L'impiego dell'"arco cellulare" nella realizzazione della stazione Venezia del Passante Ferroviario Metropolitano di Milano

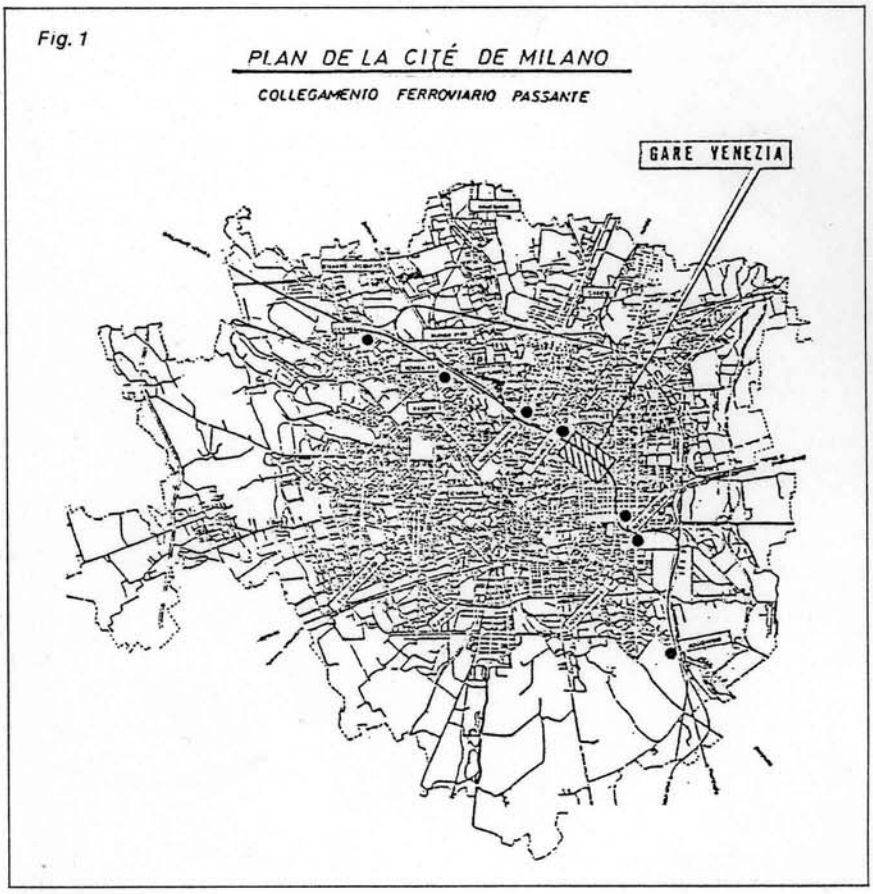
Generalità

Il Passante Ferroviario Metropolitano di Milano è una linea delle Ferrovie dello Stato Italiano concepita per collegare direttamente la rete ferroviaria con il sistema dei trasporti cittadini ed in particolare con le tre linee della Metropolitana Milanese (Fig. 1).
Il suo tracciato si sviluppa prevalentemente in sotterraneo con gallerie di linea e stazioni realizzate per lo più a foro cieco.
La Stazione Venezia (Fig. 2), la più grande attualmente prevista sulla linea, risulta essere altresì l'opera sotterranea da realizzarsi a foro cieco di dimensioni maggiori di tutta la rete dei trasporti dell'area milanese.
Le eccezionali dimensioni della galleria di stazione (Fig. 3) (∅ interno 22,80 m, ∅ esterno 28,80 m), unitamente alle ridottissime coperture (4 - 5 m), alla natura dei terreni (alluvioni incoerenti in falda) ed ai vincoli di superficie esistenti, hanno determinato il ricorso a tecnologie innovative ed in particolare alla messa a punto del sistema costruttivo denominato "arco cellulare", che permette la realizzazione di una struttura portante in grado di contenere le pareti di scavo, ancor prima dell'esecuzione dello scavo stesso.
Ciò a tutto vantaggio della sicurezza e della stabilità dello scavo e del controllo dei cedimenti superficiali e delle deformazioni del terreno, esigenze particolarmente sentite in area urbana.

La Stazione Venezia da 22,80 m di diametro

La realizzazione di scavi a foro cieco in terreni incoerenti avviene solitamente previa esecuzione di un consolidamento del terreno sul contorno della galleria.
Questa metodologia operativa è divenuta ormai usuale a Milano per la costruzione sia delle linee metropolitane che del passante stesso ed ha permesso l'esecuzione di gallerie di luce anche notevole. I consolidamenti, prevalentemente iniezioni di miscele cementizie a volte integrate con miscele chimiche, vengono solitamente realizzate da un cunicolo di preavanzamento coassiale al futuro scavo o, più raramente, della superficie.
A seconda delle dimensioni poi lo scavo della galleria avviene in tre fasi (calotta, ribasso e arco rovescio) o at-

Fig. 1



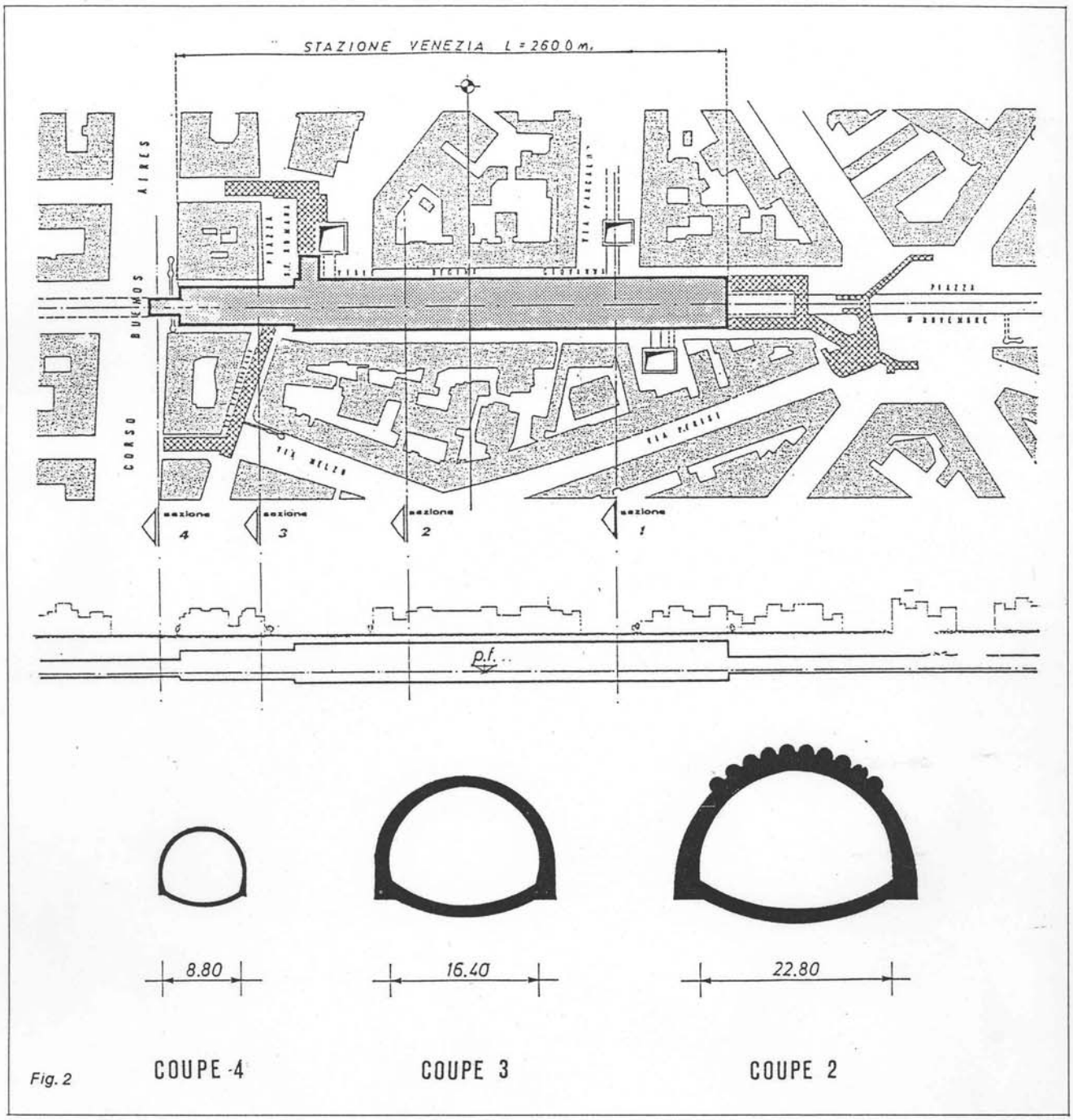


Fig. 2

traverso la realizzazione di gallerie laterali sede dei piedritti del rivestimento definitivo e con i successivi scavi della calotta, ribasso e arco rovescio.
Questi ultimi vengono sempre seguiti dalla realizzazione di un rivestimento di prima fase costituito da spritz-beton armato con centine e dal getto del rivestimento in c.a.
Le analisi svolte simulando le fasi di scavo con un modello agli elementi finiti misero in evidenza che con le normali tecnologie operative non era possibile raggiungere né una sufficiente sicurezza della stabilità della galleria, né un'adeguata limitazione dei cedimenti superficiali i cui valori calcolati raggiungono qualche centimetro.
Ciò è essenzialmente dovuto a due fattori:
a - a causa delle ridotte coperture non è possibile ottenere un consolidamento del terreno nella zona di calotta della galleria con sufficienti garanzie di omogeneità e di resistenza;
b - la struttura di prerivestimento delle pareti di scavo della calotta della galleria risulta eccessivamente deformabile.
Dopo aver vagliato differenti possibilità (furono presi in esame anche i sistemi del "predecoupage" e della "voute articuleé"), si decise di mettere a punto il sistema dell'"arco cellulare" e di applicarlo per la costruzione della galleria. Esso consiste in una particolare utilizzazione del metodo dello spingitubo, per la realizzazione di minitunnels (cellule) che vengono successivamente collegati da grandi centine in calcestruzzo armato (archi).
La Fig. 4 mostra schematicamente le principali fasi realizzative dell'opera che constano essenzialmente di:
• realizzazione, dal cunicolo di servizio centrale, del consolidamento sul perimetro delle gallerie laterali (vedi

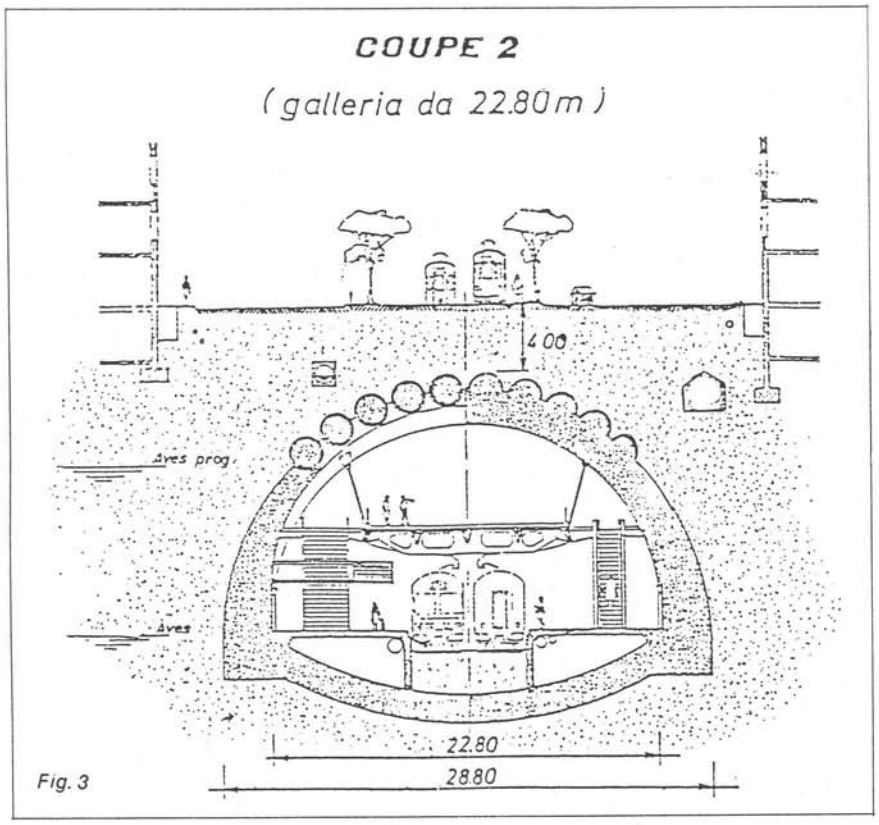


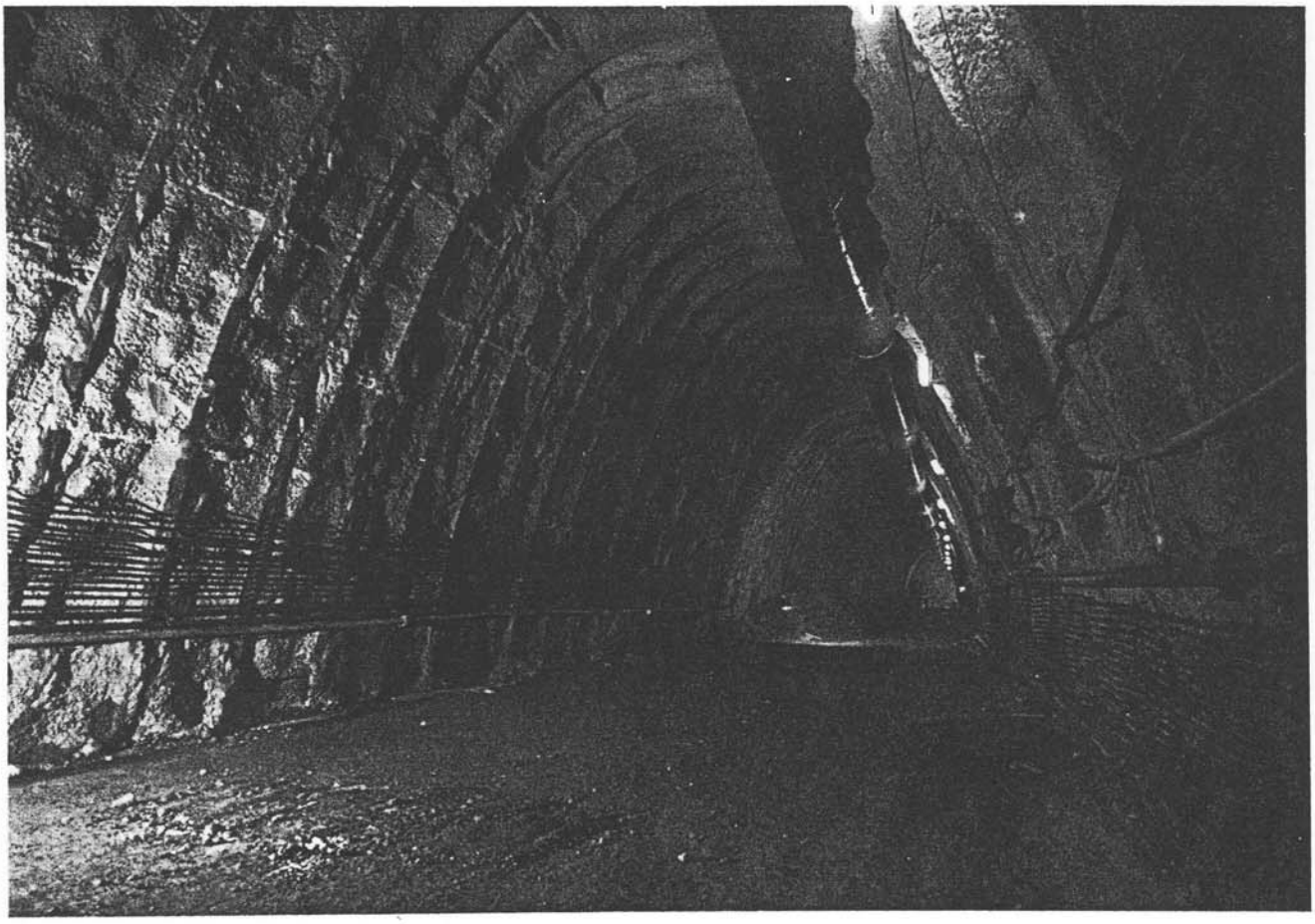
Fig. 3

anche Foto 1);

- scavo in due tempi delle gallerie laterali; completamento del consolidamento su tutto il perimetro della stazione; getto dei piedritti in c.a.;
- realizzazione, col metodo dello spingitubo, da un pozzo di spinta ubicato sulla sezione 1 della Fig. 6, di 10 minitunnels costituiti da tubi in c.a. ∅ 2.1 m (Fig. 2);
- scavo delle gallerie di collegamento tra i minitunnels e tra questi ultimi e le gallerie laterali. Esse costituiscono il cassero all'interno del quale vengono realizzati gli archi cellulari;
- armatura e getto degli archi e dei minitunnels;
- scavo in più fasi della sezione di galleria con contemporanea esecuzione delle finiture superficiali della volta;
- scavo e getto dell'arco rovescio a campioni.

È importante sottolineare che il consolidamento del terreno nella zona in cui vengono scavati i minitunnels ha lo scopo di evitare decompressioni ed instabilità del terreno durante l'infissione dei tubi e lo scavo della galleria di collegamento. Esso è necessario nel caso in oggetto, data la natura incoerente del terreno di Milano e la corticalità dei minitunnels, ma non costituisce una "costante" del sistema.

Foto 1 - Scavo di prima fase della galleria per piedritto.



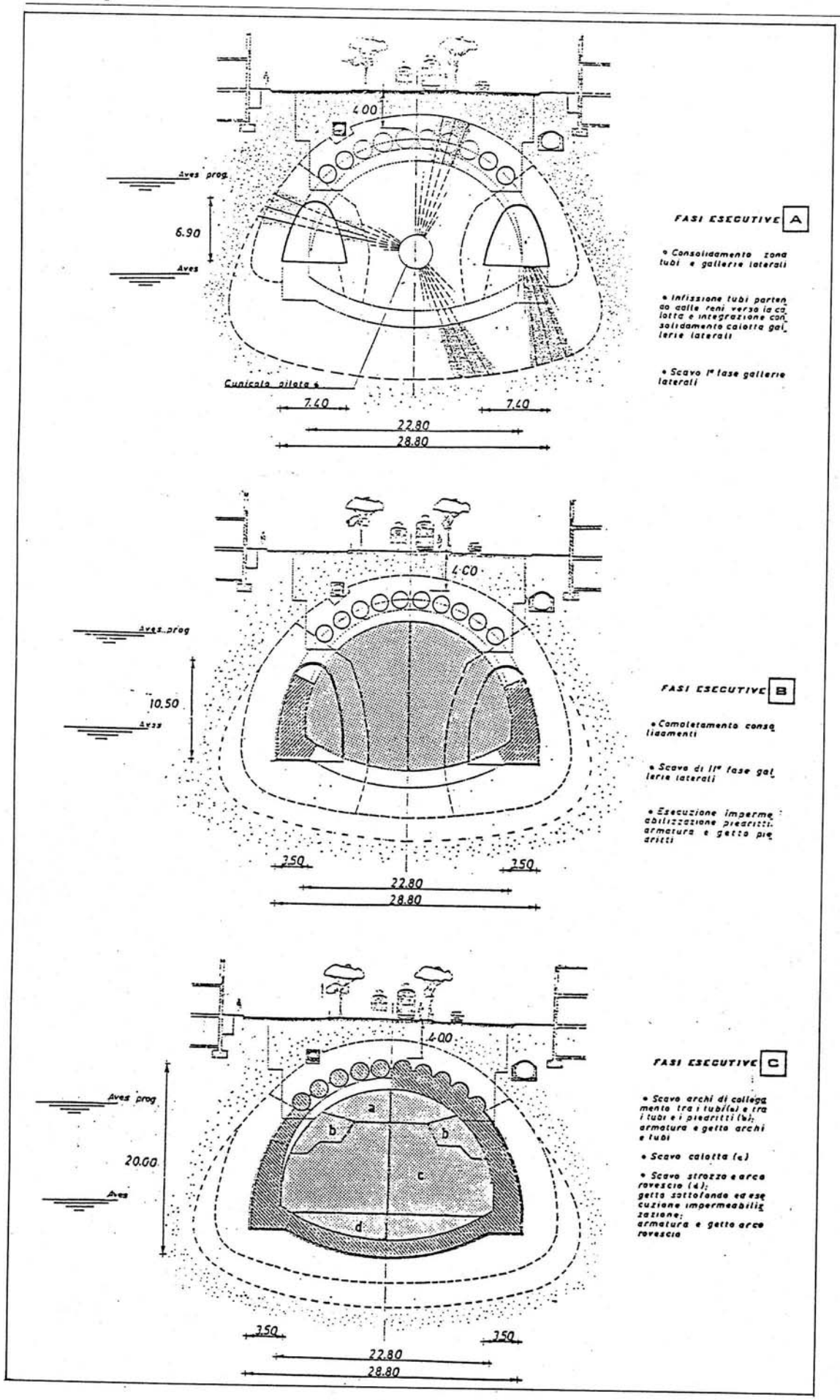

4.00
Aves prog
6.90
Aves
Cunicolo pilota
7.40
7.40
22.80
28.80
FASI ESECUTIVE A
• Consolidamento zona tubi e gallerie laterali
• Infissione tubi partendo dalle reni verso la calotta e integrazione consolidamento calotta gallerie laterali
• Scavo I^a fase gallerie laterali
4.00
Aves prog
10.50
Aves
2.50
2.50
22.80
28.80
FASI ESECUTIVE B
• Completamento consolidamenti
• Scavo di II^a fase gallerie laterali
• Esecuzione impermeabilizzazione piedritti, armatura e getto piedritti
4.00
Aves prog
20.00
Aves
a
b
b
c
d
2.50
2.50
22.80
28.80
FASI ESECUTIVE C
• Scavo archi di collegamento tra i tubi (a) e tra i tubi e i piedritti (b); armatura e getto archi e tubi
• Scavo calotta (c)
• Scavo strozzo e arco rovescio (d); getto sottofondo ed esecuzione impermeabilizzazione; armatura e getto arco rovescio

Fig. 4

Fig. 5

COUPE 1

(uscita di sicurezza via Pancaldo)

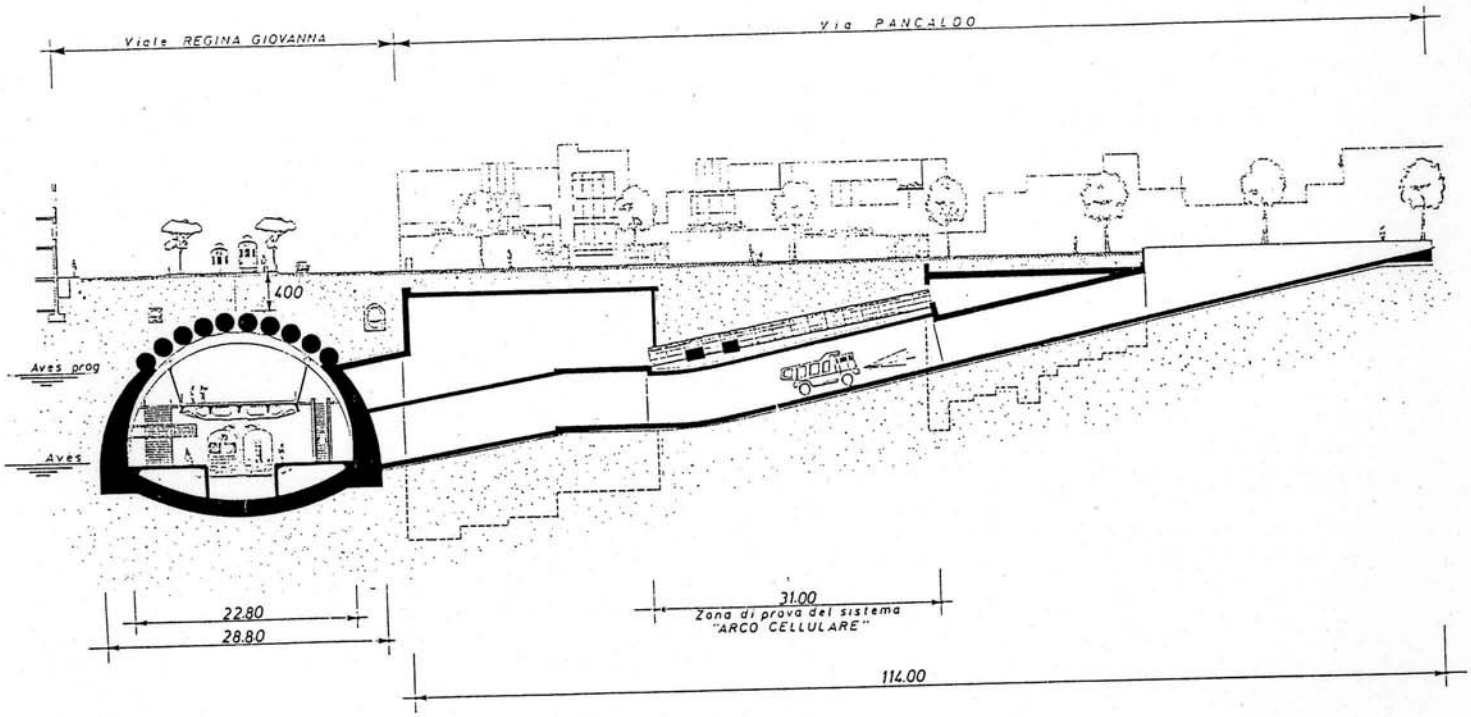
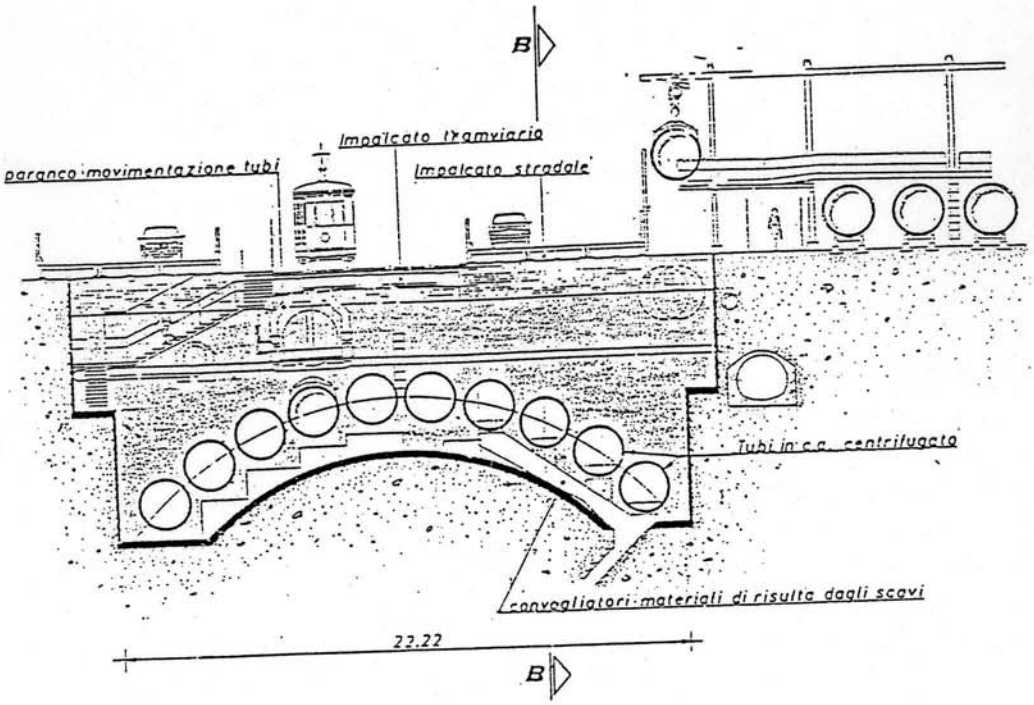


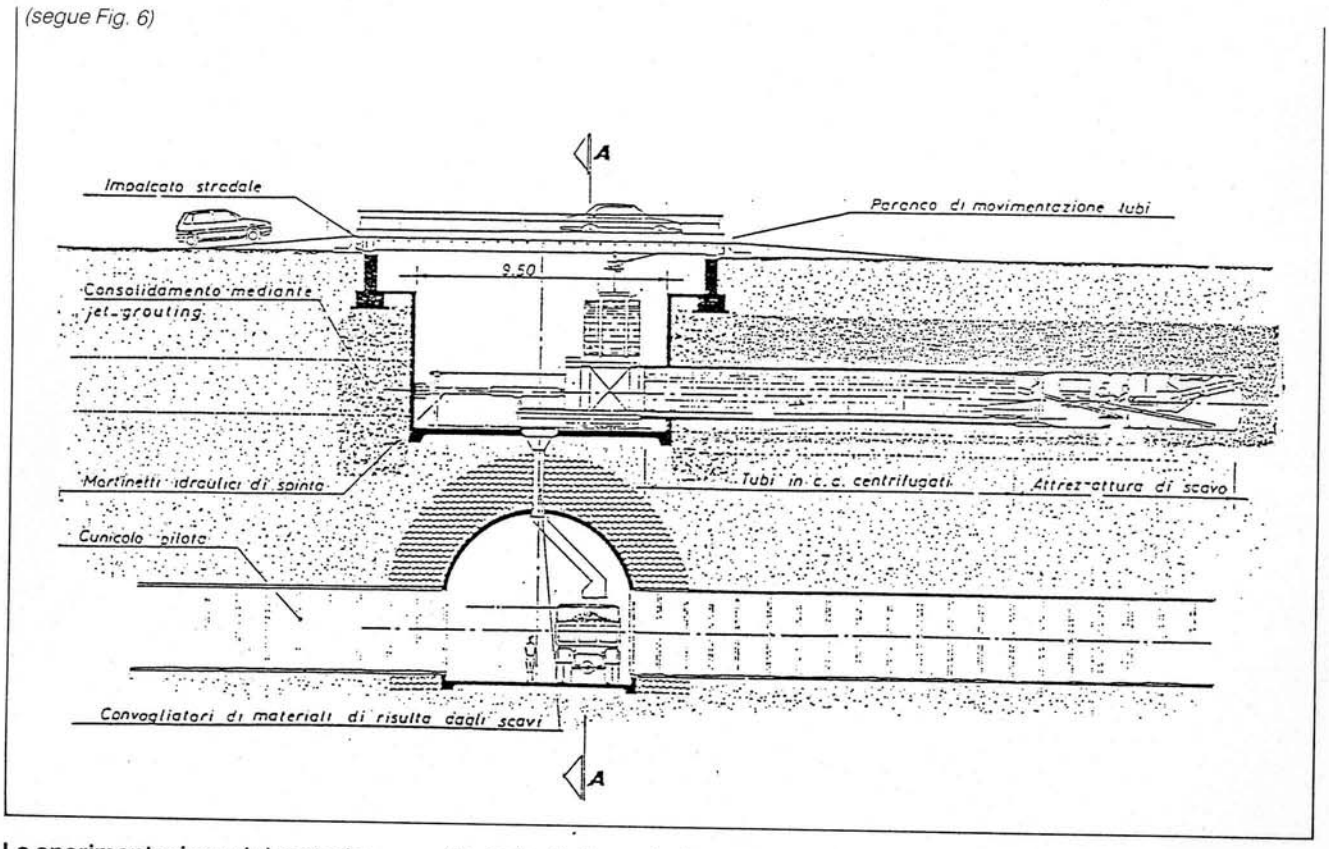
Fig. 6

COUPE A-A



(segue)

(segue Fig. 6)



La sperimentazione del metodo dell'"Arco Cellulare"

Per assicurarsi della fattibilità dell'applicazione del metodo e per mettere a punto tutti gli aspetti costruttivi venne seguita una complessa sperimentazione.

In particolare la sperimentazione era finalizzata a:

- accertare la necessità di un trattamento del terreno nella zona di infissione dei tubi;
- verificare la possibilità di eseguire i minitunnels col metodo dello spingitubo all'interno di terreno consolidato;
- simulare le operazioni di demolizione dei tubi, di scavo delle gallerie di collegamento e di armatura e getto degli archi cellulari;
- definire le caratteristiche delle miscele di consolidamento e l'intensità del trattamento idonea all'avanzamento del minitunnels;
- acquisire informazioni ed approfondire le conoscenze circa le caratteristiche meccaniche sia del terreno naturale che di quello trattato;
- seguire misure delle deformazioni del terreno e degli spostamenti della superficie durante le fasi di lavoro.

Il campo di prova

A partire da un pozzo di spinta ricavato sfruttando interamente le strutture della discenderia di accesso di Via Pancaldo sono stati infissi nel terreno tre serie di elementi circolari in calcestruzzo armato (Fig. 5). La lunghezza complessiva del tratto di prova è di 32 m, coperta con 16 elementi per ciascuno dei tre tubi. I tre tubi sono stati infissi all'interno di un terreno trattato con differenti intensità.

In corrispondenza del campo di prova il sottosuolo è sostanzialmente costituito da sabbia e ghiaia presenti in differenti rapporti granulometrici ma in proporzioni pressoché equivalenti, anche se sono stati rilevati livelli decimetrici di sola sabbia o di solo materiale grossolano. Di pari passo con la prova di infissione dei tubi, si è proceduto al rilevamento delle deformazioni provocate nel terreno circostante a mezzo sia di estensimetri monobase e estensimetri incrementali, sia di rilievi topografici superficiali.

Dal punto di vista della sperimentazione operativa, la prova si è conclusa con la simulazione della realizzazione di due archi di collegamento tra i tubi.

Sono inoltre state eseguite:

- 3 prove di carico su piastra dall'interno dei tubi di cui 2 verticali su terreno consolidato e 1 orizzontale in terreno non consolidato;
- 9 prove dilatometriche sia su terreno vergine che su terreno trattato;
- rilievi di carotaggio sonico.

Risultati della sperimentazione

Oltre a sciogliere ogni riserva circa la fattibilità del sistema, la sperimentazione ha permesso di stabilire la necessità del trattamento del terreno all'intorno dello scavo dei minitunnels: infatti nel caso di terreno trattato sono stati misurati cedimenti massimi dell'ordine di qualche decimo di mm, mentre nel caso di terreno naturale si ottengono cedimenti superficiali che, per la realizzazione successiva di più minitunnels ravvicinati, possono risultare incompatibili con le limitazioni imposte dal Capitolato Tecnico (che sono particolarmente gravose imponendo cedimenti massimi di 5 mm).

Anche le prove in situ hanno fornito ottime indicazioni sulle caratteristiche del terreno. Sono stati infatti misurati valori elastici del terreno naturale e del terreno trattato anche superiori a quelli utilizzati nelle verifiche agli elementi finiti.

Conclusioni

Il sistema dell'arco cellulare ha permesso di risolvere il problema della realizzazione di una grande cavità in terreni difficili potenzialmente immersi in falda ed in condizioni estreme (piccole coperture in rapporto alle dimensioni della galleria) potendo contare su una salda struttura resistente ancor prima della realizzazione dello scavo.

A. Colombo
Metropolitana Milanese
P. Lunardi
Università di Firenze
E.M. Pizzarotti
Rocksoil s.r.l. - Milano
E. Luongo
Consorzio Giemme
(Grandi Lavori-Mazzi-Romagnoli-Astaldi-Vianini Lavori)