simulation of the phases of construction and a "in situ" test were carried out to verify the feasibility of the new method.

As a consequence of the positive results of the above mentioned tests, the final design was completed and the construction began.

Before the excavation it was necessary to grout the ground around the perimeter of the side drifts, and in the area where the pipes will have been driven.

It is worth noting that the grouting of the ground in proximity with the crown of the tunnel created only a light cohesion in the soil, in order to avoid collapse of the microtunnel excavation face and it has not a statical function. In such a way it was possibly to grout the crown area using only a half of the normally used cement and integrative injections.

The great advantage of this system in respect of traditional methods is the way the initial soil stress pattern is transformed to the final one without soil failure. The "Cellular Arch" allows minimisation of deformation so that shallow tunnels with large diameter can be completed without causing significant vertical displacements. From this point of view, the monitoring programme of the surface displacements, of the deformations in proximity to the gallery, of the existing buildings and of the stresses in the lining during the execution of the whole work, is extremely

important. Currently work has reached the stage of excavation till the middle section under the vault of the "Cellular Arch" without that the instruments could show any significant movement from the initial "at rest" position both in the ground or in the structure.

La costruzione di gallerie in area urbana è resa particolarmente delicata dalla necessità di limitare al minimo le deformazioni superficiali data la presenza di edifici e di altre strutture in vicinanza degli scavi, spesso assai prossimi alla superficie.

Queste opere sono dunque realizzabili in condizioni di sicurezza solo a patto di consentire la deviazione del flusso di sforzi sul contorno della cavità senza che nel terreno si producano plasticizzazioni e rotture che sono causa di deformazioni e di cedimenti.

In suoli incoerenti, come è quello di Milano, le operazioni di scavo a foro cieco in terreno naturale con metodi tradizionali comporterebbero senza dubbio deformazioni inaccettabili o addirittura rifluimenti di terreno.

Sono quindi necessari adeguati interventi di consolidamento volti a fornire artificialmente una certa coesione al terreno in modo da garantire la stabilità dello scavo. Il tradizionale consolidamento tramite iniezioni cementizie e integrative può però non essere sufficiente a garantire la stabilità della cavità ed il controllo delle deformazioni in condizioni particolari come quelle presentatesi per la realizzazione della stazione Venezia del lotto 2PB del Passante Ferroviario di Milano avente un diametro esterno di scavo di 28.80 m ed una copertura di soli 4+5 m (Fig. 1).

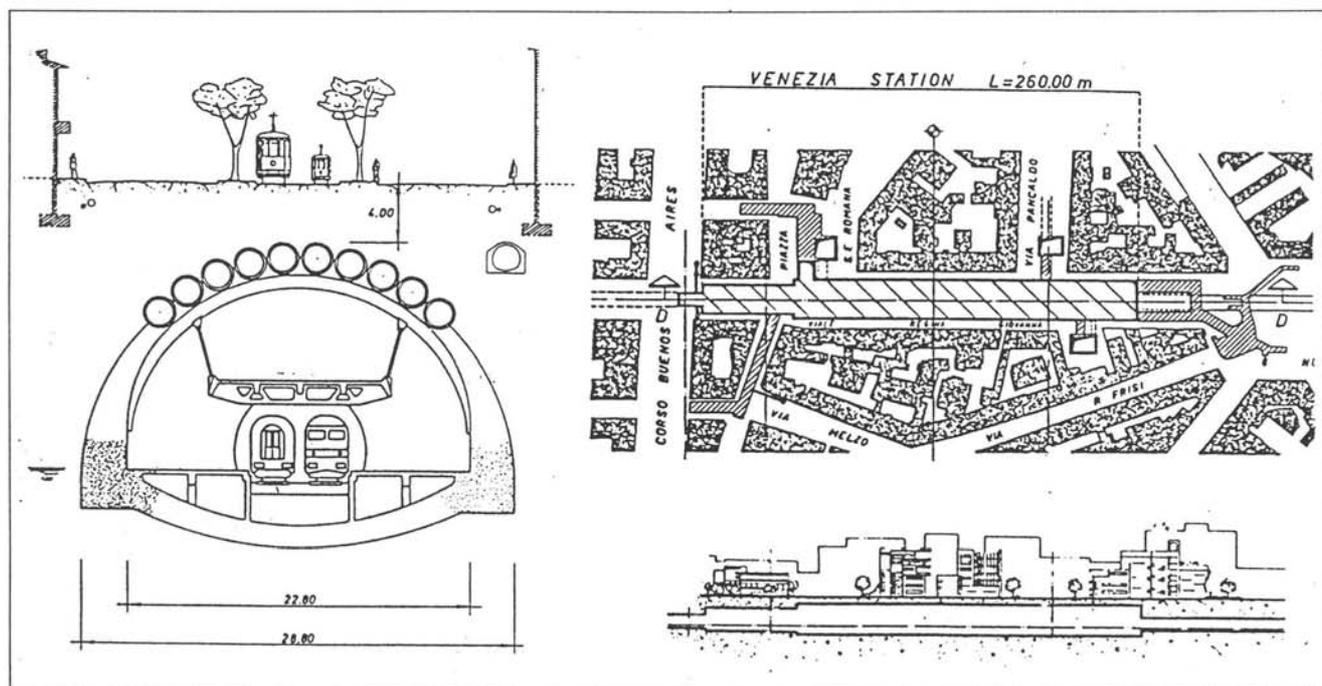


Fig. 1: Stazione Venezia: sezione trasversale, planimetria e profilo longitudinale. Venezia station: cross section, plan and longitudinal profile.

Le ragguardevoli dimensioni della galleria, da realizzarsi completamente a foro cieco, la ridotta copertura e la presenza nello strato superficiale di numerosi sottoservizi e di resti di antiche costruzioni hanno fatto escludere la possibilità di ricorrere alle consuete metodologie realizzative che si basano sul consolidamento del terreno con iniezioni da tubi valvolati, perchè sarebbe stato impossibile ottenere trattamenti sufficientemente omogenei che garantissero il raggiungimento

di adeguati livelli di resistenza nella zona di calotta, dove il ricoprimento di terreno è più scarso e dove quindi non è opportuno raggiungere pressioni di iniezione elevate. Ciò ha portato alla messa a punto di un nuovo metodo costruttivo, l'"Arco Cellulare", che permette di evitare l'insorgere di decompressioni nel terreno. L'"Arco Cellulare" è una struttura composta a graticcio semicilindrico i cui elementi longitudinali sono formati da tubi in c.a. infissi nel terreno lungo un

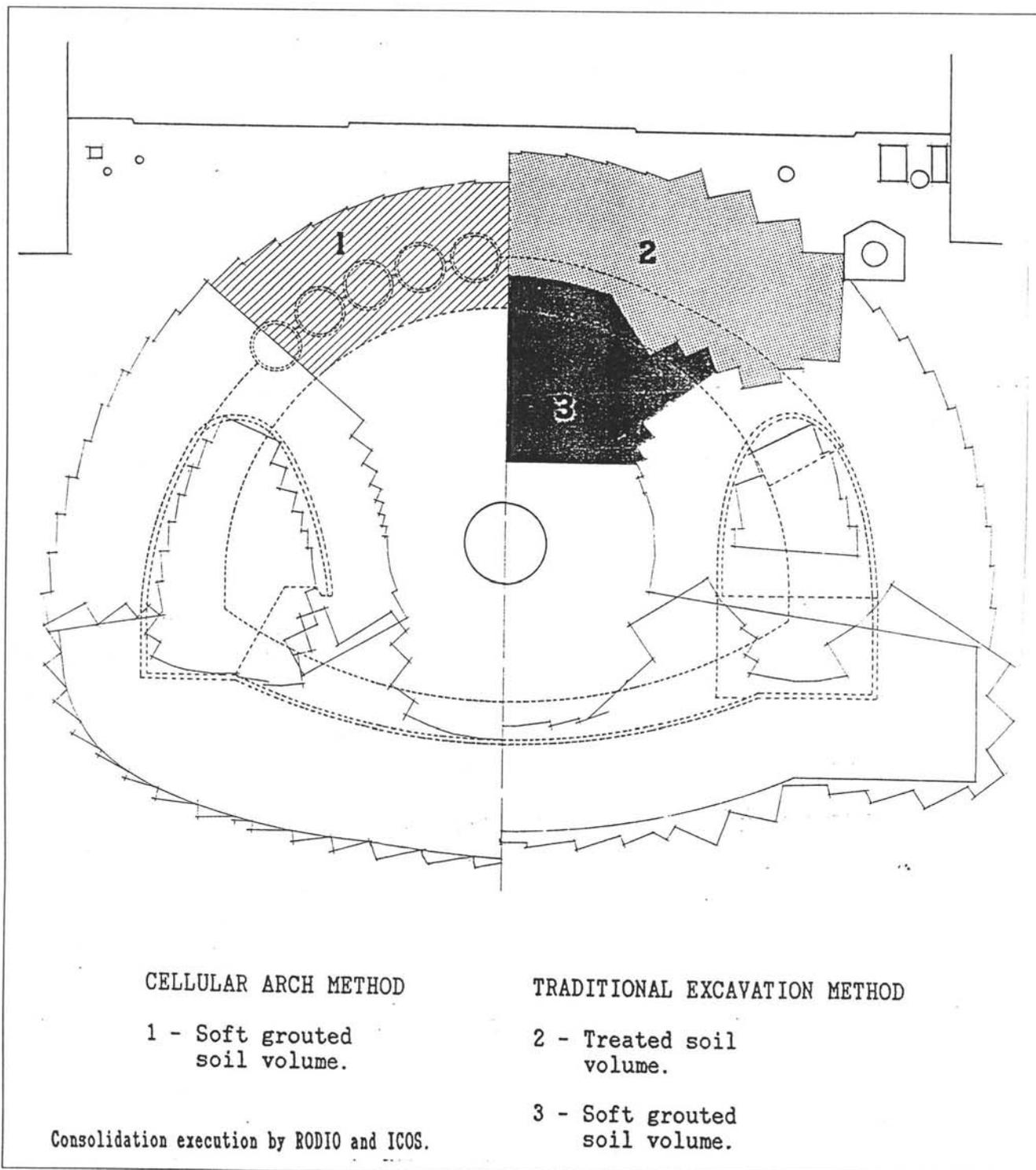


Fig. 2: Confronto fra i consolidamenti eseguiti ed i consolidamenti usualmente necessari.
Comparison between executed grouting and usual grouting.

profilo circolare e i cui elementi trasversali sono realizzati da archi in c.a. gettati in opera prima dell'inizio delle operazioni di scavo. Queste ultime vengono quindi eseguite quando la struttura portante, notevolmente rigida, è già completata ed è in grado di fornire al terreno un adeguato confinamento senza deformazioni apprezzabili.

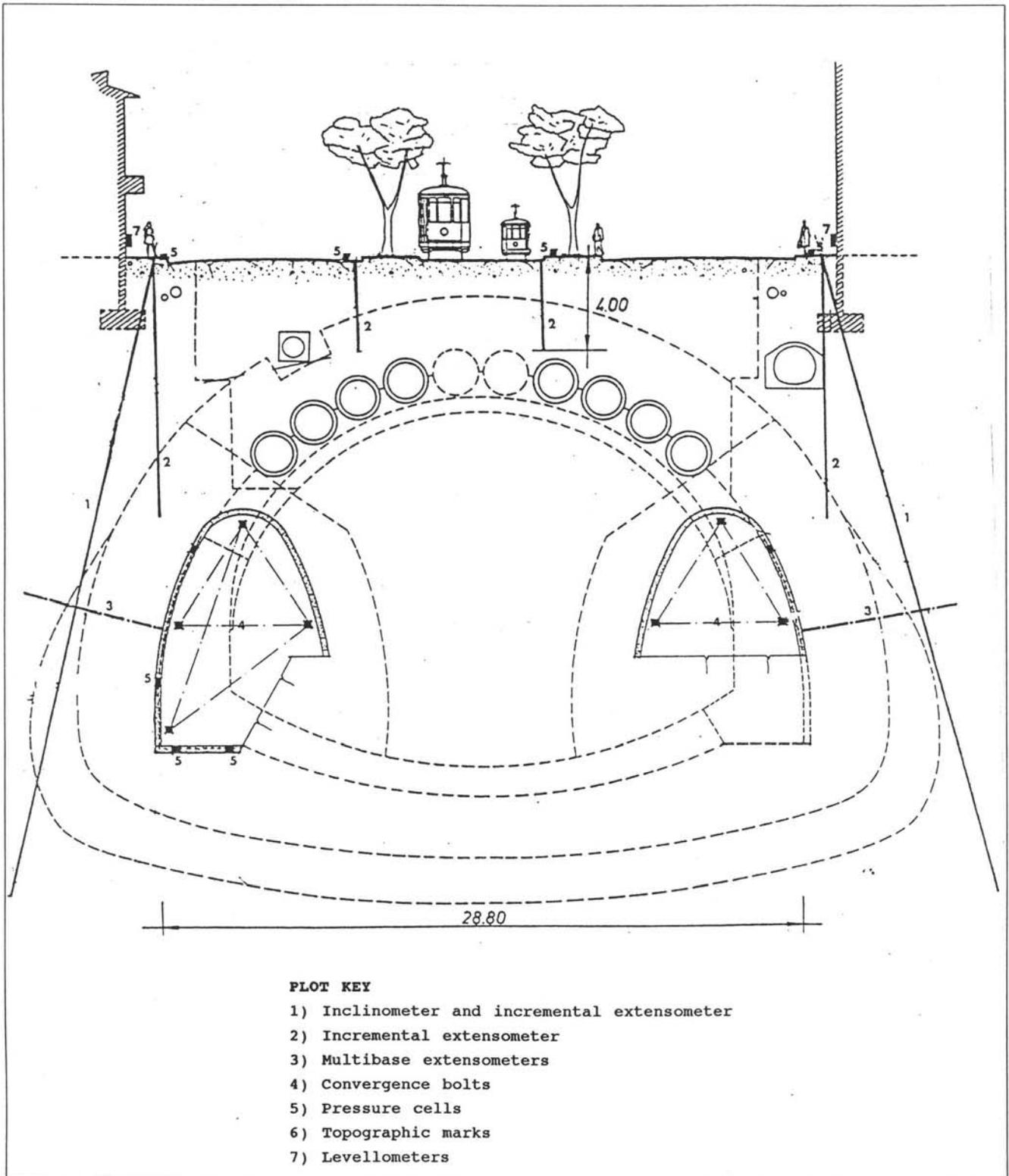


Fig. 3: Disposizione degli strumenti per le misure delle deformazioni del terreno. Disposition of the instruments used to measure soil deformations.

In altre parole questo sistema costruttivo è in grado di creare un arco portante artificiale prima dello scavo, sostituendo nell'assolvimento di questa fondamentale funzione statica il terreno che non sarebbe in grado di sopportare, senza eccessive deformazioni, la redistribuzione di sforzi dovuti all'apertura della cavità. Ciò ha consentito, nel caso della Stazione Venezia, una sostanziale riduzione delle quantità di miscela iniettate (Fig. 2).

Nella zona di calotta sono infatti state applicate percentuali di miscela rispetto al volume teorico di terreno da trattare pari a ~50% di quelle solitamente impiegate nell'area milanese. Il consolidamento della zona in cui sono stati infissi i tubi non ha infatti una funzione statica ma ha avuto il compito di ottenere un materiale

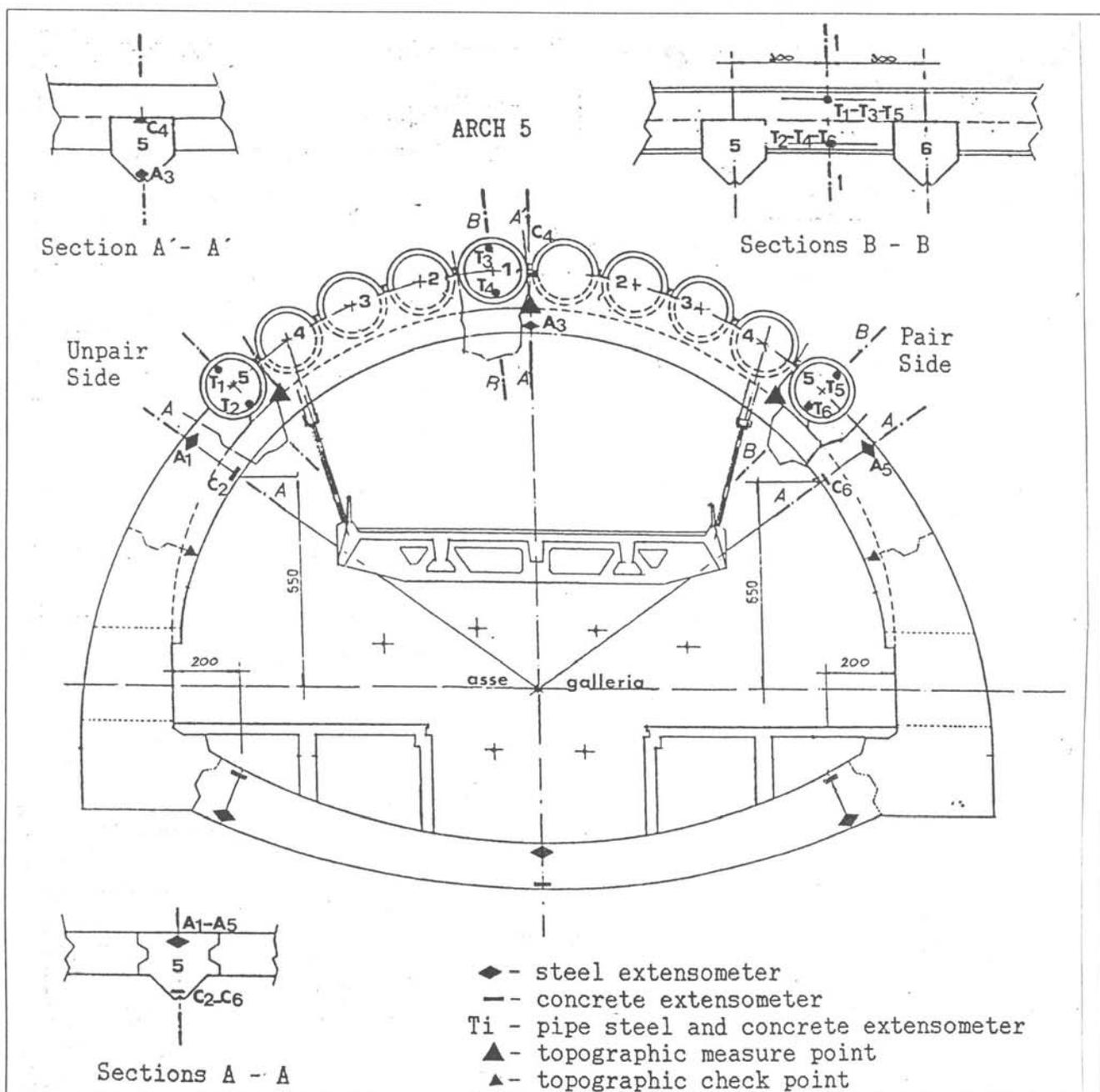


Fig. 4: Disposizione strumentazione di controllo stati tenso-deformativi dell'arco cellulare.

Disposition of instruments to check stresses and deformations of the "Cellular Arch".

dotato di sufficiente omogeneità che permettesse un più agevole avanzamento dei tubi stessi.

Grazie a tale intervento, l'operazione di infissione dei tubi non ha provocato cedimenti superficiali ed è stata completata con deviazioni di ordine centimetrico rispetto all'asse della galleria su una lunghezza di spinta massima di 150 m.

Inoltre non è stato eseguito alcun trattamento della zona di terreno interna al profilo di scavo.

Prima dell'avvio del lavoro sopra menzionato sono state condotte parallelamente sia una prova di infissione dei tubi in un'area adiacente al futuro cantiere, che numerose simulazioni numeriche agli elementi finiti delle varie fasi costruttive. Esse hanno permesso di calibrare e differenziare le intensità e gli spessori del trattamento del terreno nelle varie zone sul contorno della cavità (calotta, piedritti, arco rovescio), di dare una valutazione dei disturbi superficiali attesi adottando questa metodologia innovativa, di trarre indicazioni utili per il dimensionamento della struttura.

Per quanto riguarda i trattamenti di consolidamento essi sono stati introdotti nel modello di calcolo modificando le caratteristiche geotecniche del terreno (aumento del peso specifico, del modulo elastico ed introduzione di una certa coesione) senza alterarne il precedente stato di sforzo dovuto ai carichi litostatici, ai sovraccarichi superficiali ed alle fondazioni degli edifici adiacenti alla galleria. In seguito alla simulazione del consolidamento si è così ottenuta una dilatazione delle zone trattate, con conseguente coazione del terreno al contorno, dovuta al riequilibrio delle forze nodali derivanti dall'introduzione di un materiale più rigido.

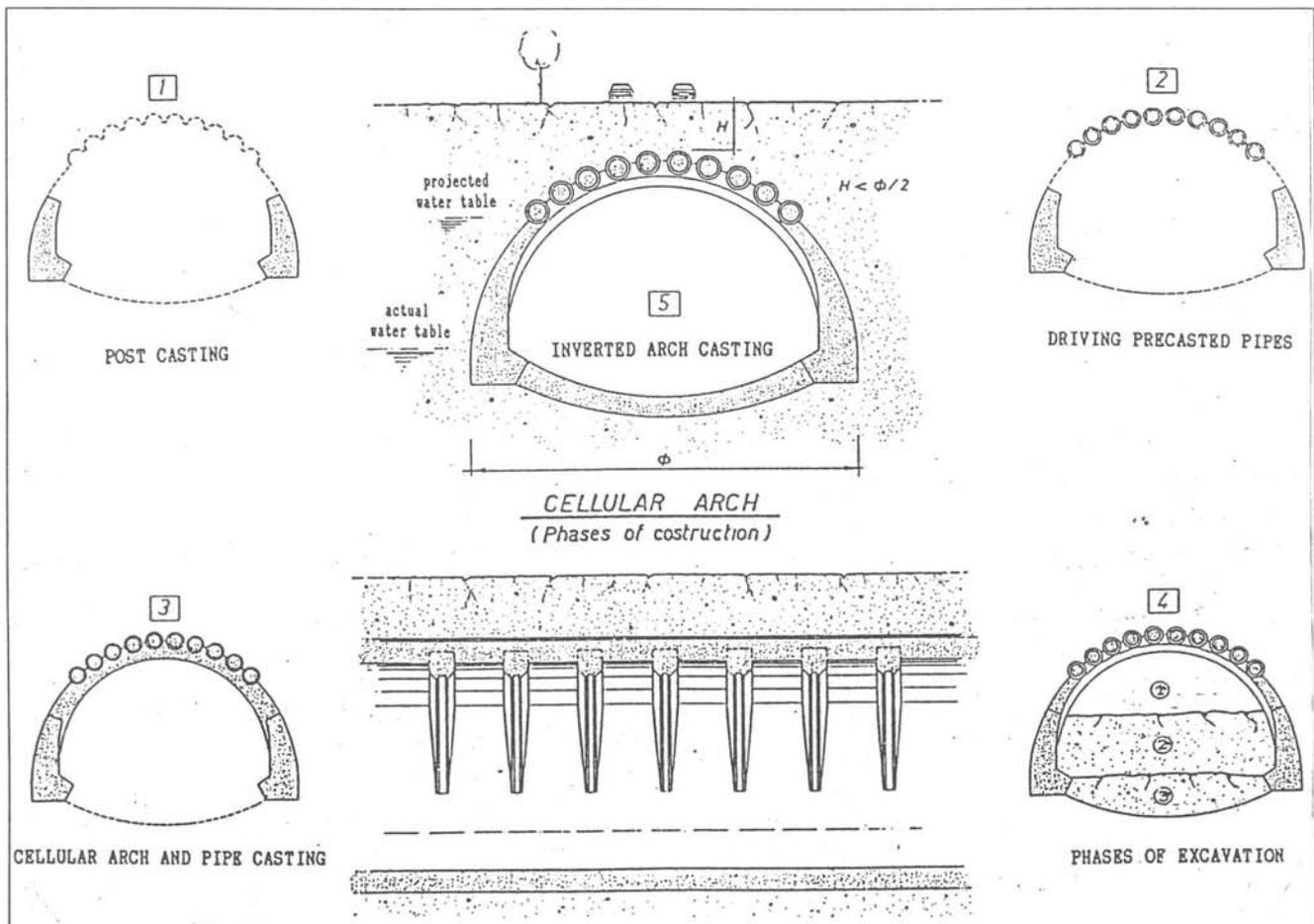


Fig. 5: Fasi di costruzione dell'Arco Cellulare".
Phases of construction of "Cellular Arch".

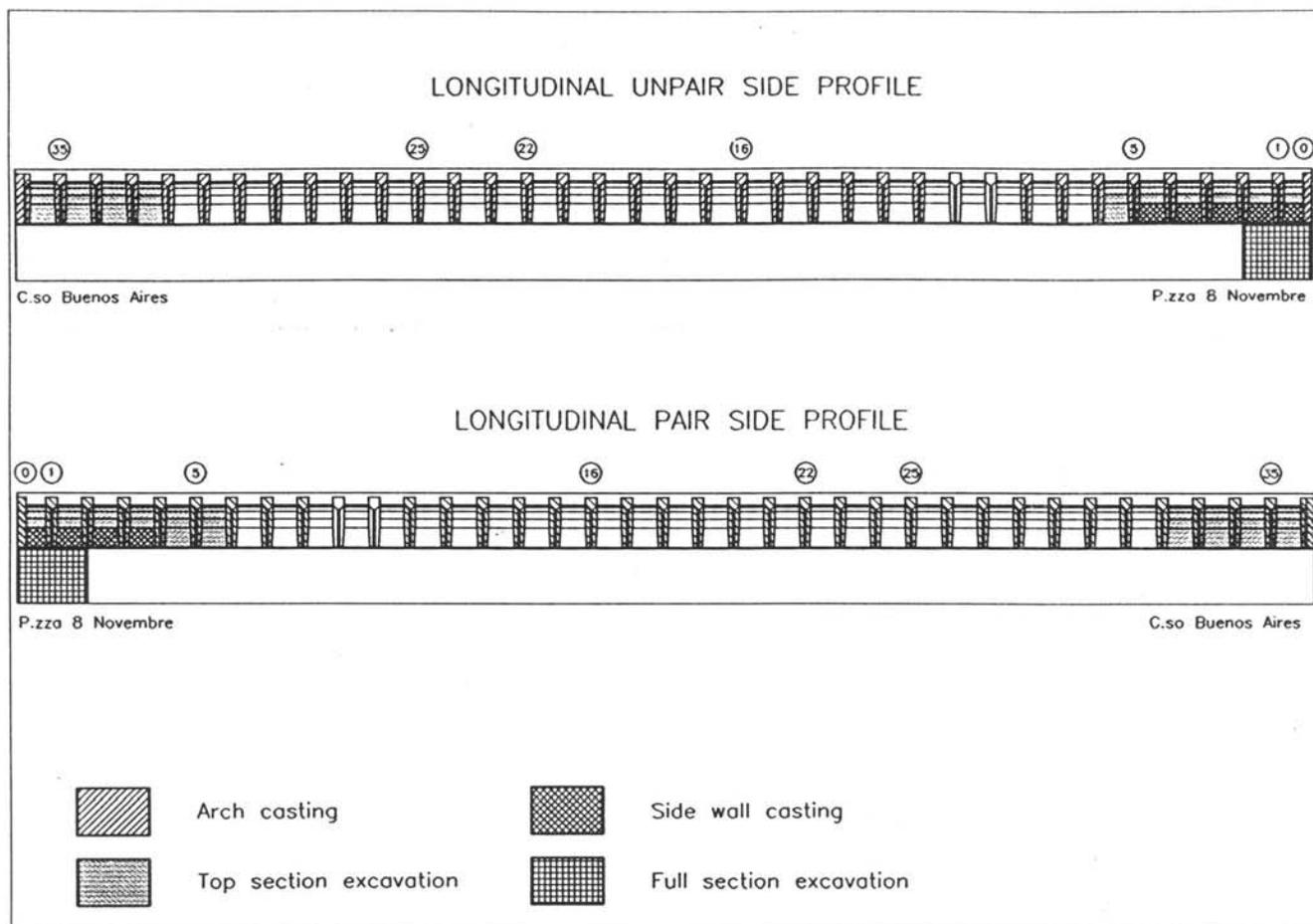


Fig. 6: Situazione attuale (30.11.90) delle operazioni di scavo e getto.
Actual situation (30.11.90) of excavation and casting.

Si ritiene che questa simulazione degli interventi di consolidamento sia più aderente alla realtà e più cautelativa di quella che prevede un rigonfiamento della zona trattata, ottenuto ad esempio a mezzo di una dilatazione anelastica. Tutte le analisi ad elementi finiti eseguite sul modello ad "Arco Cellulare" hanno evidenziato contenutissime deformazioni superficiali al contrario di quelle effettuate per simulare la realizzazione della galleria con metodologie tradizionali.

Inoltre l'esame dello stato tensionale nel terreno al contorno dell'"Arco Cellulare" ha condotto alla scelta progettuale di dimensionare la struttura considerando spinte laterali a riposo anziché attive e ha confermato quindi l'efficacia della struttura ad "Arco Cellulare" nella conservazione del naturale confinamento del terreno. Data l'importanza e l'originalità della struttura è stato previsto in sede progettuale e realizzato in corso d'opera un vasto programma di monitoraggio degli spostamenti superficiali, delle deformazioni del terreno in prossimità della galleria, degli spostamenti ai piedi degli edifici esistenti (Fig. 3) e degli sforzi nel rivestimento (Fig. 4).

Attualmente è in corso una delle fasi costruttive più delicate e cioè lo scavo della calotta della galleria (Figg. 5 - 7).

L'esame delle misure disponibili che comprendono rilevamenti di vario genere sia sul terreno che sulla struttura non ha fino ad oggi evidenziato alcuna rilevante variazione rispetto alla situazione tensionale e deformativa presente prima dell'inizio dei lavori di scavo al di sotto della volta ad "Arco Cellulare".

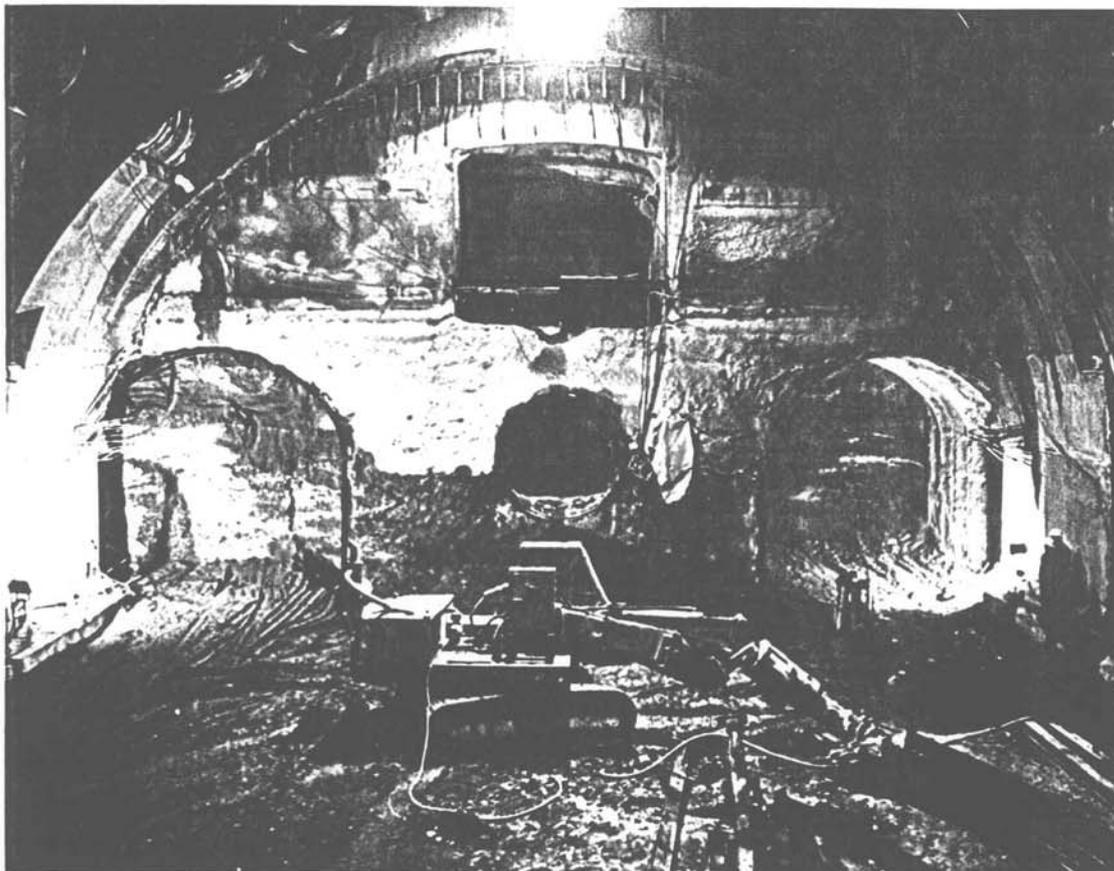


Fig. 7: Testata lato VIII Novembre. Scavo di ribasso (vd. Fig.5 - fase 4.2 e Fig.6 - scavo a piena sezione).
VIII Novembre tunnel front face wall. Full face excavation (see Fig.5 - 4.2 phase and Fig.6 - full face excavation).

Bibliografia

- Colombo A., Lunardi P., Pizzarotti E.M. (1988) - L'emploi de l'arc cellulaire dans la réalisation de la station Venezia du Passante Ferroviario de Milan. Congresso "Tunnels and Water". Madrid, Giugno '88.
- Colombo A., Lunardi P., Luongo E., Pizzarotti E.M. (1989) - L'arc cellulaire pour la Station Venezia du Passante Ferroviario Metropolitano de Milan. Congresso "Tunnels et Micro tunnels en terrain meubles". Parigi, Febbraio '89.
- AA.VV. (1989) - Speciale Arco Cellulare, "Quarry and construction", n°2.
- Colombo A., Lunardi P., Luongo E. (1989) - Innovative techniques for the realization of large diameter tunnels in loose sand. Congresso ITA. Toronto, 9-14 Settembre '89.
- Lunardi P. (1989) - Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: "l'arco cellulare". "Gallerie", S.I.G. Milano '89.
- Lunardi P. (1989) - L'emploi de microtunnels pour la réalisation d'ouvrages souterrains de grande portée: l'arc cellulaire. Congresso "Tunnel and Water". Madrid, Luglio '89.

Lunardi P., Pizzarotti E.M. (1990) - Soft ground tunnelling in the Milan metro and Milan Railway Link. Case histories. "Soft ground tunnelling course". Londra, Luglio '90.

"ENR - Engineering" (1990) - Howard B. Stussman, Londra, 16 Agosto '90.

"Construction today" (1990), n° 50, Adrian Greeman, Londra, Luglio '90.

Lavoro:	Collegamento Ferroviario Passante di Milano Fermata Venezia
Concessionaria per la progettazione e costruzione:	MM Strutture ed Infrastrutture del Territorio, S.p.A.
Impresa costruttrice:	Consorzio GIEMME
Impresa specializzata:	Rodio S.p.A. e Icos S.p.A.
Progettazione esecutiva:	Rocksoil S.p.A.