TUNNELS AND WATER

Water and its influence on the design, construction, and exploitation of tunnels and underground works

Edited by
J.MANUEL SERRANO
Spanish Tunnelling Association (AETOS)

OFFPRINT



A.A.BALKEMA / ROTTERDAM / BROOKFIELD / 1988

L'emploi de l'arc cellulaire dans la réalisation de la station Venezia du Passante Ferroviario Metropolitano de Milan

A.Colombo
Metropolitana Milanese, Italie
P.Lunardi
Université de Florence, Italie
E.M.Pizzarotti
Rocksoil Srl, Milan, Italie

RESUME: Ce mémoire expose les principales caractéristiques de l'ouvrage, actuellement en cours de réalisation, premier exemple d'utilisation des microtunnels pour la construction d'une galerie de grand diamètre avec la méthode de l'arc cellulaire.

Une partie est consacrée à la description des expériences effectuées pour la mise au point des techniques et des résultats ainsi obtenus.

1 GENERALITES

Le "Passante Ferroviario Metropolitano" de Milan est une ligne de la Société Nationale des Chemins de Fer Italiens, conçue pour relier directement le réseau des chemins de fer au système des transports urbains, et notamment aux trois lignes du Métropolitain Milanais (fig. 1).

Son tracé se déroule principalement en souterrain, avec galeries de ligne et stations réalisées pour la plupart à trou borgne.

PLAN DE LA CITÉ DE MILANO

COLLEGAMENTO FERROVIARIO PASSANTE



La Station Venezia (fig. 2), la plus grande actuellement prévue sur la ligne, est aussi l'ouvrage souterrain de plus grande taille de l'entier réseau des transports de la région milanaise à être réalisé à trou borgne (fig. 3).

RÉSEAU DES TRANSPORTS DE LA CITÉ DE MILANO

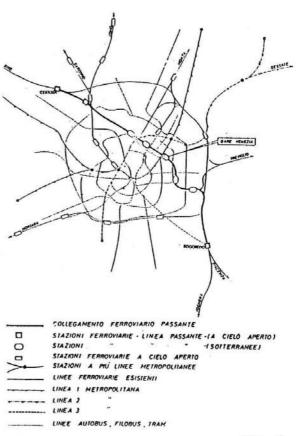


fig. 1

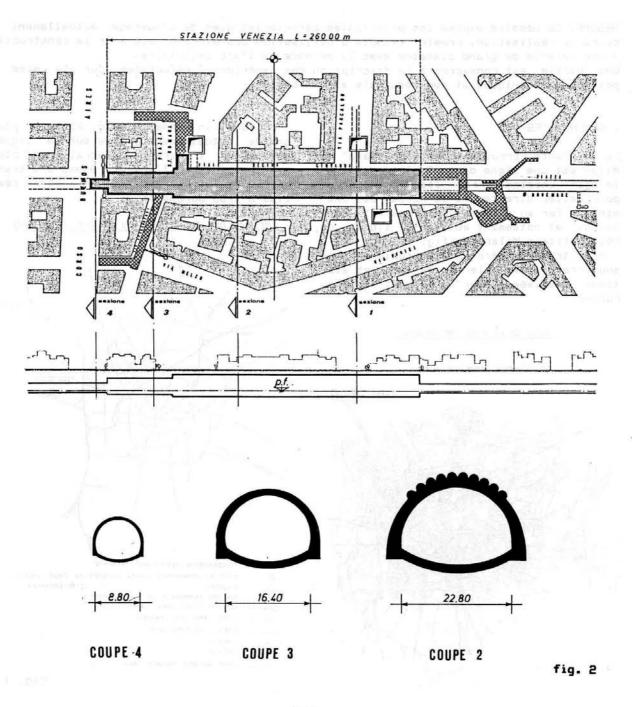
La taille exceptionnelle de la galerie de station (diamètre intérieur 22.80 m; diamètre extérieur 28.80 m), concurremment aux couvertures très limitées (4 ÷ 5 m), à la nature du sol (terrains alluviaux sous nappe) et aux contraintes existantes en surface, ont amené à recourir à nouvelles technologies, et notamment à la mise au point du système de construction dit de l'"arc cellulaire", qui permet la réalisation d'une structure portante, capable de soutenir les parois de l'excavation avant de passer à l'exécution du creusage même.

Ceci est à tout avantage de la sécurité et de la stabilité de l'excavation, ainsi que du contrôle des tassements surfaciques et des déformations du sol, exigences auxquelles on est particulièrement sensible dans un milieu urbain.

2 LA STATION VENEZIA, DE 22.80 m DE DIAMETRE INTERIEUR

La réalisation d'excavations à trou borgne dans des terrains incohérents est précédée, en général, par une consolidation du portour de la galerie.

Cette méthodologie opérationnelle est



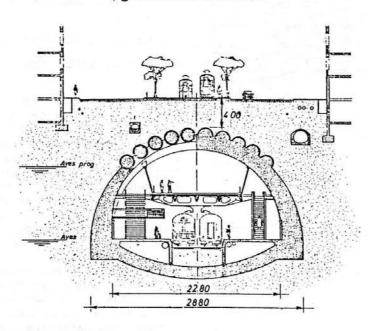
désormais devenue habituelle à Milan pour la construction soit des lignes du métro-politain, soit du "Passante" même et a permis l'exécution de galeries de portée assez remarquable.

Les consolidations, principalement des injections de mélanges cimentaires complé-

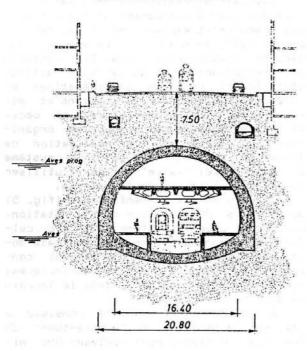
tées parfois par mélanges chimiques, sont habituellement réalisées d'un boyau de pré-avancement en axe avec la future galerie ou, moins souvent, de la surface.

Suivant sa taille, l'excavation de la galerie se fait en trois phases (calotte, abaissement et voûte renversée), ou à tra-

COUPE 2 (galleria da 22.80 m)



COUPE 3
(galleria da 16.40m)



COUPE 4 (galleria da 8.80m)

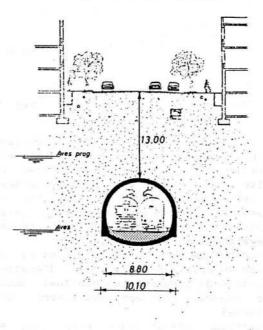
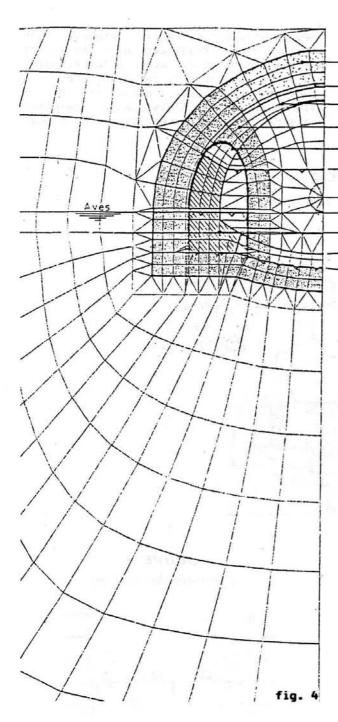


fig. 3



vers le percement des galeries latérales, qui abriteront les piédroits du revêtement définitif, et l'excavation successive de calotte, abaissement et voûte renversée. Ces derniers sont toujours suivis par la réalisation d'un pré-revêtement en béton projeté, armé par cintres, et de la coulée du revêtement en b.a..

Au début de l'histoire du projet de la Station Venezia, on essaya donc d'adapter le système de construction habituel aussi à ce nouveau problème absolûment exceptionnel.

Toutefois, les analyses efféctuées en simulant les phases d'excavation par un Consolidamenti II fase

Rivestimento calotta

Cls

Consolidamenti I fase

Rivestimento Gallerie laterali

Scavo calotta - Galleria di stazione

Cunicolo pilota

Scavo di I fase Gallerie laterali

Piedritti

Scavo di II fase - Gallerie laterali

modèle à éléments finis (fig. 4), mirent bient en évidence que les normales techniques opérationnelles ne permettaient pas d'atteindre ni une suffisante sécurite de la stabilité de la galerie (au moment de l'excavation de la calotte on obtenait des zones de rupture du terrain étendues), ni une adéquate limitation des tassements surfaciques, dont les valeurs calculées atteignaient quelque cm.

Scavo di II fase - Galleria di stazione

Ceci était imputable à deux facteurs principaux:

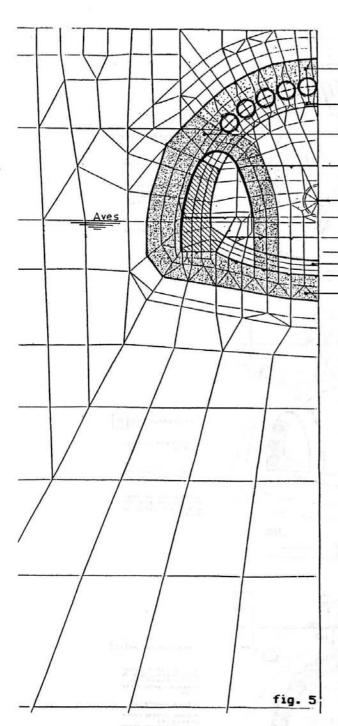
a - à cause des couvertures limitées, ce n'était pas possible obtenir une consolidation du terrain, en correspondance de la calotte de la galerie, avec des garanties d'homogénéité et de résistance suffisantes;

 b - la structure de prérevêtement des parois d'excavation de la calotte se révélait excessivement déformable.

La décision d'abandonner un système exécutif amplement exploité et fiable ne fut pas simple, mais après un éxamen de plusieures possibilités (aussi les systèmes du "pré-découpage" et de la "voûte articulée" furent pris en considération) et après avoir effectué vérifications et dimensionnements supplémentaires, on décida, grâce au concours de tous les organismes impliqués dans la réalisation de l'ouvrage, de mettre au point le système de l'"arc cellulaire" et de l'utiliser pour la construction de la galerie.

Les analyses aux éléments finis (fig. 5) des phases d'excavation de la Station, construite avec le système de l'arc cellulaire, donnaient bien des résultats absolûment satisfaisants, pour ce qui concernait soit les déformations surfaciques, soit l'était de contrainte dans le terrain et dans la structure.

La méthodologie employée consiste à utiliser la technique du "pousse-tube" de façon particulière, pour réaliser des mi-



cro-tunnels (cellules) qui sont ensuite reliés par gros cintres en béton armé (arcs).

La fig. 6 décrit schématiquement les principales étapes de la réalisation de l'ouvrage, qui comprend essentiellement:

- a réalisation des consolidations sur le périmètre des galeries latérales, de l'intérieur du boyau de service central;
- b excavation en deux étapes des galeries latérales; achèvement des consolidations sur l'entier périmètre de la

Consolidamenti zona tubi Il fase

Arco cellullare

Consolidamenti, I fase

Scavo calotta

Cunicolo pilota

Scavo gallerie laterali I fase

Scavo di Il fase

Scavo gallerie laterali II fase

Arco rovescio

Scavo arco rovescio

Consolidamenti II fase

station; coulée des piédroits en b.a.; c - réalisation de 10 microtunnels, formés par tuyaux en b.a. ø 2.1 m (fig. 7), par la méthode du "pousse-tube", de l'intérieur d'un puits de poussée (coupe n. 1, fig. 2);

d - creusage des galeries de connexion entre les microtunnels et entre ces derniers et les galeries latérales. Elles constituent le coffre à l'intérieur duquel on réalise les arcs cellulaires:

 e - armature et coulée des arcs et des microtunnels;

f - creusage en plusieures phases des finitures surfaciques de la voûte;

 g - excavation et coulée de la voûte renversée par tranches successives.

Il faut souligner que la consolidation du terrain dans la zone où les microtunnels sont creusés a le but d'éviter la décompression et l'instabilisation du terrain pendant l'enfoncement des tuyaux et le percement de la galerie de connexion. Ceci se rend nécessaire dans le cas considéré, vue la nature incohérente du sol de Milan et le fait que les microtunnels ont une faible couverture, mais ne constitue pas une "constante" de la méthode.

La fig. 8 illustre certains détails de la Station telle qu'elle se présentera une fois terminée sa construction.

3 L'EXPERIMENTATION DE LA METHODE DE L'"ARC CELLURAIRE"

Afin de vérifier la faisabilité de l'application de la méthode et de mettre au point tous les aspects de construction, on effectua une complèxe expérimentation.

En détail, les essais avaient le but de: a - s'assurer de la nécessité d'un traite-

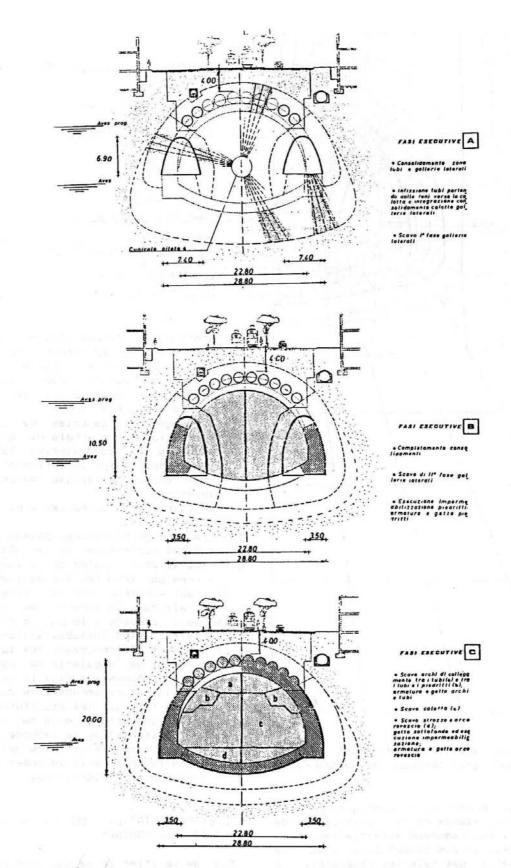
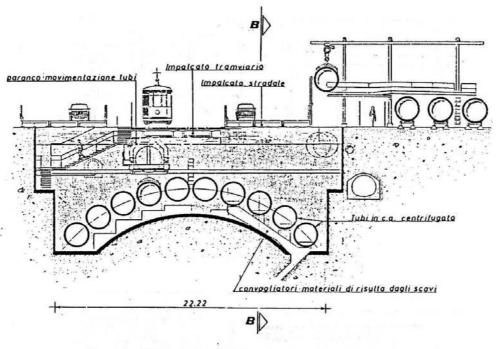


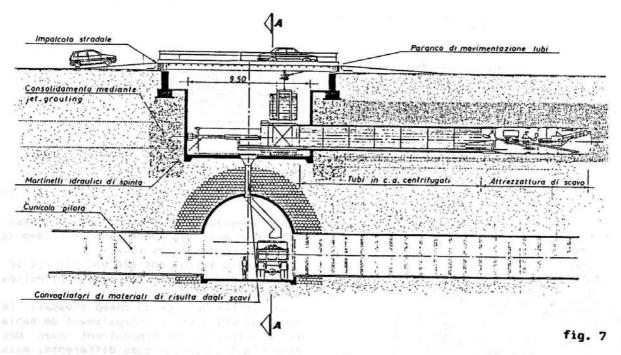
fig. 6.

ment du terrain dans la zone d'enfoncement des tuyaux;

- b vérifier la possibilité de creuser les microtunnels par la méthode du "pousse-tube" à l'intérieur du sol consolidé;
- c simuler les opérations de démolition des tuyaux, de percement des galeries de connexion, d'armature et coulée des arcs cellulaires;
- d définir les caractéristiques des me-



COUPE B.B



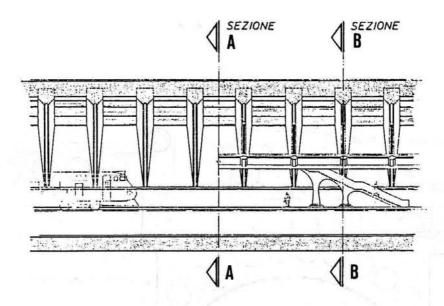
langes de consolidation, ainsi que l'intensité du traitement nécessaire à l'avancement des microtunnels;

- e acquérir informations et approfondir la connaissance au regard des caractéristiques mécaniques du terrain naturel, ainsi que du terrain traité;
- f relever les déformations du sol et les déplacements surfaciques au cours des

differentes phases du travail.

3.1 LE CHAMP D'ESSAI

De l'intérieur d'un puits de poussée (photo 1) obtenu en utilisant entièrement les rampes d'accès de Via Pancaldo, on a enfoncé dans le sol trois séries d'éléments



PROFILO LONGITUDINALE IN ASSE

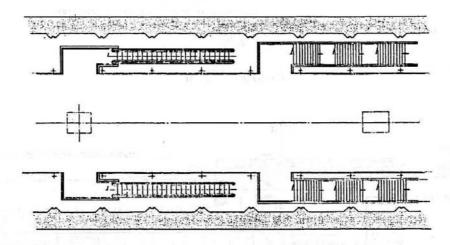
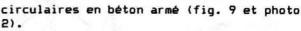


fig. 8

PIANTA

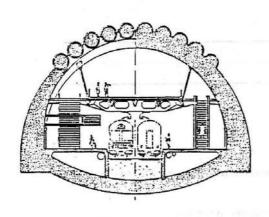


La longueur globale du tronçon d'essai est 32 m env., couverte par 16 éléments pour chacun des trois tuyaux.

Les trois tuyaux ont été enfoncé à l'intérieur d'un sol traité avec intensités differentes (fig. 10).

En correspondance du champ d'essai, le sous-sol est formé principalement de sable et gravier, qui se rencontrent avec des rapports granulométriques différents, mais en proportions presque égales, même si on a rencontré des couches de quelque décimètre de sable seul ou de seul matériau grossier.

De pair avec l'essai d'enfoncement des tuyaux, on a procédé au relèvement des déformations induites dans le terrain aux alentours par le biais d'extensimètres monobase et incrémentaux, ainsi que de



SEZIONE A-A

SEZIONE B-B

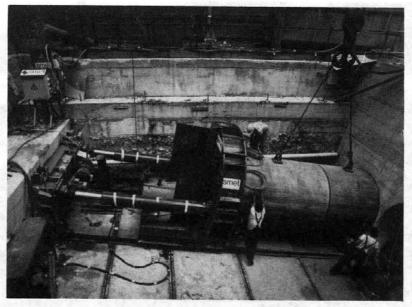
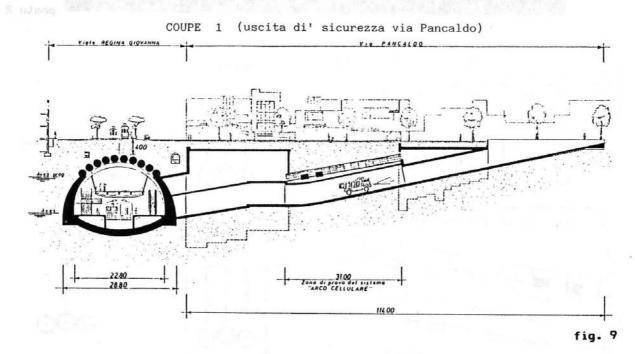


photo 1



levés tupographiques en surface (figg. 10 et 11). Du point de vue de l'expérimentation operationnelle, l'essai s'est achevé par la simulation de la réalisation de deux arcs de liaison entre les tuyaux.

De plus, on a effectué:

- 3 essais à la dalle de charge de l'intérieur des tuyaux, dont deux verticaux sur terrain consolidé et un horizontal sur terrain non consolidé;
- 9 essais dilatométriques soit sur sol vierge, soit sur sol traité;
- relévements de carottage sonique.

3.2 RESULTATS DES ESSAIS

Les expériences ont permis non seulement de dissiper toute réserve quant à la faisabilité de la méthode, mais aussi d'établir la nécessité d'un traitement du sol aux alentours de l'excavation des microtunnels: en fait, dans le cas du terrain traité on a mesuré des tassements atteignant au maximum quelque dixième de millimètre, alors que dans le cas du terrain naturel on obtient des tassements surfaciques qui peuvent s'avérer incompatibles avec les limitations imposées par le Cahier Technique (qui sont extrèmement sévères, dés qu'elles limitent les tasse-

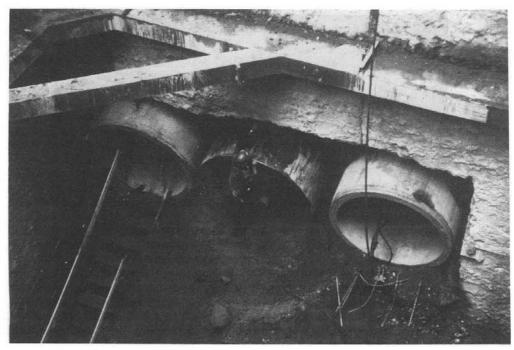
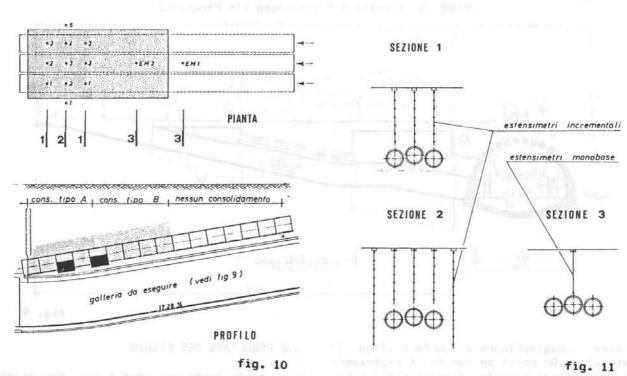


photo 2

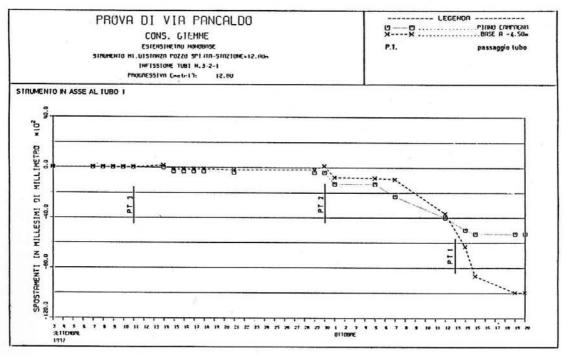


ments à 5 mm) lors du percement successif de plusieurs microtunnels rapprochés (fig. 12).

Aussi les essais "in-situ" ont donné des très bonnes indications quant aux caractéristiques du sol. En fait, on a mesuré des valeurs élastiques pour les sol naturel et pour le sol traité même supérieures à celles employées pour les vérifications aux éléments finis.

4 CONCLUSIONS

La méthode de l'arc cellulaire a permis de résoudre le problème de la réalisation d'une grande cavité en terrain difficile, partiellement sous nappe, et en conditions extrèmes (faibles couvertures par rapport à la taille de la galerie), puisqu'elle permet de compter sur une structure résistante solide avant de passer à la réalisation de l'excavation.



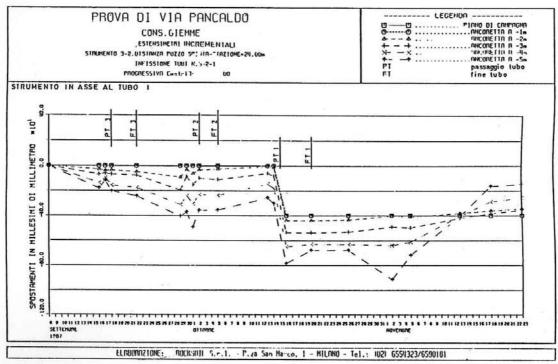


fig. 12

Cette nouvelle idée a pu se concrétiser grâce à la coopération de tous les organismes interessés au projet de le Station Venezia, et notamment à la société commettante Metropolitana Milanese S.p.A. (MM. Amaliani, Camisasca, Cavagna, Pugliese,

Testa), du consortium GIEMME entre les entreprises Grandi Lavori, Mazzi, Romagnoli, Astaldi et Vianini Lavori (MM. D'Alò, Dell'Osbel, Luongo, Silvestri et Tinelli) et des entreprises spécialisées Rodio et Icos.