

PERFORMANCE OBSERVATIONS DURING CONSTRUCTION OF THE LARGE SPAN MILAN METRO  
(VENEZIA) STATION

P. Lunardi<sup>(a)</sup>, A. Colombo<sup>(b)</sup>, E.M. Pizzarotti<sup>(c)</sup>

<sup>a</sup>Professor of Engineering, Parma University, Technical Director, Rocksoil S.p.A. P.zza S. Marco 1, Milan, Italy

<sup>b</sup>Engineer, Scientific Director, MM Strutture e Infrastrutture per il Territorio S.p.A. Via del Vecchio Politecnico 8, Milan, Italy

<sup>c</sup>Engineer, Technical Manager, Rocksoil S.p.A. Via Solferino 40, Milan, Italy

**Abstract**

Venezia station is an underground cavity, in alluvium soil, of almost 30 m in excavated width, constructed using innovative bore tunnel methods. The overburden is only 4 - 5 m. and the station is right in the centre of the city. The results of measurements and monitoring from instrumentation sited in the ground and the installation during the whole course of construction, is given and discussed below.

The Milan Urban Link Line connects the main town railway stations to the underground transport system, thus creating a link between the Milan North-West and South-East transport lines.

Venezia Station, an underground cavity with an excavated width of 29 m approx., is the most important station yet planned in the Link connecting the railway line to the Line 1 of the Milan Metro. It is located in loose soil noncohesive, alluvial, partially immersed in the water table) beneath a major city road subject to intense traffic. The overburden is of only 4 - 5 m and there are numerous underground utilities present in the surface layer (including a particularly delicate 220.000 V. underground power line very sensitive to movement), as well as multi-story buildings in the immediate vicinity. The use of innovative "Cellular Arch" technology meant that the whole station could be excavated using bore tunnelling methods and that deformations and surface subsidence could be maintained within safe limits, as far as the stability of existing buildings and underground utilities was concerned.

The "Cellular Arch" is a composite semi-cylindrical ribbed structure. The longitudinal elements consist of rc. tubes fixed into the ground around a circular profile. The transverse or rib elements consist of arches in r.c.. The load bearing roof of the tunnel is constructed completely before

excavation operations begin and consequently adequate confinement of the ground is provided without appreciable deformations (for the construction stages of the "Cellular Arch" c.f. fig. 1).

Given the importance and originality of the structure a vast monitoring programme, to be carried out during all stages of construction, was drawn up at the design stage. The programme was designed to measure:

- surface movements and movements of existing buildings and structures;

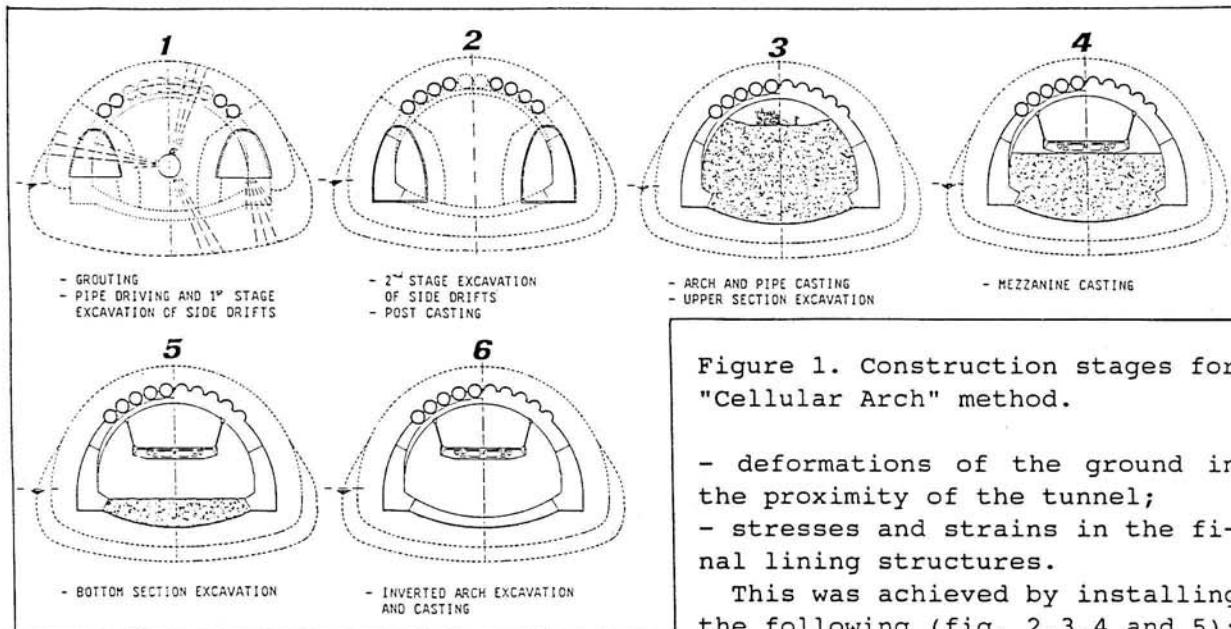


Figure 1. Construction stages for "Cellular Arch" method.

- deformations of the ground in the proximity of the tunnel;
- stresses and strains in the final lining structures.

This was achieved by installing the following (fig. 2,3,4 and 5):

- 1) chains of level gauges around the perimeters of buildings overlooking the tunnel and horizontal inclinometers for the high voltage power lines running underground very close to the cavity;
- 2) a dense network of topographical surface marks distributed along the length of the tunnel;
- 3) incremental extensometers and inclinometers, located on four cross sections of the station (main monitoring stations) consisting of 3 pairs of instruments at depths of 30 m, 12 m and 4 m respectively. Each instrument was equipped with a surface mark for topographical control;
- 4) multibase extensometers with bases at 5, 10 and 15 m, two for each main monitoring station located on the posts.
- 5) convergence measurements for the side drifts tunnels;
- 6) pressure cells between the lining and the ground, eight for each main monitoring station;
- 7) strain gauges, located at the main monitoring stations, welded to the reinforcement and buried in castings of the final structures;
- 8) topographical marks inside the station tunnel, positioned on the arches, in the tunnel roof and on the posts.

Construction of the station tunnel began in 1987, and was completed with the casting of the invert in June 1992. Measurements and monitoring relating to one part of the instrumentation will continue when the station is operational in order to provide long term monitoring of the behaviour of the structures. Recording and processing of measurements provided a sufficiently complete picture of the stress-strain conditions of the ground and the structure, from the beginning of the works until the casting of the invert, to be able to make useful and continuous comparisons between design forecasts and set safety limits for the stability

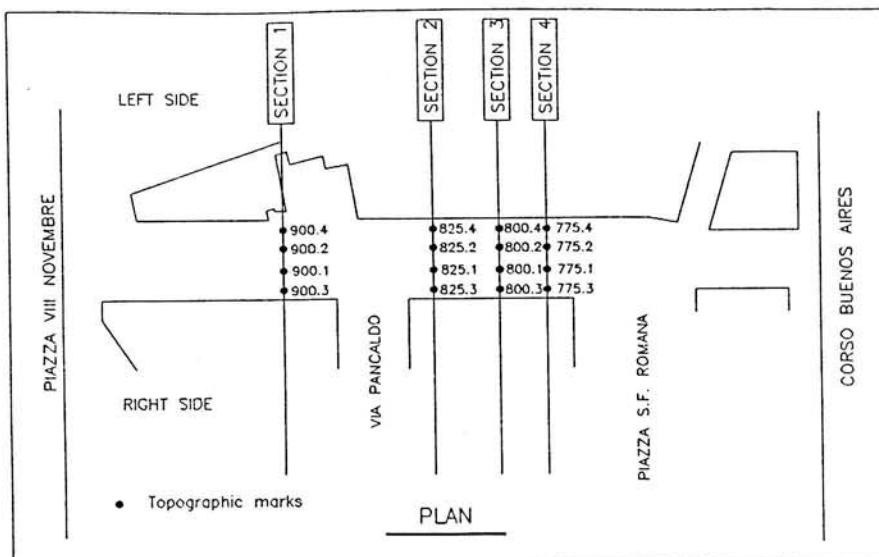


Figure 2. Main monitoring station plan view.

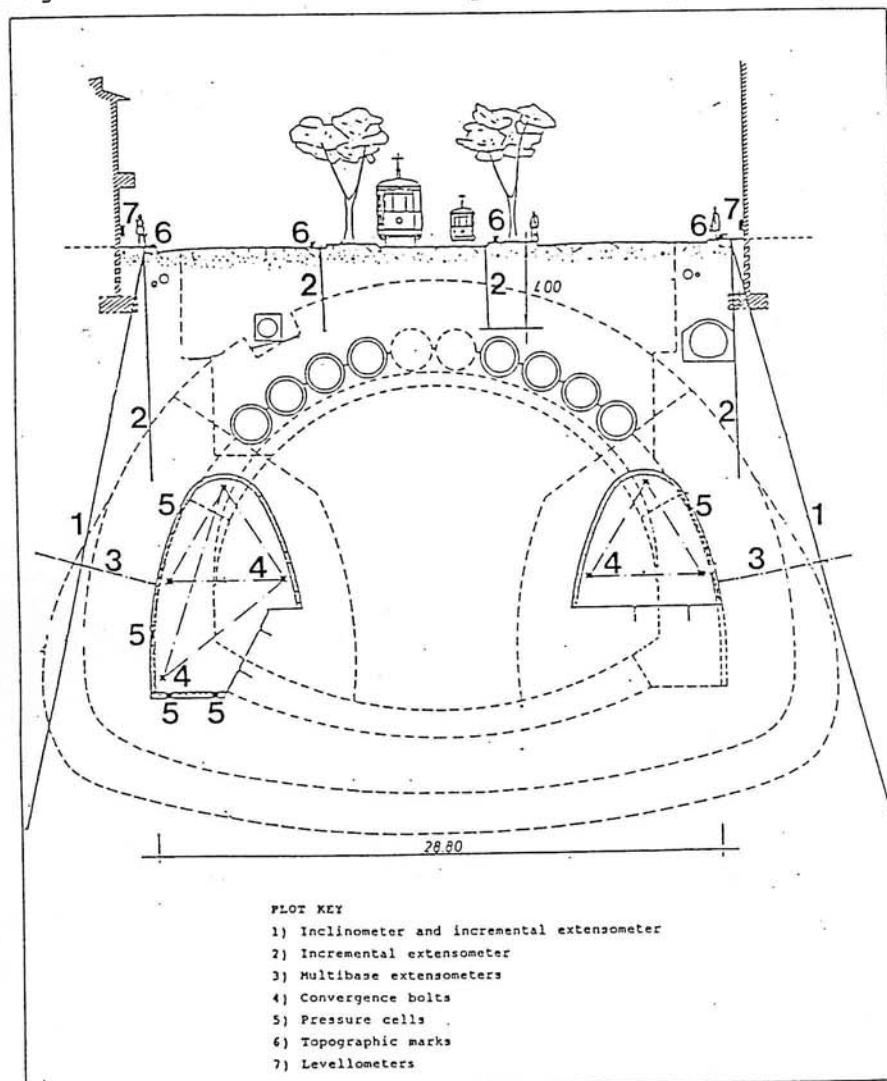


Figure 3. Positioning of the instruments used to measure soil deformations.

of existing structures.

#### - SURFACE MOVEMENTS

Figure 6 gives the graphs for vertical movements of the surface topographical marks located on the main monitoring stations.

After initial upwards movements following ground improvement injections, subsequent excavation of the side drifts (stages 1 and 2, fig. 1) did not cause any appreciable movements.

During the construction of the cellular arch (stages 2 and 3, fig. 1) measurements from surface marks remained practically constant over time with very slight downwards settlements caused by various underground works.

The subsequent stage involving excavation of the roof arch resulted in more marked subsidence.

The increase in ground movements was at first slow and then became more rapid as soon as the excavation face passed the cross section being monitored. Movements then diminished gradually as the cutting face moved further and further away. This behaviour, observed by means of the marks along the centre of the road (fig. 6), was confirmed although to a lesser degree by the

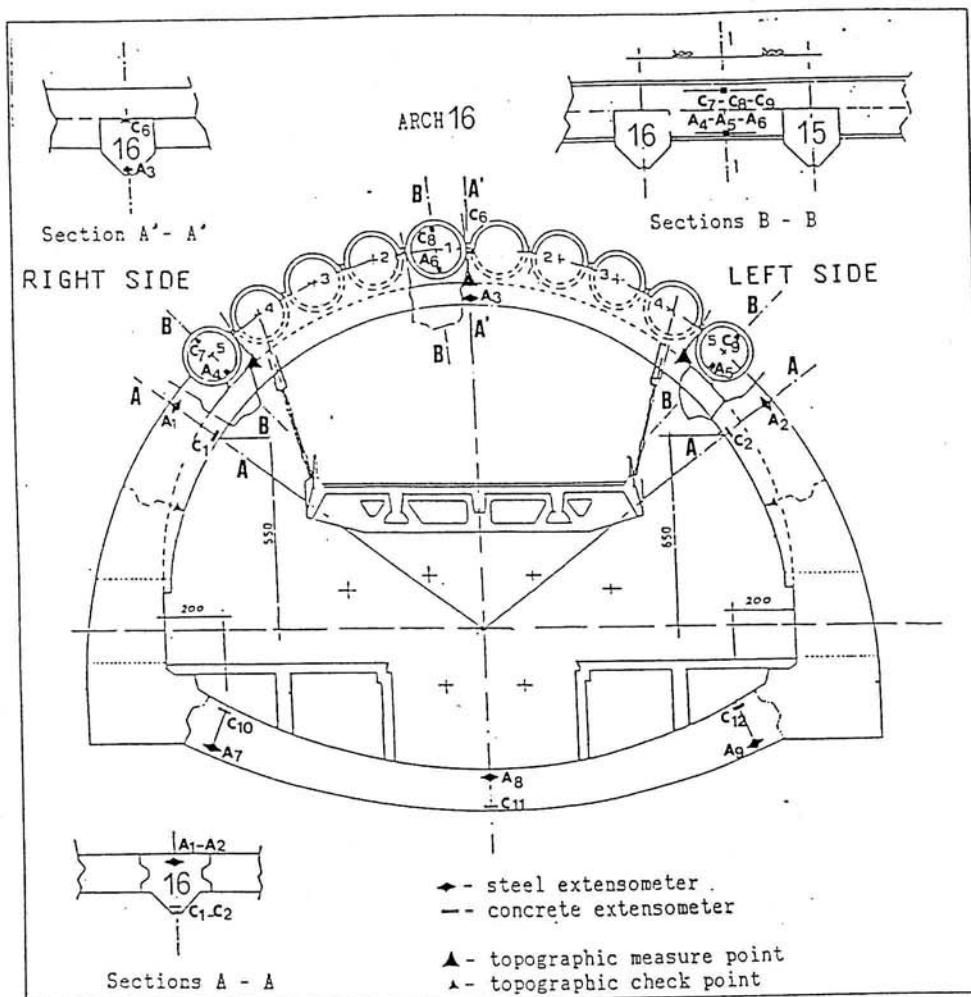


Figure 4. Disposition of instruments to check stress and deformations of the "Cellular Arch".

nevertheless tended to stabilise during the final construction stage of the casting of the invert (stage 6, fig. 7).

#### - ARCH MOVEMENTS

Figure 8 gives the measurements taken from topographical marks, located in the tunnel, used to assess movements of the arches.

It can be seen that for the whole of the excavation of the roof arch, throughout the tunnel, the topographical marks positioned on the sides and the crown of the roof arch showed maximum settlement of 1.5 mm approx.

These values were practically the same for all three points of measurement suggesting, therefore, a rigid movement of the structure.

A comparison of the measurements taken from the marks on the arches with those taken from surface topographical marks shows that in all probability the delay, though very slight, in the readings from the former, following excavation, made it impossible to acquire a complete picture of deformations of the structure as the cutting face passed the arch.

The subsequent stage of excavation of the bench, led to further settlement of the roof arch and the posts and the latter were practically symmetrical.

These readings indicated a further rigid movement of the entire structure of 1.5 - 3.0 mm approx., accompanied by a relative movement between the posts and the roof arch (elastic vertical deformation of the arch).

Subsequent casting of the invert had an almost immediate stabilising ef-

topo-graphical marks sited by buildings, where maximum movements during the passage of the face did not exceed values of 1 - 2 mm. Measurements taken from incremental extensometers showed the same effect described above (fig. 7 and 10), the effect being smaller for the deeper bases where movements were less. The operations for the casting of the mezzanine cross section and subsequent deepening (stages 4 and 5, fig. 1) excavations resulted in settlements measured in millimetres, which ne-

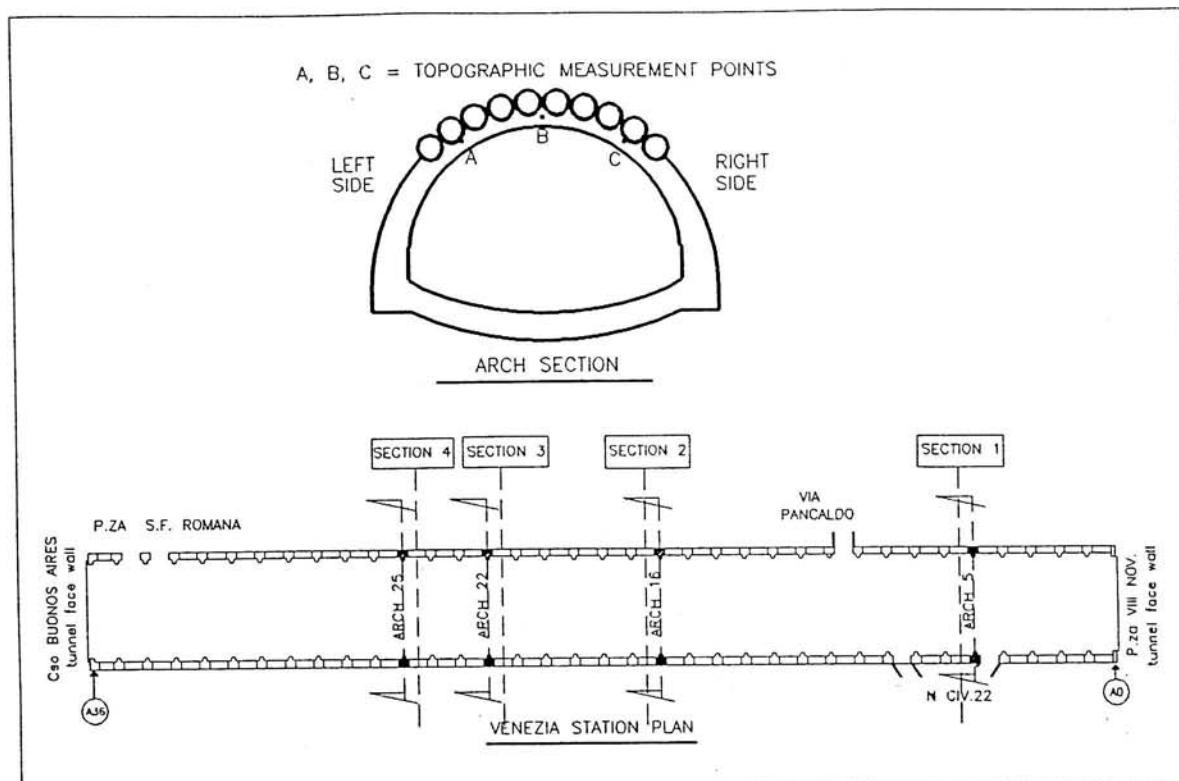


Figure 5. Instrumented arch disposition.

fect on deformation as can be seen from the course of the readings over time given in the graph.

#### - INSTRUMENTATION: ARCHES AND TUBES

The measurements taken from the strain gauges installed on the reinforcements and in the concrete of the arches (transverse elements) and the tubes (longitudinal elements) are shown over time in the graphs in figure 9.

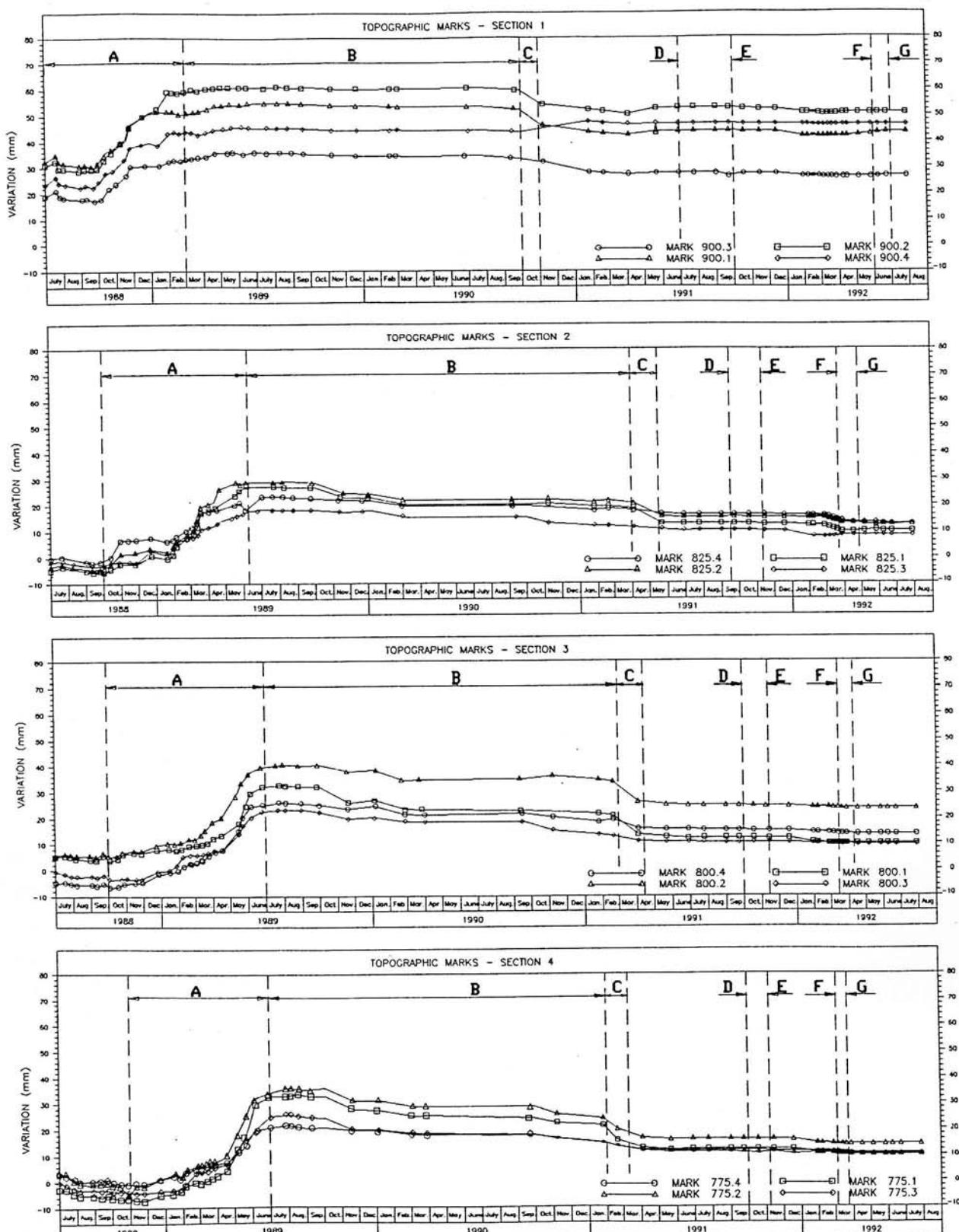
The measurements taken before the passage of the face showed tensile strains in the concrete, very probably due to shrinkage phenomena.

Once the roof arch was excavated, the level of strain in the structure changed, even though it was rather contained with respect to design forecasts. In fact the crown and the sides of the roof arch and the posts were at the limit of decompression indicating that loads were not completely transmitted from the ground to the arches following excavation of the roof arch.

As the cutting face advanced, tensile stress in the concrete tended to diminish until definite compression values were obtained. Tensile stress values continued to be obtained from the tubes however.

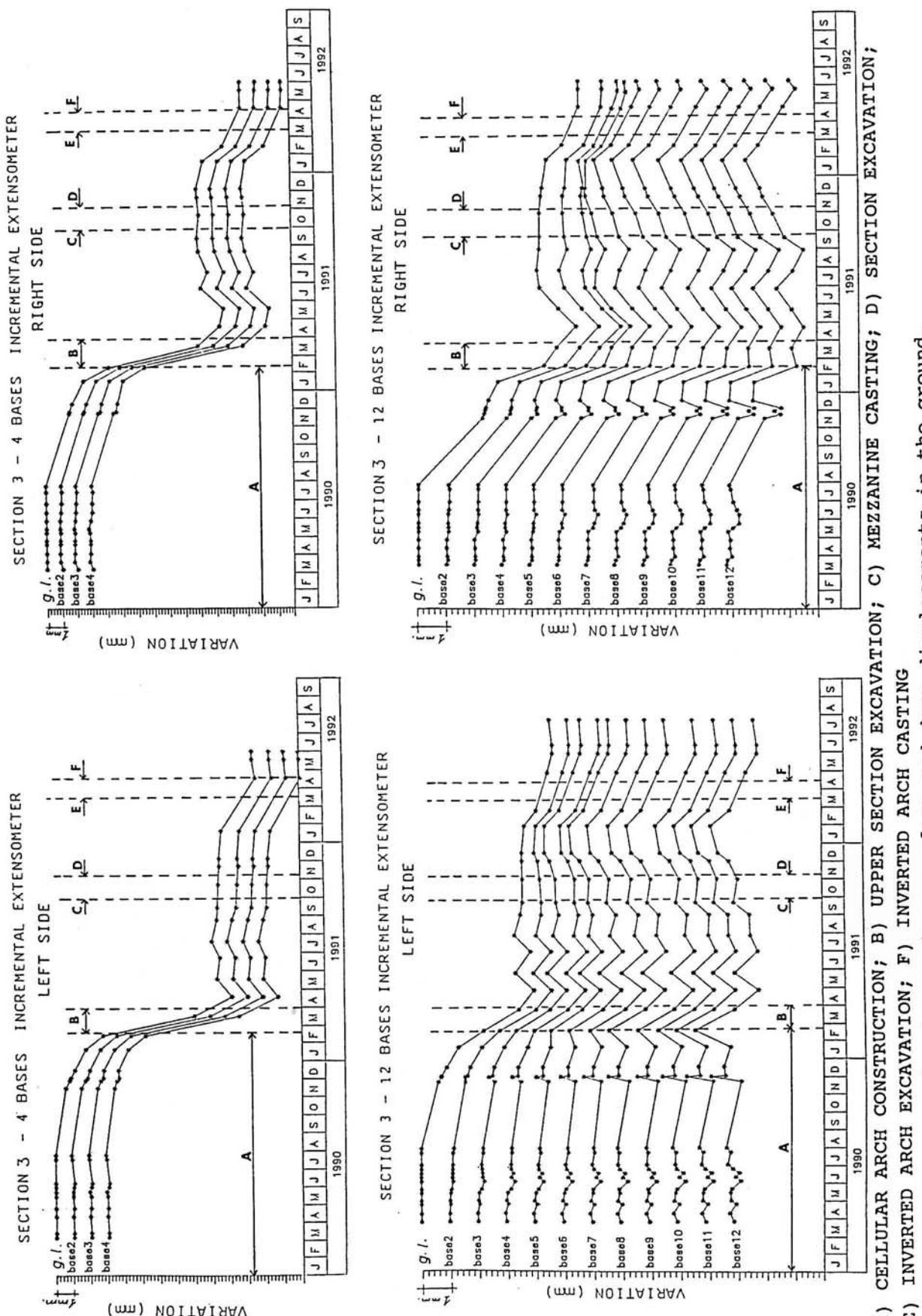
During subsequent construction stages (casting of the mezzanine level and excavation of the bench), values obtained from the instruments showed varying levels of stress, indicating the beginning of the process of loading on the arches. This process was not observed from tube measurements.

During the last stage of the works, the excavation and casting of the tunnel invert, the static behaviour of all the arches monitored was similar and essentially stable over time. Both in the roof arch and on the posts, acceptable values close to design forecasts were obtained for the stresses in the concrete and values even lower than those forecast were obtained for the steel. Readings for stresses in the tubes between arches were lower than design forecasts and this is a sign that the tubes were essentially not under



A) GROUTING; B) CELLULAR ARCH CONSTRUCTION; C) UPPER SECTION EXCAVATION;  
D) MEZZANINE CASTING; E) BOTTOM SECTION EXCAVATION; F) INVERTED ARCH EXCAVATION;  
G) INVERTED ARCH CASTING

Figure 6. Topographic mark displacements during construction.



A) CELLULAR ARCH CONSTRUCTION; B) UPPER SECTION EXCAVATION; C) MEZZANINE CASTING; D) SECTION EXCAVATION;  
E) INVERTED ARCH EXCAVATION; F) INVERTED ARCH CASTING  
Figure 7. Incremental extensometer: surface and deep displacements in the ground.

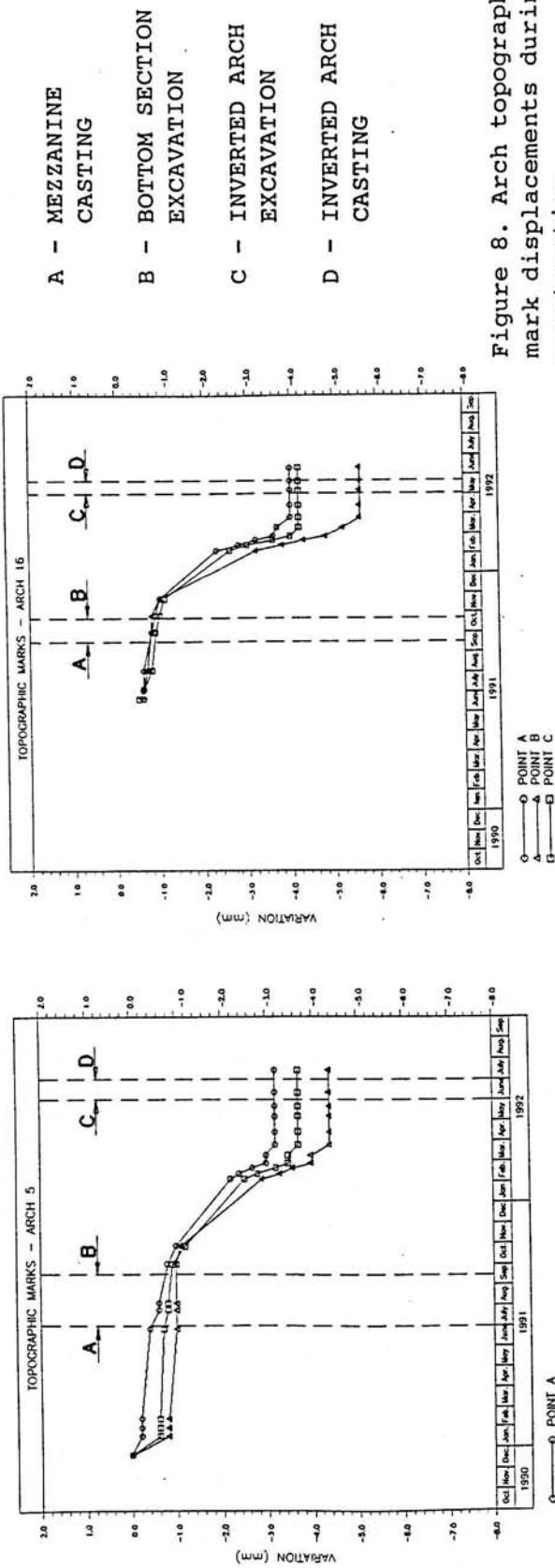
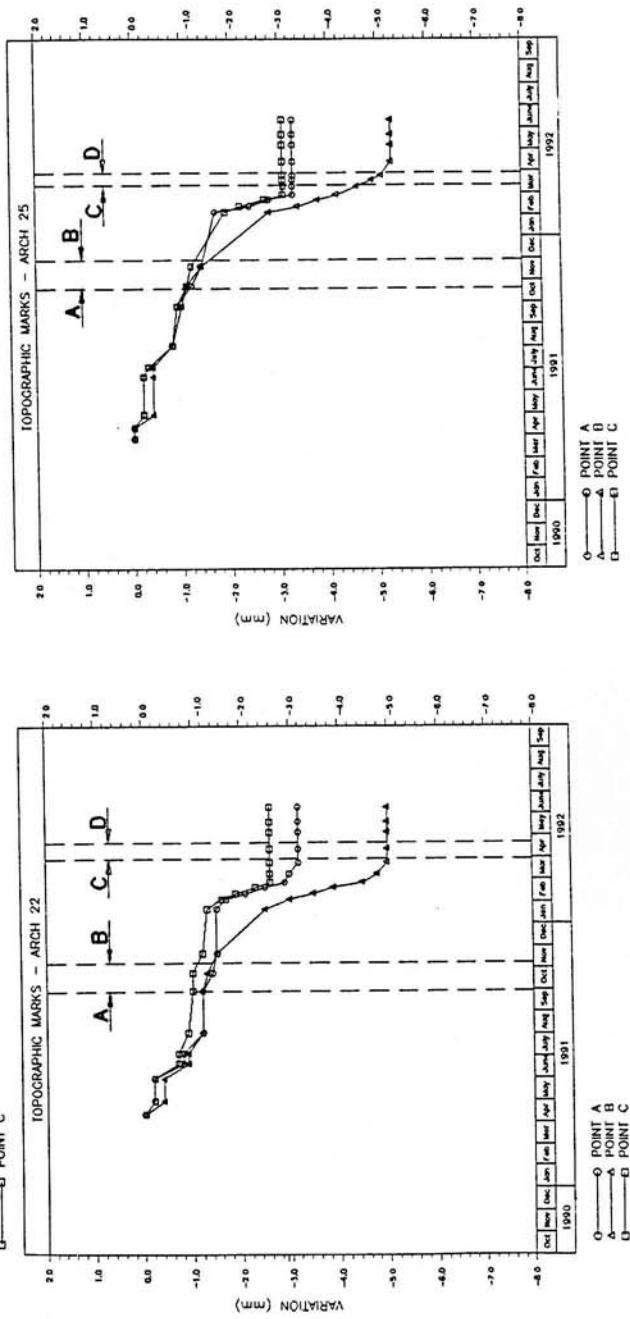


Figure 8. Arch topographic mark displacements during construction.



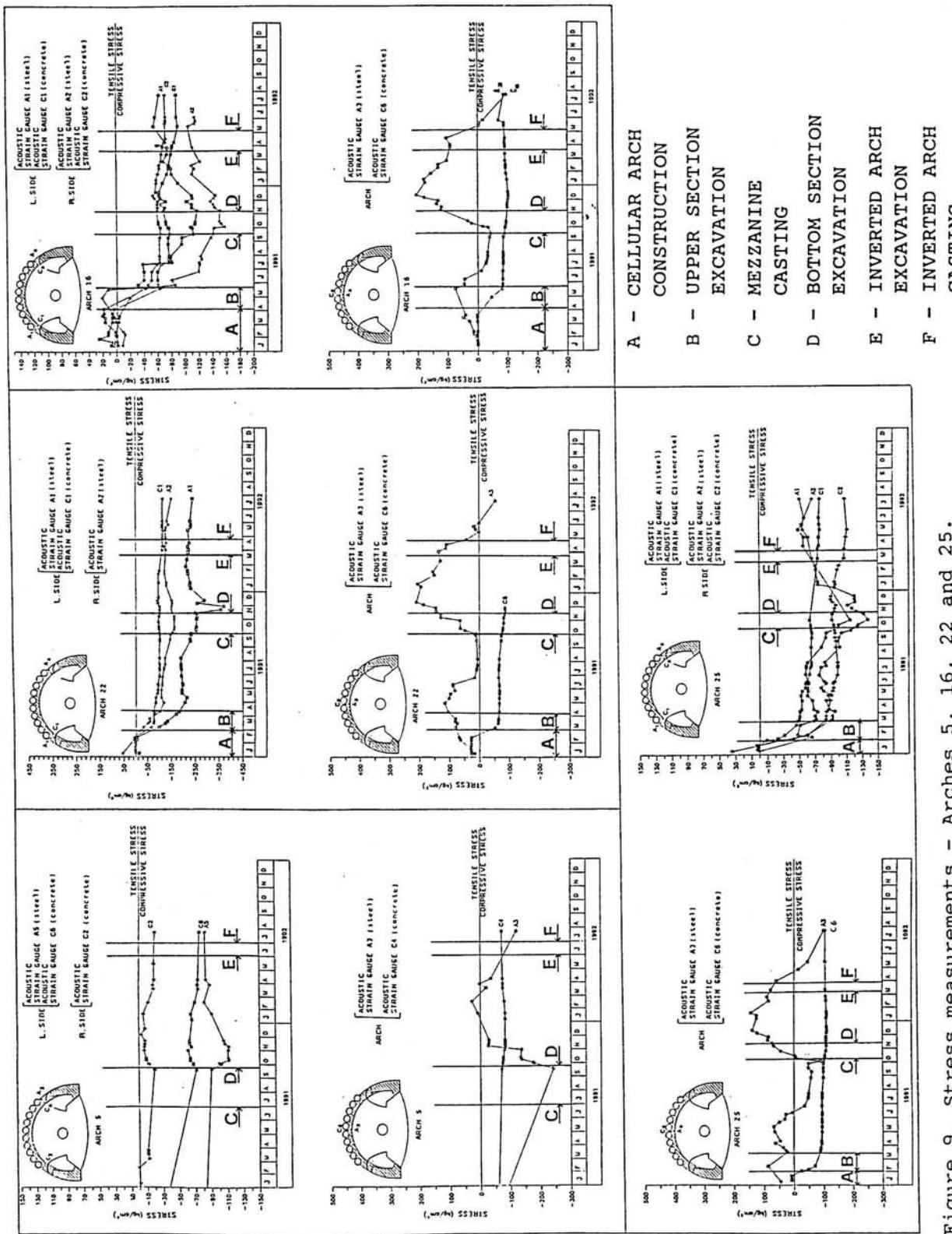


Figure 9. Stress measurements – Arches 5, 16, 22 and 25.

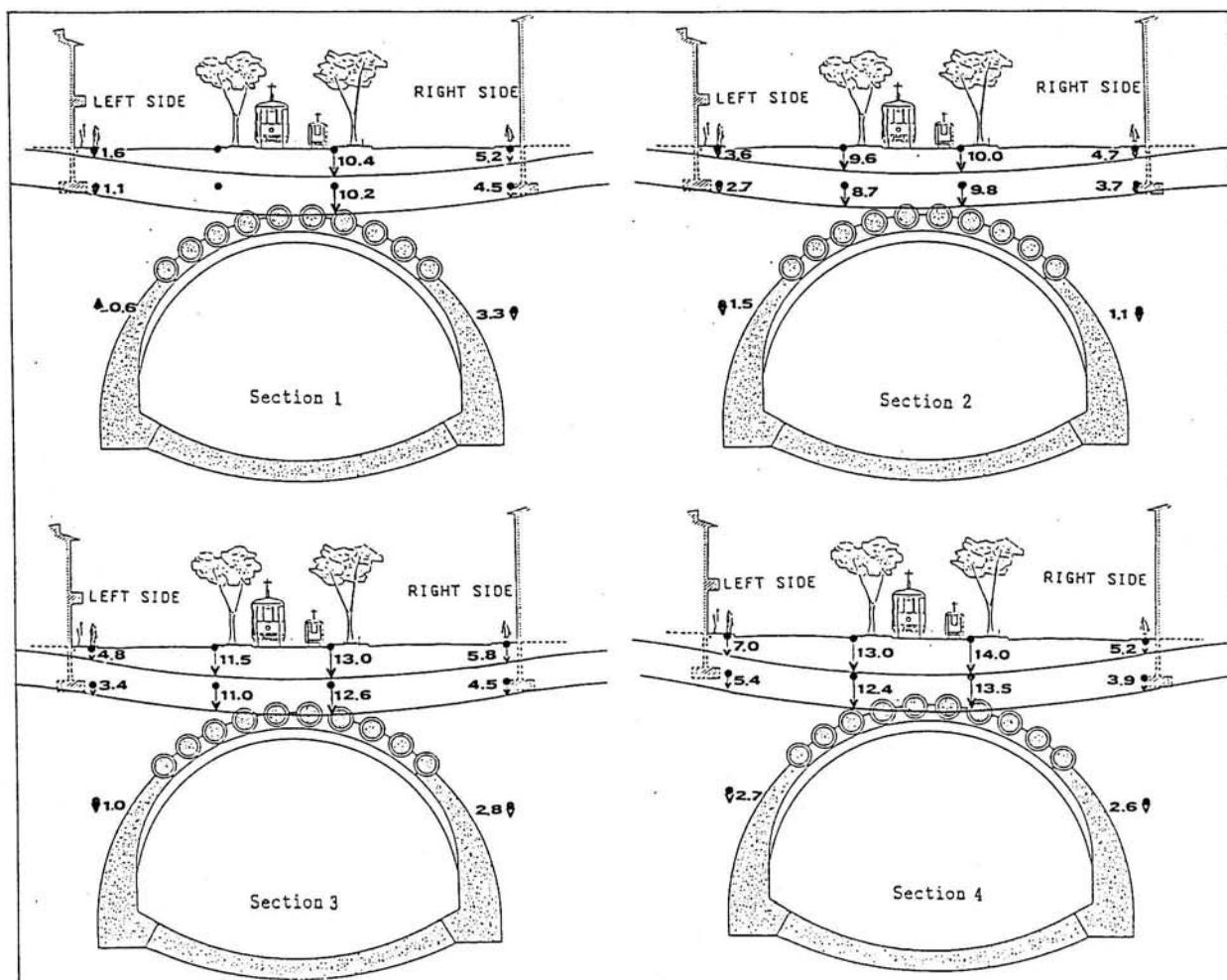


Figure 10. Maximum displacements (related to the consolidation stage) checked at the end of construction.

load. This suggests a longitudinal arch effect which transmits the load directly onto the arches.

Venezia Station - Lot 2PB Milan Urban Link Line.

**Client:** Region of Lombardy, Municipality of Milan, State Railways, North

Milan Railways. - **Project management:** overall design and works direction:

MM Strutture e Infrastrutture per il Territorio S.p.A.- **General Construc-**

**tor:** Consorzio GIEMME S.p.A. - **Executive design:** Rocksoil S.p.A.

#### REFERENCES

- 1 A. Colombo, P. Lunardi, E. Luongo (1989) - "Innovative technique for the realization of large diameter tunnels in loose sand". Congresso ITA. Progress and innovation in tunnelling. Toronto, 9-14 September '89.
- 2 P. Lunardi, E.M. Pizzarotti (1990) - "Soft ground tunnelling in the Milan metro and Milan Railway Link. Case histories". "Soft ground tunnelling course". Institute of Civil Engineering. London, 10-12 July '90.
- 3 "Construction today" (1990), Adrian Greeman, London, July '90.
- 4 "ENR - Engineering" (1990) - Howard B. Stussman, London, 16 August '90.
- 5 P. Lunardi (1991) - "Cellular arch technique for large span station cavern" - Tunnels and tunnelling, November '91.
- 6 "Construction today" (1992), Adrian Greeman, London, June '92.

RISULTATI DELLE MISURE E DEI CONTROLLI EFFETTUATI NEL CORSO DELLA COSTRUZIONE CON METODO DELL'ARCO CELLULARE DELLA FERMATA VENEZIA DA 22.80 m DI DIAMETRO INTERNO DEL COLLEGAMENTO FERROVIARIO PASSANTE DI MILANO

Autori: P.Lunardi<sup>(a)</sup> and E.M. Pizzarotti<sup>(b)</sup>

<sup>a</sup>Professor of Engineering Parma University, Technical Director, Rocksoil S.p.A., P.zza S. Marco 1, Milano, Italia

<sup>b</sup>Engineer, Technical Manager, Rocksoil S.p.A., Via Solferino 40, Milano, Italia

**Abstract:** La Stazione Venezia è una cavità sotterranea di quasi 30 m di larghezza di scavo realizzata a foro cieco con soli 4 ÷ 5 m di copertura in terreni alluvionali ed in pieno centro cittadino con l'applicazione di modalità esecutive innovative.

Si riportano i risultati delle misure della strumentazione posta in opera nel terreno e nella struttura durante tutto il corso della realizzazione.

La Stazione Venezia del Collegamento Ferroviario Passante di Milano è una cavità sotterranea di 29 m di larghezza di scavo, ubicata al di sotto di una arteria cittadina ad alta intensità di traffico in terreni scolti (alluvioni incoerenti parzialmente immerse in falda), con soli 4 ÷ 5 m di copertura, con numerosi sottoservizi presenti nel sottosuolo superficiale, (tra cui un elettrodotto da 220.000 V assai delicato e sensibile alle deformazioni), e con edifici multipiano nelle immediate vicinanze.

L'applicazione della metodologia innovativa dell' "Arco Cellulare" ha consentito la completa realizzazione dell'opera a foro cieco, limitando le deformazioni e i cedimenti superficiali entro valori compatibili con il mantenimento della funzionalità delle strutture e dei sottoservizi preesistenti. L'"Arco Cellulare" è una struttura composita a graticcio semicilindrico i cui elementi longitudinali sono formati da tubi in c.a. infissi nel terreno lungo un profilo circolare e quelli trasversali sono archi in c.a.. La struttura portante della volta della galleria viene costruita completamente prima dell'inizio delle operazioni di scavo, fornendo al terreno un adeguato confinemento senza deformazioni apprezzabili (per le fasi costruttive dell'"Arco Cellulare" vedi fig. 1).

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 che permettesse di valutare in tutte le fasi di lavoro:

- gli spostamenti della superficie e delle strutture esistenti;
- le deformazioni del terreno in prossimità della galleria;
- le sollecitazioni e le deformazioni nelle strutture di rivestimento definitive.

- A tale scopo si è provveduto alla messa in opera di (figg. 2, 3, 4 e 5):
- 1) catene livellometriche lungo il perimetro degli edifici prospicienti la galleria e di deflettometri in corrispondenza del cavidotto ad alto voltaggio interrato a poca distanza dalla cavità;
  - 2) una fitta rete di capisaldi topografici di superficie distribuita lungo lo sviluppo della galleria di stazione;
  - 3) estensimetri incrementali ed inclinometri, disposti su 4 sezioni trasversali all'asse della stazione (Stazioni principali) e composte da 3 coppie di strumenti profondi rispettivamente 30 m, 12 m e 4 m. Ogni strumento è stato attrezzato con caposaldo superficiale per controllo topografico;
  - 4) estensimetri multibase con basi a 5, 10 e 15 m, in numero di 2 per ogni stazione principale, e ubicati in corrispondenza dei piedritti;
  - 5) misure di convergenza per le gallerie di piedritto;
  - 6) celle di pressione tra rivestimento e terreno in numero di 8 per ogni stazione principale;
  - 7) estensimetri a corda vibrante, saldati alle armature e annegati nei getti delle strutture definitive in corrispondenza delle stazioni principali;
  - 8) capisaldi topografici all'interno della galleria di stazione, posizionati sugli archi in corrispondenza della calotta e dei piedritti.

La costruzione della galleria di stazione, iniziata nell'anno 1987, è stata completata col getto dell'arco rovescio alla fine del mese di giugno dell'anno 1992. Le misurazioni e i rilievi di una parte della strumentazione verranno protratti nel tempo durante l'esercizio della stazione al fine di controllare il comportamento dell'opera anche nel lungo termine.

La registrazione e l'elaborazione delle misure effettuate hanno fornito un quadro sufficientemente completo della situazione tensionale e deformativa del terreno e della struttura dall'inizio dei lavori al getto dell'arco rovescio permettendo un utile e costante confronto sia con i risultati progettuali sia con i limiti imposti per il mantenimento della funzionalità delle strutture esistenti.

#### - Spostamenti superficiali

Nella fig. 6 sono rappresentati i diagrammi relativi agli spostamenti verticali dei capisaldi topografici di superficie.

Dopo i sollevamenti iniziali a seguito delle iniezioni di consolidamento, lo scavo successivo delle gallerie di piedritto (fasi di scavo 1 e 2, fig. 1) non comporta deformazioni apprezzabili. Durante la costruzione dell'arco cellulare (fasi 2 e 3, fig. 1) le misure evidenziano un andamento pressoché costante nel tempo, con lievissimi spostamenti verso il basso, dovute alle varie lavorazioni in sotterraneo. La fase successiva relativa allo scavo di calotta si manifesta invece con cedimenti più marcati. L'incremento delle deformazioni, dapprima lento e poi più rapido non appena il fronte di scavo supera la sezione di misura, si va via via smorzando man mano che il fronte di scavo si allontana. Questo comportamento, evidenziato dai capisaldi in asse strada (fig. 6), viene confermato anche se in misura meno marcata da quelli ubicati in corrispondenza degli edifici, dove gli spostamenti massimi durante il passaggio del fronte di scavo non superano il valore di 1-2 mm. Anche l'andamento delle misure rilevate con gli estensimetri incrementali ricalca quanto sopra detto, con le basi più profonde affette da spostamenti che si smorzano man mano che aumenta la profondità (figg. 7 e 8).

Le operazioni relative al getto del mezzanino e al successivo scavo di ribasso (fasi 4 e 5, fig. 1), danno luogo a sedimenti di ordine millimetrico che tuttavia tendono a stabilizzarsi nella fase costruttiva finale corrispondente al getto dell'arco rovescio (fase 6, fig. 1).

#### - Spostamenti archi

Nella figura 9 sono rappresentati i diagrammi relativi alle misure dei capisaldi topografici in galleria per la valutazione degli spostamenti degli archi. Si evidenzia che fino all'ultimazione in tutta la galleria dello scavo di calotta, le battute topografiche dei capisaldi, posizionati in corrispondenza delle reni e della mezzeria hanno rilevato sedimenti massimi di  $\approx 1.5$  mm. Tali valori sono risultati pressoché uguali nei tre punti di lettura, suggerendo quindi uno spostamento rigido della struttura.

Confrontando le misure di spostamento degli archi con quelli del terreno si nota che, con ogni probabilità, il se pur minimo ritardo nel rilievo delle prime a seguito dello scavo, ha comportato l'impossibilità di cogliere nelle sua completezza la deformazione della struttura all'atto del passaggio del fronte in corrispondenza dell'arco.

Il periodo successivo allo scavo dello strozzo comporta ulteriori sedimenti in calotta e sui piedritti, quest'ultimi pressoché simmetrici. Ciò permette di valutare un ulteriore spostamento rigido della intera struttura di  $\approx 1.5 \div 3.0$  mm accompagnato da uno spostamento differenziale calotta-piedritti (freccia elastica dell'arco in chiave). Il successivo getto dell'arco rovescio opera una pressoché immediata azione stabilizzante come si può notare dall'andamento delle letture riportate nel grafico.

#### - Strumentazione archi e tubi

L'andamento delle misure degli estensimetri a corda vibrante installati sulle armature e nel calcestruzzo degli archi (elementi trasversali) e dei tubi (elementi longitudinali) è rappresentato nei diagrammi di fig. 10 e fig. 11. Le misure effettuate prima del passaggio del fronte di scavo della calotta, rilevano valori tensionali di trazione nel calcestruzzo imputabili con molta probabilità al fenomeno del ritiro.

Avvenuto lo scavo della calotta, il livello tensionale nella struttura muta, anche se risulta ancora piuttosto contenuto rispetto alle previsioni di progetto. La calotta e le reni risultano infatti al limite di decompressione segno che i carichi non vengono trasmessi completamente dal terreno alla struttura a seguito dello scavo di calotta.

Man mano che il fronte di scavo avanza, i valori di trazione nel calcestruzzo mostrano una tendenza alla diminuzione per poi passare definitivamente a valori di compressione. Nei tubi invece le tensioni continuano a manifestare valori di trazione.

Nel periodo relativo alle successive fasi costruttive della cavità (getto del mezzanino e scavo di ribasso), i valori registrati dagli strumenti evidenziano variazioni dei livelli tensionali, indicando il progredire del processo di carico degli archi. Un analogo comportamento non è invece riscontrabile per i tubi.

Nell'ultima fase di lavorazione in galleria corrispondente allo scavo e al getto dell'arco rovescio si può rilevare per tutti gli archi strumentati un comportamento statico simile e valori tensionali sostanzialmente stabili nel tempo. Sia in calotta che sui piedritti le sollecitazioni nel calcestruzzo presentano valori ammissibili prossimi a quelli di progetto, mentre nell'ac-

ciaio le tensioni risultano ancora inferiori ai valori previsti. Le letture delle tensioni nei tubi tra arco e arco evidenziano invece valori di entità decisamente inferiore rispetto alle previsioni di progetto, segno che i tubi risultano sostanzialmente scarichi. Questo fa pensare ad un effetto arco in direzione longitudinale che trasmette i carichi direttamente agli archi.

Dettagli tecnici e diagrammi riprodotti per gentile concessione della "MM Strutture e Infrastrutture per il territorio" - Progettazione generale e Direzione Lavori del lavoro presentato.

#### BIBLIOGRAFIA:

Colombo A., Lunardi P. Luongo E. (1989) - "Innovative technique for the realization of large diameter tunnels in loose sand". Congresso ITA. Progress and innovation in tunnelling. Toronto, 9-14 September '89.

Lunardi P., Pizzarotti E.M. (1990) - "Soft ground tunnelling in the Milan metro and Milan Railway Link. Case histories". "Soft ground tunnelling course". Institute of Civil Engineering. London, 10-12 July '90.

"Construction today" (1990), Adrian Greeman, London, July '90.

"ENR - Engineering" (1990) - Howard B. Stussman, London, 16 August '90.

Lunardi P. (1991) - "Cellular arch technique for large span station cavern" - Tunnels and tunnelling, November '91

"Construction today" (1992), Adrian Greeman, London, June '92.