

IL PASSANTE FERROVIARIO DI MILANO: INFRASTRUTTURE E TECNOLOGIE¹

Fermata "Venezia": il progetto e la realizzazione della struttura ad "Arco cellulare"

SOMMARIO

Lo scavo di una cavità in terreni incoerenti, al di sopra di certe dimensioni, non è realizzabile con metodi tradizionali, specie se la copertura è ridotta come nel caso delle stazioni della metropolitana.

L'"Arco cellulare" è un nuovo sistema di costruzione che permette di superare le difficoltà costruttive realizzando l'intera struttura portante, il contenimento e il rivestimento della cavità prima dello scavo stesso.

Dopo aver descritto i principi base del sistema, verrà illustrata l'esperienza raggiunta, durante la sua prima applicazione nel sottosuolo di Milano, per la costruzione della stazione Venezia del Passante Ferroviario: una cavità di circa 30 m di diametro esterno e con solo 4 m di copertura di terreno incoerente e sottofalda. A conclusione della memoria, si esporrà qualche considerazione sui possibili sviluppi e sulle prospettive offerte da questo nuovo sistema costruttivo.

RELATORE

Prof. Ing. P. Lunardi - Studio di progettazione Lunardi - Milano

Milano, 22 maggio 1997

Presentato al Convegno:

"Il passante ferroviario di Milano: Infrastrutture e tecnologie" - Milano 22 maggio 1997

1. PREMESSA

Se la realizzazione di scavi a foro cieco di grande dimensione ($\phi > 15\text{m}$) 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 geostrutturali 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 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'innesci 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 ($H > \phi/2$) 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 ($H < \phi/2$) 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 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 18 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 per la Metropolitana Milanese S.p.A., che consente di aprire a foro cieco ed a piena sezione gallerie di dimensioni finora impensabili ($\phi > 20$ m) in terreni incoerenti o semicoerenti a fronte di coperture anche inferiori al raggio di scavo.

2. L'ARCO CELLULARE

L'"Arco Cellulare" (**figg. 2 e 3**) è una struttura composita 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". 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 (**fig. 2**). 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" indispensabile per la stabilità a breve ed a lungo termine dell'opera da scavare.

La realizzazione pratica dell'"Arco Cellulare" avviene in più fasi (vedi figg. 2, 3, 4, 5):

- a) da una galleria di servizio, praticata in asse alla galleria principale, 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.;
- d) realizzazione dei microtunnels di calotta;
- e) scavo, a partire dai microtunnels, di gallerie trasversali di collegamento che fungeranno da casseforme (le cui pareti sono costituite dal terreno stesso), per il getto degli archi in c.a.. Lo smarino del materiale avviene attraverso le gallerie laterali;
- f) getto dei piedritti del rivestimento definitivo della galleria principale all'interno delle omonime gallerie;
- g) armatura e getto degli archi in c.a. e successivo getto dei microtunnels longitudinali di calotta;
- h) scavo del terreno all'interno della sezione della galleria principale sotto la protezione dell'"Arco Cellulare" già praticamente attivo, grazie alla trasmissione mediata dei carichi verticali sovrastanti dai microtunnel agli archi in c.a.;
- 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 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 σ_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.

4. 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 $\cong 29$ m, e se si considerano le coperture estremamente ridotte con presenza di sottoservizi e strutture preesistenti per i primi metri di terreno, $4 \div 5$ 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.

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 prerivestimento costituito da centine e spritz-beton e con getto del rivestimento 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 (**fig.7**), date le ridotte coperture ed il conseguente

scarso confinamento del terreno, e l'eccessiva deformabilità del priverimento. Per superare tutte queste problematiche si è ricorsi al metodo dell'"Arco Cellulare". La sua fattibilità tecnica e messa a punto operativa richiesero approfonditi studi e sperimentazioni sul campo.

La **figura 6** mostra la maglia di elementi finiti del modello numerico utilizzato per lo studio del comportamento tenso-deformativo della struttura e del terreno circostante durante la costruzione e durante l'esercizio dell'opera. I risultati ottenuti 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, d'infissione di tre tubi, in un terreno consolidato con diversa intensità, e del loro collegamento a mezzo di segmenti d'arco, previa demolizione parziale dei tubi stessi (**foto 1**). 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.

Questa complessa sperimentazione permise di:

- a) acquisire informazioni ed approfondire le conoscenze circa le caratteristiche meccaniche del terreno naturale e trattato;
- b) verificare la possibilità di eseguire i microtunnels col metodo dello spingitubo all'interno di terreno consolidato;
- c) stabilire le caratteristiche delle miscele di consolidamento e l'intensità del trattamento più idonee anche in relazione all'avanzamento dei microtunnels;
- d) mettere a punto dal punto di vista operativo le operazioni di demolizione dei tubi e di scavo, armatura e getto degli archi;
- e) verificare che le deformazioni del terreno ed i cedimenti in superficie durante le varie fasi di lavoro fossero nei limiti accettabili e congruenti a quelli previsti.

I massimi cedimenti superficiali misurati risultarono inferiori al millimetro. Acquisita così la certezza che il disturbo provocato al terreno dalle operazioni costruttive era praticamente inesistente, forti dell'esperienza maturata con la sperimentazione, si è potuto finalmente dare inizio ai lavori per l'esecuzione vera e propria della Stazione "Venezia".

A questo scopo si è scavato ed attrezzato il pozzo di spinta per l'infissione dei tubi, ubicato in viale Regina Giovanna, previo montaggio di tre ponti prefabbricati in acciaio per garantire la continuità del traffico stradale e tranviario (**fig. 8**). Si è poi realizzato un cunicolo di servizio, lungo l'asse della futura stazione, da dove si sono lanciati leggeri preconsolidamenti del terreno per una fascia comprendente la zona dei tubi e degli archi.

Si è proceduto quindi allo scavo delle gallerie laterali ed al getto dei piedritti della Stazione (**foto 2-3**).

Contemporaneamente avveniva l'infissione dei tubi di cemento armato, che misurano 210 cm di diametro esterno e 180 cm di diametro interno, ormai completata con produzioni medie giornaliere di circa 8 ml (**foto 4-5**).

Successivamente si è passati alla realizzazione degli archi con il taglio parziale dei tubi (**foto 6- 7- 8**), allo scavo del terreno sottostante l'Arco cellulare già praticamente attivo e, infine, al getto dell'arco rovescio.

Attualmente i lavori sono ormai conclusi (**foto 9**), si sta operando la messa a punto degli impianti per l'esercizio della futura stazione.

5. POSSIBILI SVILUPPI DEL SISTEMA

Si sono effettuati in un secondo tempo studi per definire i limiti di applicabilità del metodo dell'"Arco Cellulare" per la costruzione di gallerie di grande luce in terreni incoerenti con bassa copertura e in presenza di falda.

Una volta schematizzato il problema e determinati i parametri variabili, si è passati al dimensionamento di massima dei principali elementi costruttivi adottando un modello agli elementi finiti monodimensionali, in grado di simulare il comportamento della struttura e l'interazione tra essa e il terreno.

In questo ambito si è assunta una legge costitutiva lineare per gli elementi strutturali, mentre il terreno è stato schematizzato secondo un modello alla Boussinesque tenendo conto della presenza di una fascia di materiale consolidato intorno alla cavità.

Si sono prese in considerazione tre distinte geometrie caratterizzate da un rapporto L/H pari a 2.09, 1.73 e 1.5, con luce L variabile fino a 60 m.

I risultati del calcolo hanno portato alla redazione di abachi e tabelle (**fig. 9**) in grado di fornire gli spessori minimi degli elementi strutturali al variare della geometria, in funzione del diametro esterno, della quota di falda e della copertura.

Si nota come l'incremento del diametro esterno nella geometria 1, porti ben presto a sollecitazioni tali da richiedere notevoli dimensioni agli elementi strutturali. Nella geometria 2 e in modo particolare nella geometria 3, nell'ipotesi di carico simmetrico, si ha una curva delle pressioni che si discosta sempre meno dall'asse geometrico della struttura. Ciò comporta uno stato tensionale prevalentemente di tipo assiale che permette una maggiore snellezza e minori deformazioni della struttura.

L'arco di calotta rappresenta comunque, l'elemento strutturale maggiormente sollecitato in relazione alle proprie caratteristiche geometriche.

In particolare, per la zona di attacco arco-piedritto, i diagrammi mostrano la necessità di adottare sezioni di considerevole altezza a causa della brusca riduzione dell'area resistente.

Nonostante ciò, il passaggio a geometrie con rapporti L/H inferiori, permette la realizzazione di archi di calotta di dimensioni decisamente contenute in relazione alle crescenti dimensioni esterne e all'aumentare della copertura. Si nota infatti che in gallerie con diametro esterno di

m e copertura di 15 m si verifica una riduzione dell'ordine del 50% dello spessore minimo necessario in calotta nel passaggio dalla geometria 1 alla geometria 3 (vedi **fig. 9**). Strutture così concepite però, possono non essere in grado di sopportare accentuate dissimmetrie di carico.

Cambiamenti del livello della falda non portano che lievi variazioni alle sollecitazioni della struttura tanto da ritenerli pressochè influenti, ai fini statici, per le geometrie 1 e 2. La tipologia 3, pur comportandosi ottimamente in termini statici e deformativi, appare più sensibile alle variazioni di quota della falda.

Una valutazione attendibile dei cedimenti indotti in superficie in seguito alla realizzazione delle gallerie, può essere fatta solo prendendo in considerazione un grande numero di parametri, non ultimi la caratterizzazione geotecnica del terreno naturale e della fascia di terreno consolidato, la copertura e le modalità esecutive dei lavori.

I cedimenti generati dalle deformazioni elastiche delle strutture forniscono valori contenuti entro i 2 cm, anche per grandi valori di diametro esterno, e per coperture di 15 metri. (**fig.10**)

Si può osservare dal diagramma in **fig. 9** come gli spostamenti in chiave, a parità di diametro esterno, diminuiscano passando dalla geometria 1 fino alla 3.

Dai risultati di questo studio, il metodo dell'"Arco Cellulare" appare suscettibile di poter essere applicato con successo per la realizzazione a foro cieco di caverne corticali di grande luce, anche superiore a 60 m, in terreni sciolti e sotto falda.

6. 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 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, con i suoi quasi 29 m di luce e soli 4 m di copertura, è una conferma della validità del metodo, che nel 1991 ha ricevuto un riconoscimento internazionale dalla rivista specializzata Engineering New-Record della McGraw-Hill (vd articolo allegato).

Gli studi sin qui compiuti indicano 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.

Didascalie delle figure:

Fig. 1. Evoluzione dei sistemi costruttivi per grandi cavità metropolitane: scavo a cielo aperto, "Sistema Anversa", "arco cellulare".

Fig. 2. 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.

Fig. 3. Particolari costruttivi delle "celle" e degli "archi".

Fig. 4. Schema dei preconsolidamenti da cunicolo di servizio.

Fig. 5. Spessori di consolidamento necessari per lo scavo con sistemi tradizionali

Fig. 6. Esempi di output grafico dei calcoli eseguiti con un programma per elaboratore agli elementi finiti non lineari: particolare della maglia utilizzata, tensioni principali ed elementi plasticizzati dopo il getto dell'arco rovescio.

Fig. 7. Sezioni trasversale e longitudinale del pozzo da dove avviene l'infissione dei tubi.

Fig. 8. Abaco riassuntivo del risultato dello studio.

Fig. 9. Cedimenti massimi rilevati al termine della costruzione.

Didascalie delle fotografie:

Foto 1. Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: campo prove, risultato dopo l'infissione dei tubi in scala reale.

Foto 2. Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: preparazione della platea per il getto del piedritto.

Foto 3. Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: getto del piedritto del rivestimento della galleria principale.

Foto 4. Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: infissione dal pozzo di spinta.

Foto 5. Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: vista del pozzo di spinta dopo l'infissione dei tubi.

Foto 6. Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: armatura degli archi.

Foto 7. Stazione "Venezia" del Passante Ferroviario di Milano: vista di un arco dopo il disarmo.

Foto 8. Stazione Venezia del Passante Ferroviario di Milano: vista generale dello scavo della cavità.

Foto 9. Stazione Venezia del Passante Ferroviario di Milano: vista della stazione finita dal mezzanino.

Bibliografia

P. LUNARDI

L'emploi de microtunnels pour la réalisation d'ouvrage souterrains de grande portée: l'"Arc Cellulaire".
Atti del Congresso Internazionale su "Le gallerie e l'Acqua" - Madrid, 12-15 Giugno 1988

A. COLOMBO, P. LUNARDI, E.M. PIZZAROTTI

L'emploi de l'"Arc Cellulaire" dans la réalisation de la Station "Venezia" du "Passante Ferroviario Metropolitano" de Milan.

Atti del Congresso Internazionale su "Le gallerie e l'Acqua" - Madrid, 12-15 Giugno 1988

P. LUNARDI

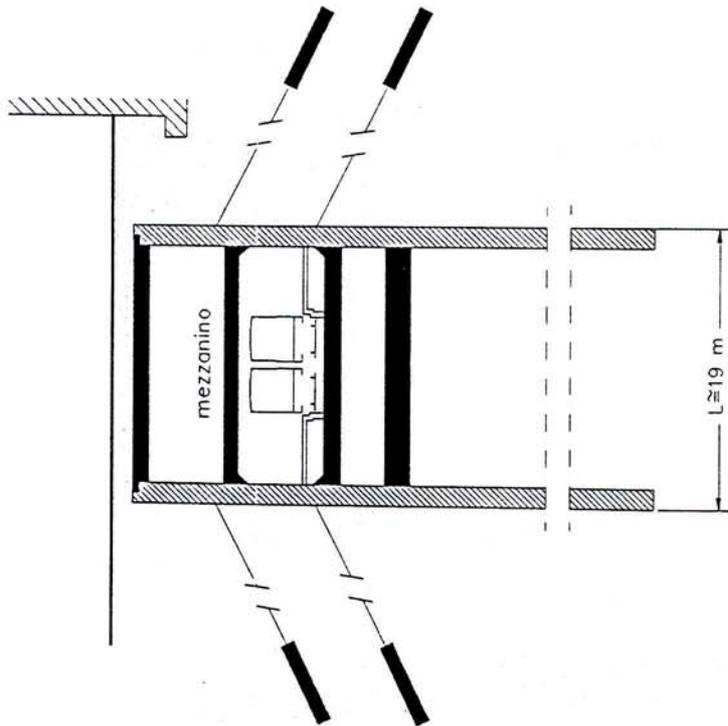
Progresso tecnologico nell'utilizzo degli spazi sotterranei.

Atti del Convegno Nazionale su "Lasciamo all'uomo la luce del sole, sprofondiamo i servizi" - Milano, 8-9 Novembre 1988

- A. COLOMBO, P. LUNARDI, E.M. PIZZAROTTI, E. LUONGO
L'impiego dell'"Arco Cellulare" nella realizzazione della stazione Venezia del Passante Ferroviario Metropolitan
di Milano
Costruzioni, dicembre 1988
- A. COLOMBO, P. LUNARDI, E. LUONGO, E.M. PIZZAROTTI
L'"Arc Cellulaire" pour la Station "Venezia" du "Passante Ferroviario Metropolitan" de Milan
Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble - Parigi 7-10 Febbraio 1989
- P. LUNARDI
Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'"Arco Cellulare".
Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 29 anno 1989
- A. COLOMBO, P. LUNARDI, E. LUONGO
Innovative techniques for the realization of large diameter tunnels in loose land
Congresso Internazionale su "Progress and Innovation in Tunnelling" - Toronto 9-14 Settembre 1989
- P. LUNARDI
Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'"Arco Cellulare" -
Quarry and Construction, n. 2 anno 1990
- P. LUNARDI
Un nouveau systeme constructif pour la realisation de tunnel de grande portee dans terrains non coherents: l'"Arc
Cellulaire"
Colloque International "Les fondations des grands ouvrages" - UNESCO - Parigi 27-29 Marzo 1990
- P. LUNARDI, E.M. PIZZAROTTI
Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories.
Soft Ground Tunnelling Course - Institution of Civil Engineers - Londra 10-12 Luglio 1990
- P. LUNARDI
The Cellular Arch Method: technical solution for the construction of the Milan Railway's Venezia Station
Tunnelling and Underground Space Technology, Settembre 1990
- P. LUNARDI, E. LUONGO, M. MICHELUZZI, E.M. PIZZAROTTI, A. TESTA
Un metodo costruttivo conservativo e di precontenimento del cavo per grandi cavità in terreni difficili.
Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano
18-20 Marzo 1991
- P. LUNARDI
Cellular Arch technique for large span station cavern
Tunnels & Tunnelling, novembre 1991
- P. LUNARDI, A. FOCARACCI
Tunnelling in soil: design, construction materials and monitoring.
Seminario Russo-Italiano - Central Institute for Advanced Training of Construction Engineers (TSMIPKS),
Mosca, 11 Marzo 1993
- P. LUNARDI, A. COLOMBO, E.M. PIZZAROTTI
Performance observations during construction of the large span Milan metro (Venezia) station
International Congress "Option for tunnelling" - Amsterdam, 19-22 Aprile 1993
- P. LUNARDI
Evolution des techniques de creusement en terrain meuble
Colloque chez le "Comité Marocain des Grands Barrages" - Rabat, 30 settembre 1993
- A. COLOMBO, P. LUNARDI, E.M. PIZZAROTTI
The Venezia Station of Milan Railway Link carried out by the Cellular Arch Method: water proofing, fire proofing
and safety, ventilation
International Conference "Underground openings for public use" - Oslo, 14-17 Giugno 1994
- P. LUNARDI
Construction Technologies for Wide Span Tunnels. A comparison of Methods
45th Geomechanics Colloquium - Salisburgo, 10-11 ottobre 1996
- P. LUNARDI
Usages du sous-sol urban en Italie: confrontation de deux cas significatifs:
Ligne ferroviaria sotterranea de Milan: Stazione Venezia (tecnica de l'arc cellulare) - Métro de Rome:
Stazione Baldo degli Ubaldi (tecnica du prédécoupage mecanique).
Atti delle Journées d'Étude "La ville sotterranea 2" - Paris, 19-20 marzo 1997

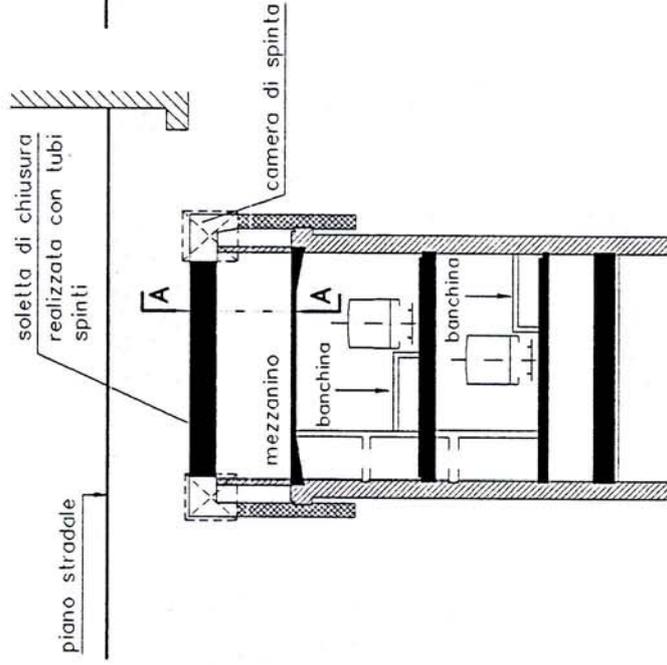
SCAVO A CIELO APERTO

SISTEMA "MILANESE"

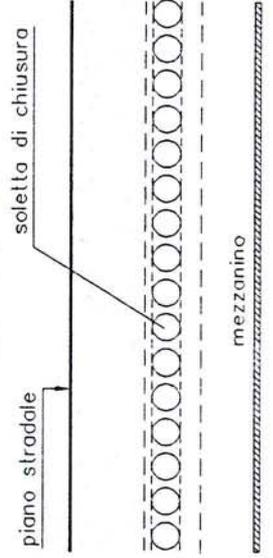


SCAVO A FORO CIECO

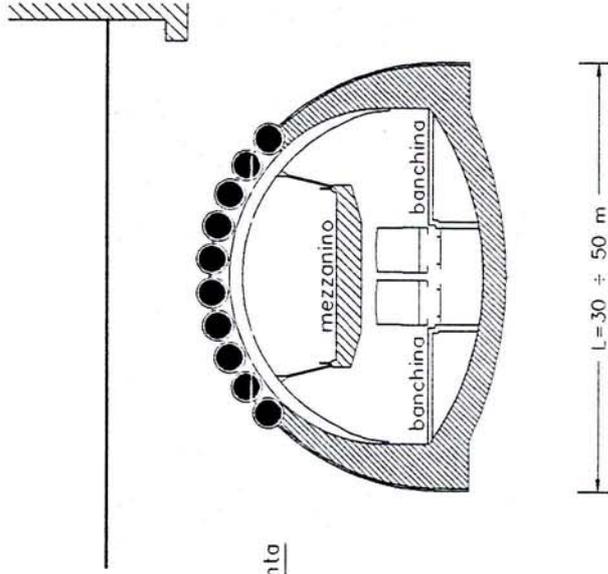
SISTEMA "ANVERSA"



SEZIONE A-A



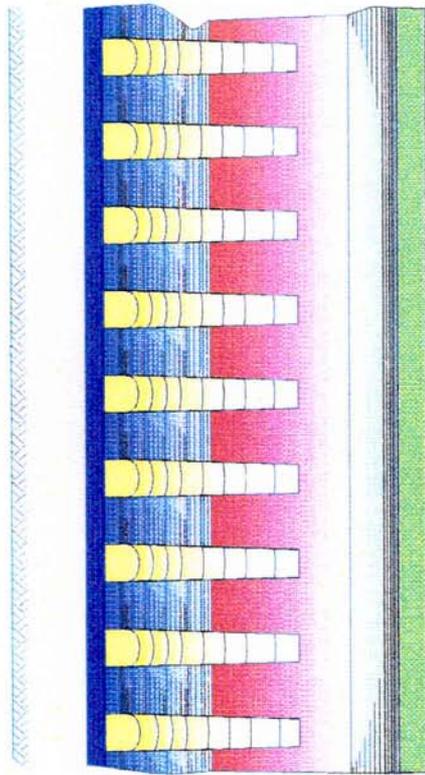
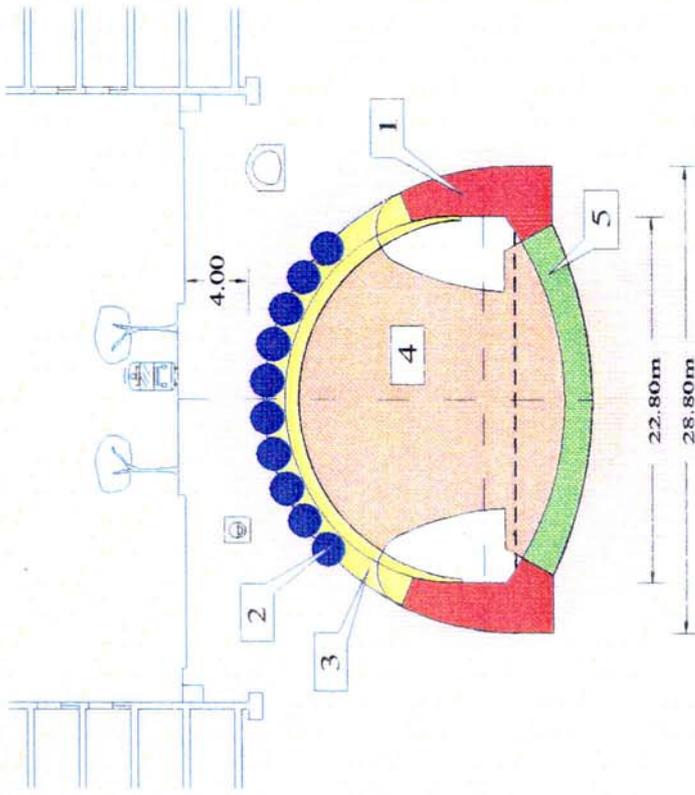
"ARCO CELLULARE"



PROGETTO E COSTRUZIONE DI GALLERIE
METODO ADECO-RS

FASE OPERATIVA

PASSANTE FERROVIARIO DI MILANO
ARCO CELLULARE

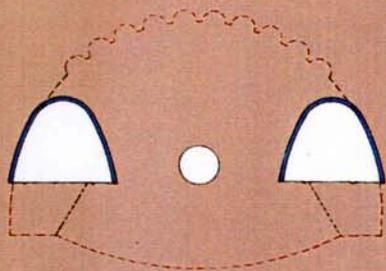


FASI ESECUTIVE

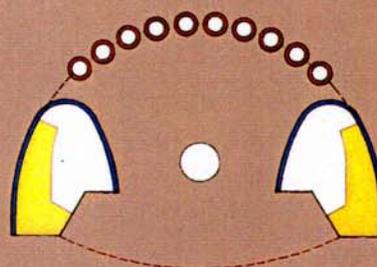
1	GETTO PIEDRITTI
2	INFILSSIONE TUBI PREFABBRICATI
3	GETTO ARCO CELLULARE DI CALOTTA
4	SCAVO
5	GETTO ARCO ROVESCIO

FIG. 2

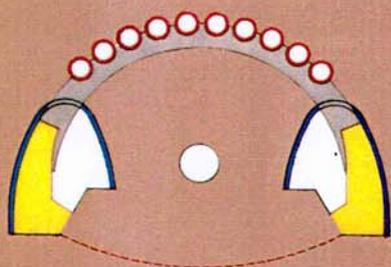
ARCO CELLULARE (fasi esecutive)



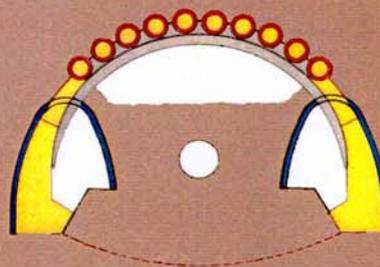
SCAVO CUNICOLI LATERALI



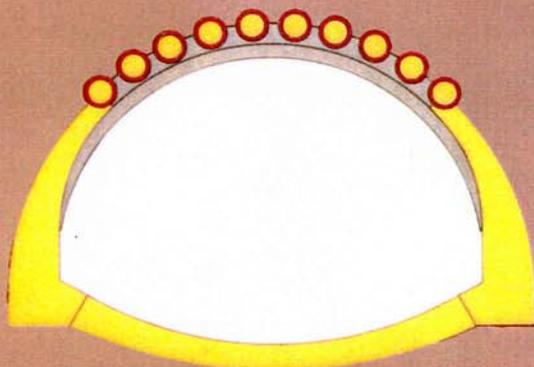
INFISSIONE TUBI E GETTO PIEDRITTI



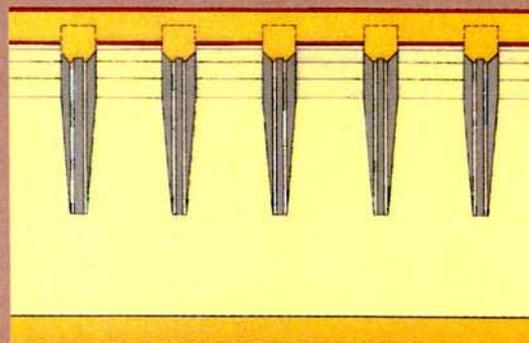
GETTO ARCO CELLULARE DI CALOTTA



GETTO TUBI E SCAVO



GETTO ARCO ROVESCIO



PROFILO

FIG 3

ARCO CELLULARE - FASI ESECUTIVE

1 INFISSIONE TUBI

2 TAGLIO TUBI E SCAVO ARCO CELLULARE

3 CASSERATURA, ARMATURA E GETTO ARCO

4 GETTO TUBI E SCAVO DELLA GALLERIA

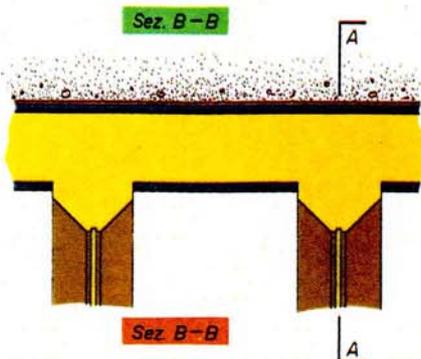
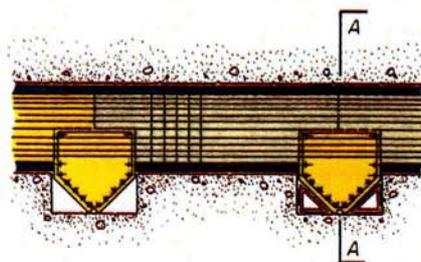
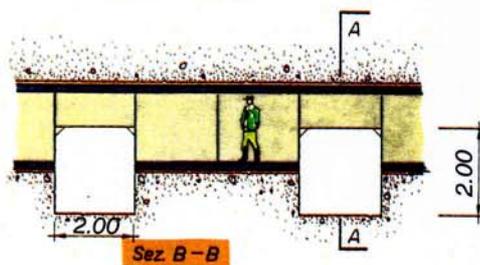
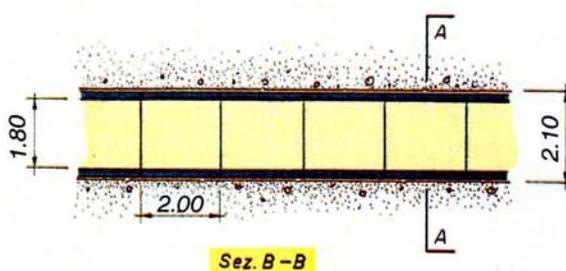
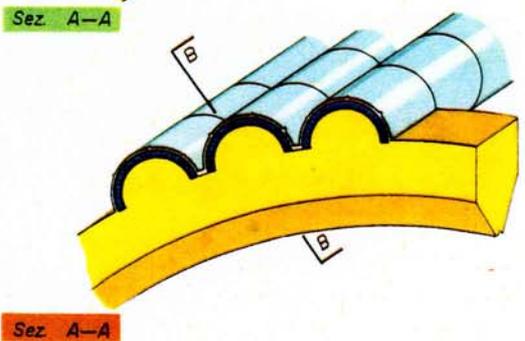
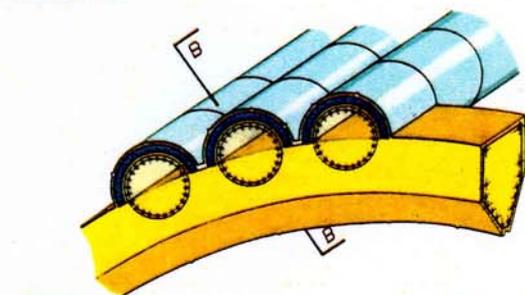
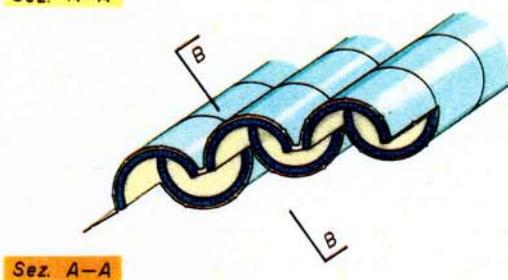
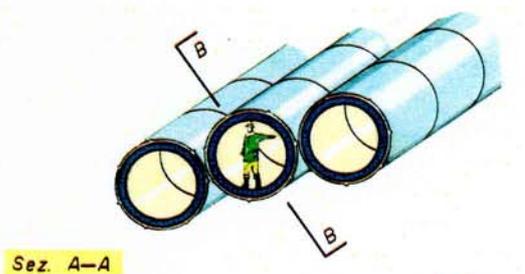


FIG. 4

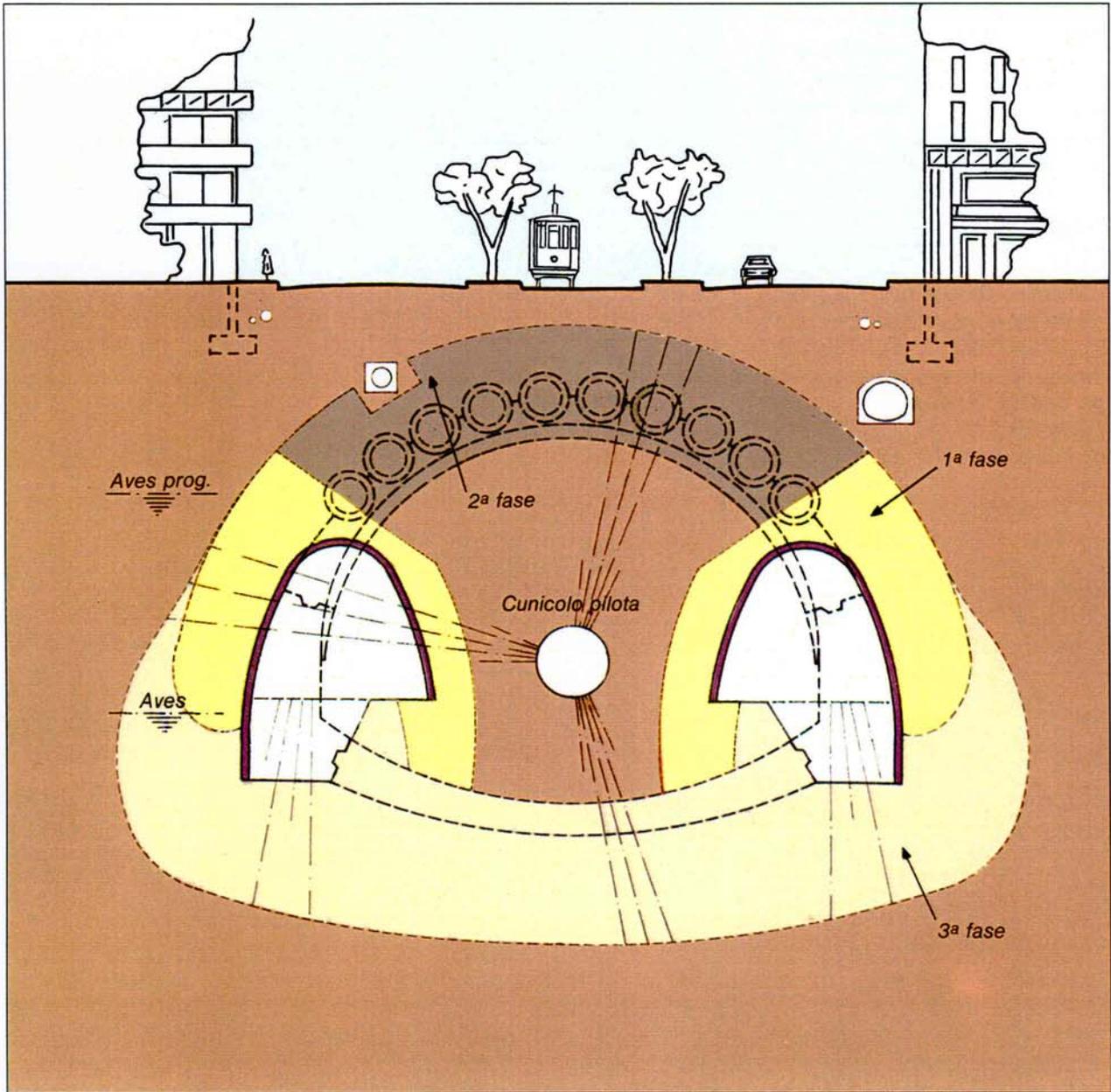


FIG. 5

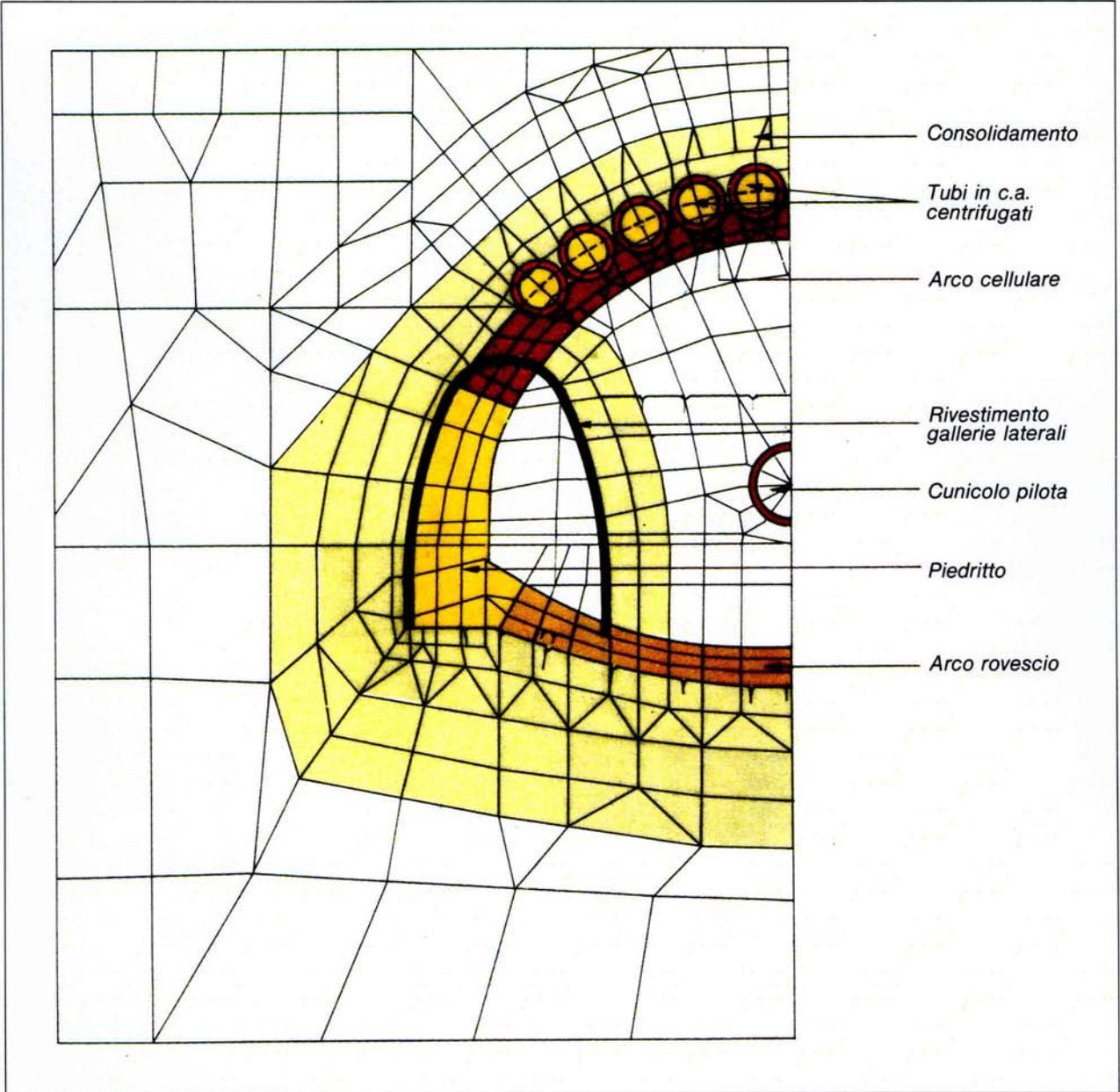


FIG. G

GALLERIA
DI LINEA

STAZIONE
"VENEZIA"

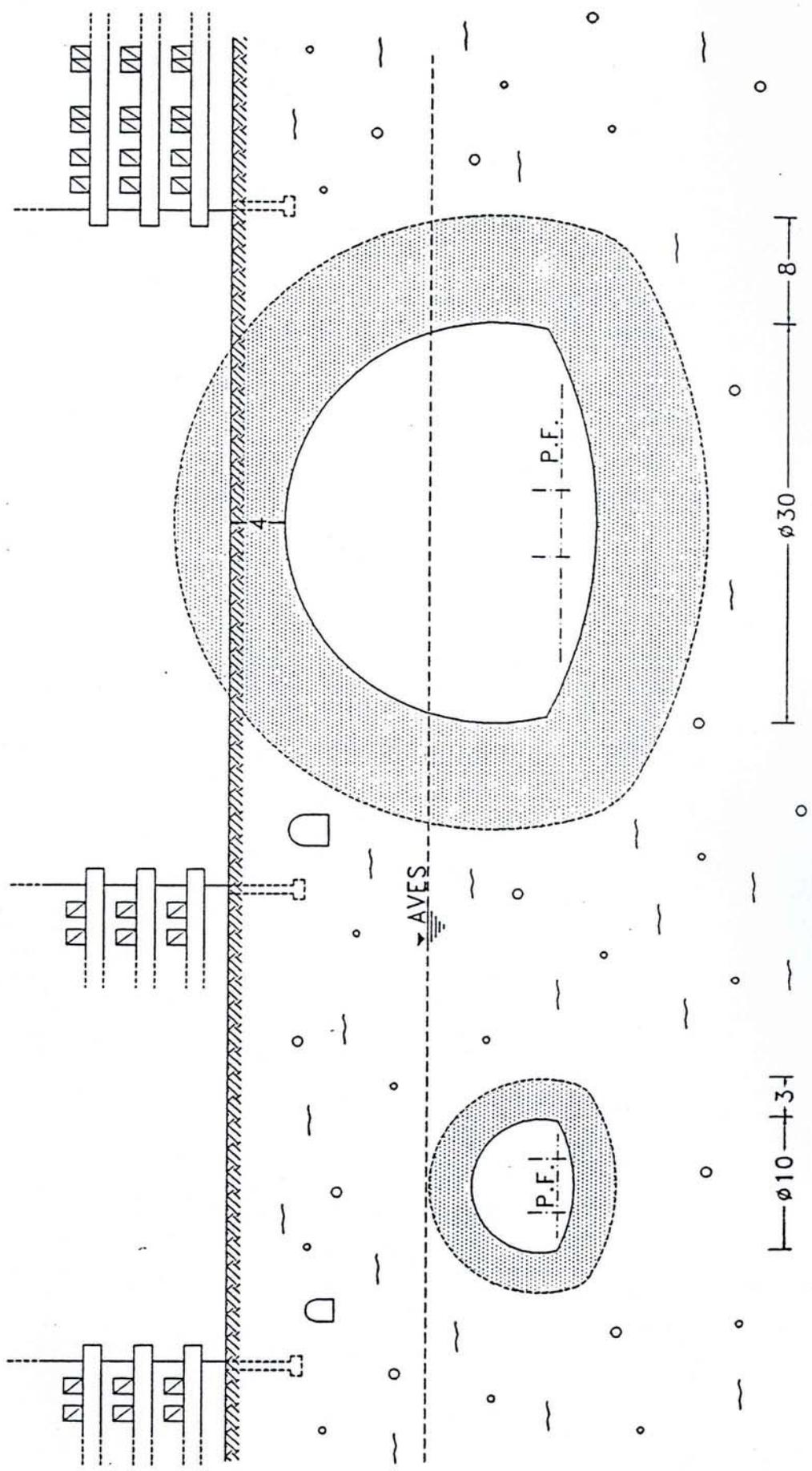


FIG. 7

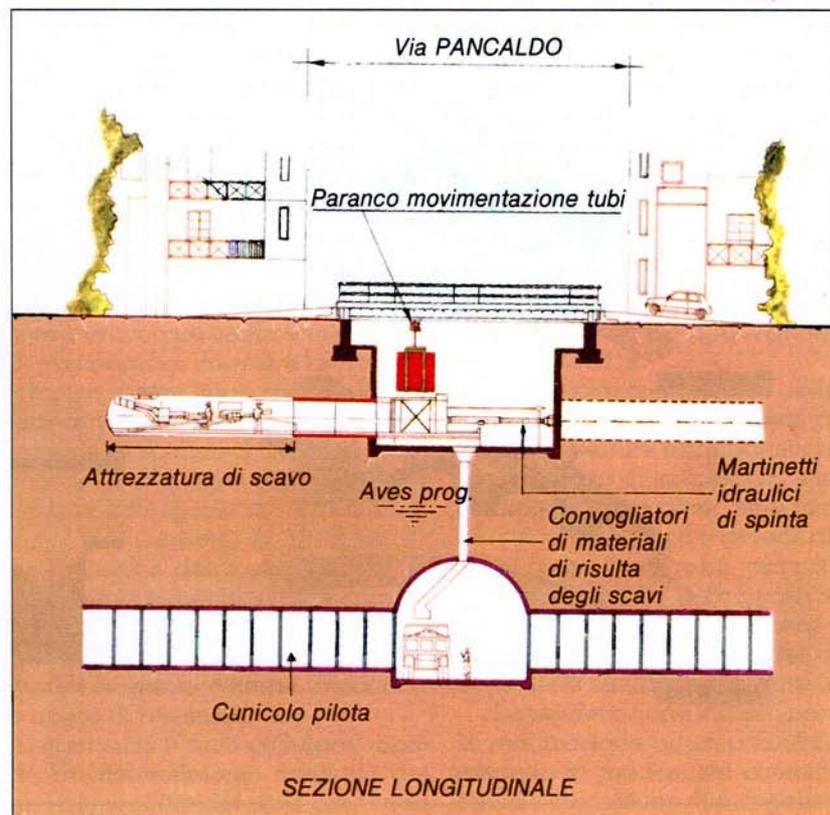
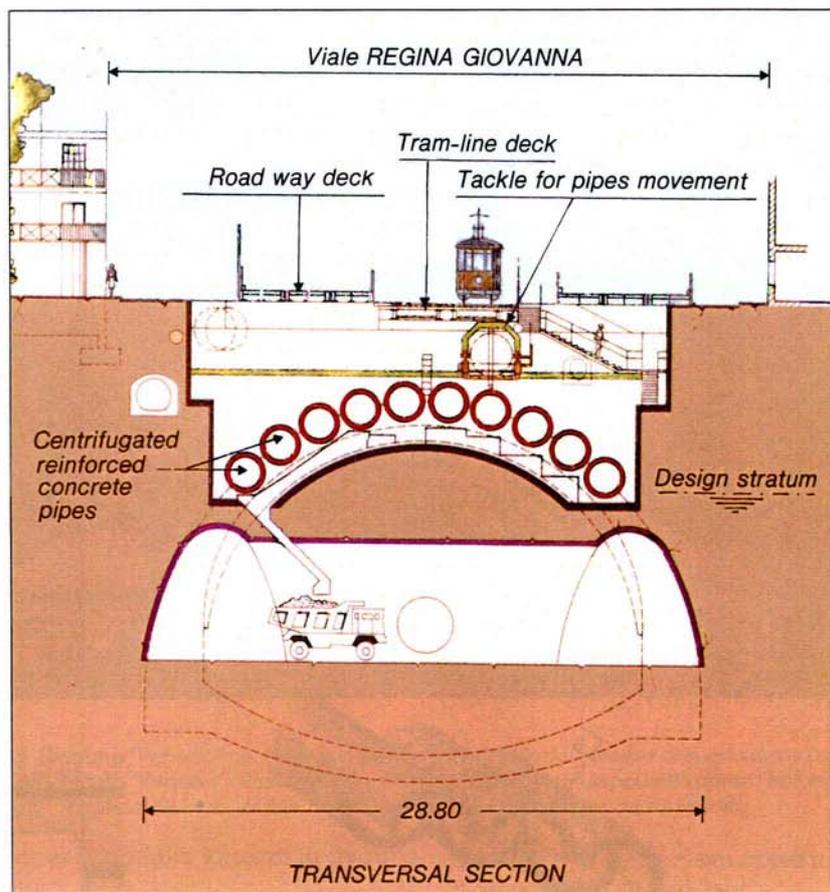
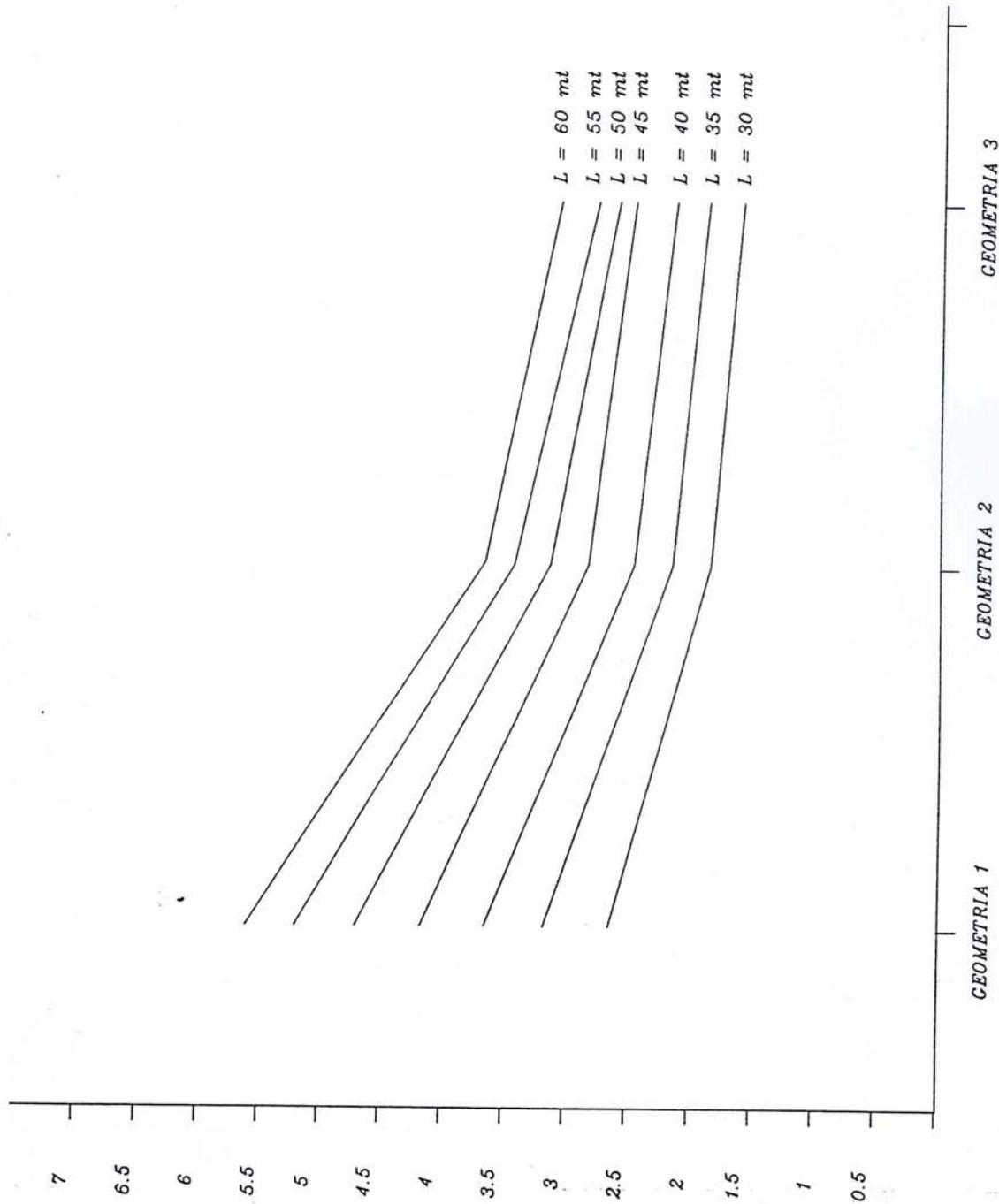


FIG. 8

CALOTTA (copertura 15 mt)

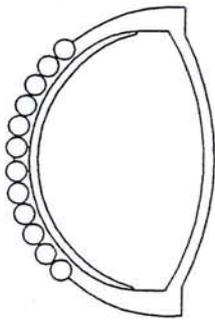
SPESSORE (mt)



GEOMETRIA 1

CURVATURA ESTERNA MONOCENTRICA

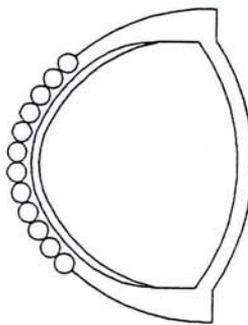
$$L/H = 2.09$$



GEOMETRIA 2

CURVATURA ESTERNA POLICENTRICA

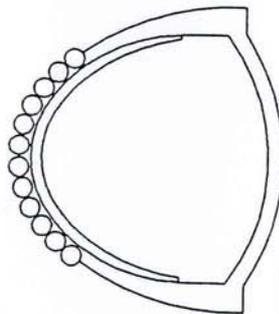
$$L/H = 1.73$$



GEOMETRIA 3

CURVATURA ESTERNA POLICENTRICA

$$L/H = 1.5$$



DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNELS
 ADECO-RS SYSTEM

CHECKOUT
 PHASE

VENEZIA STATION - MAXIMUM DISPLACEMENT
 (related to the grouting stage)
 CHECKED AT THE END OF CONSTRUCTION

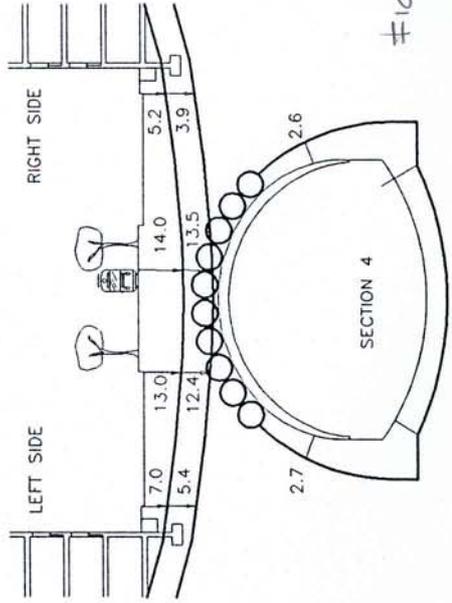
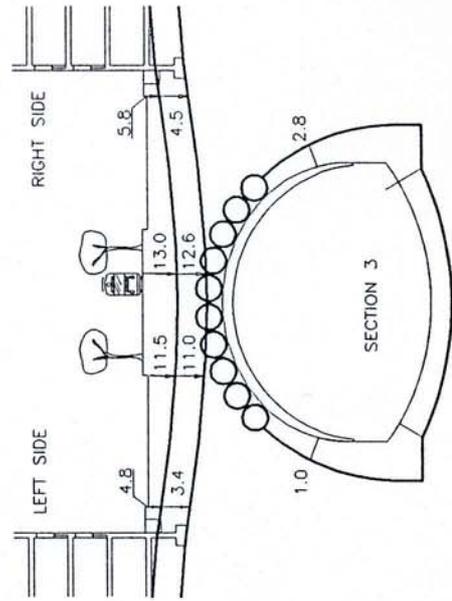
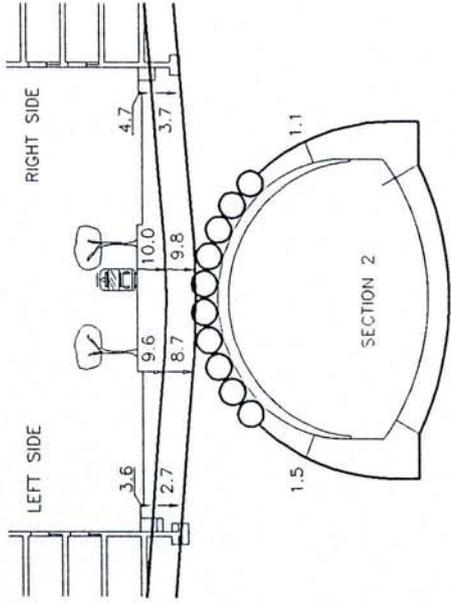
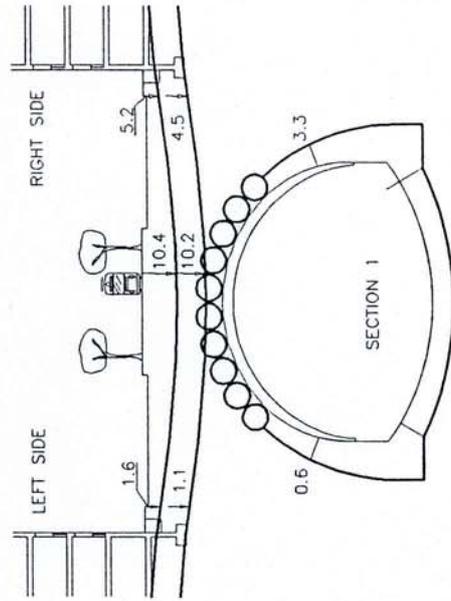


Fig. 10

P. LUNARDI - MILANO

10

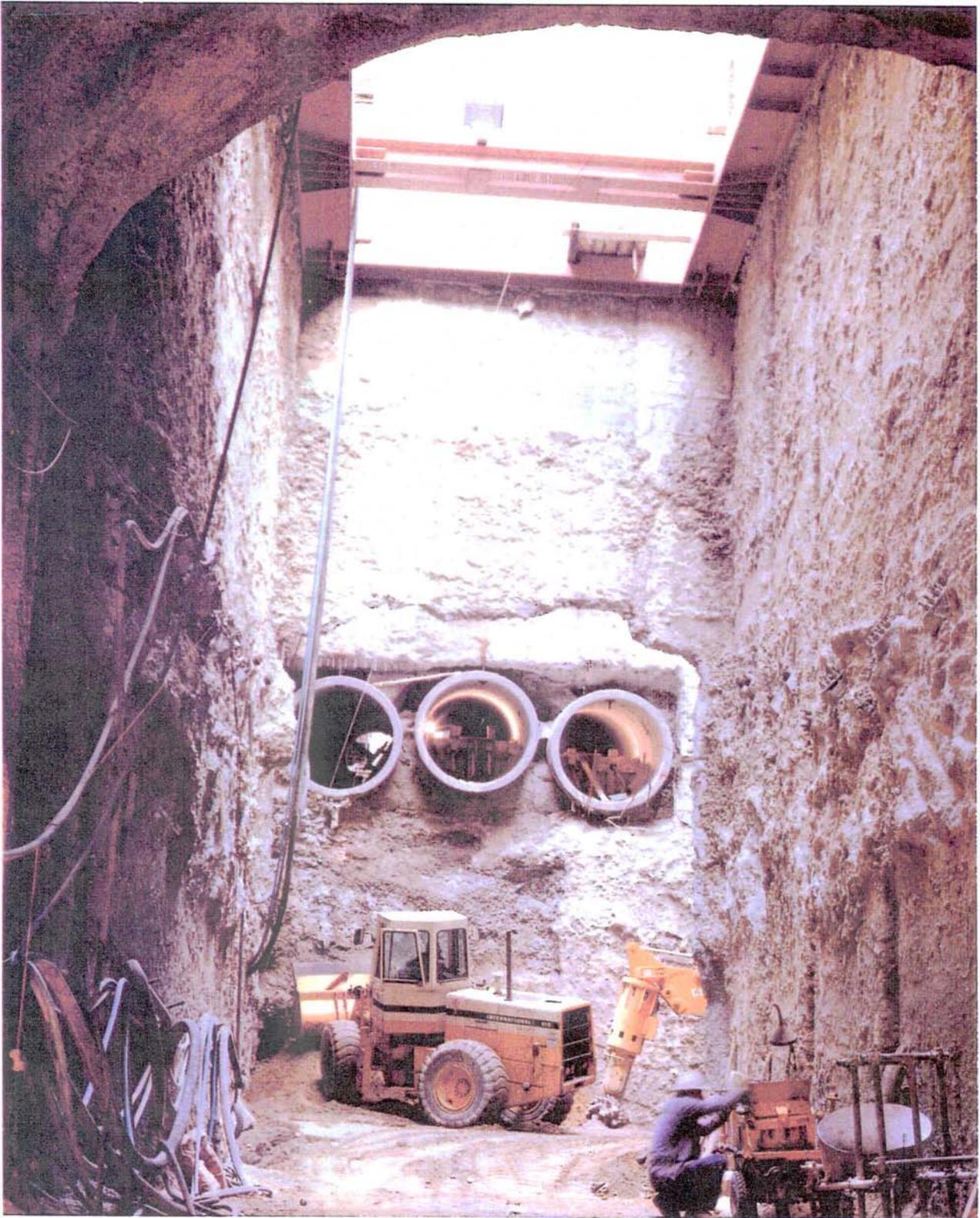


FOTO 1

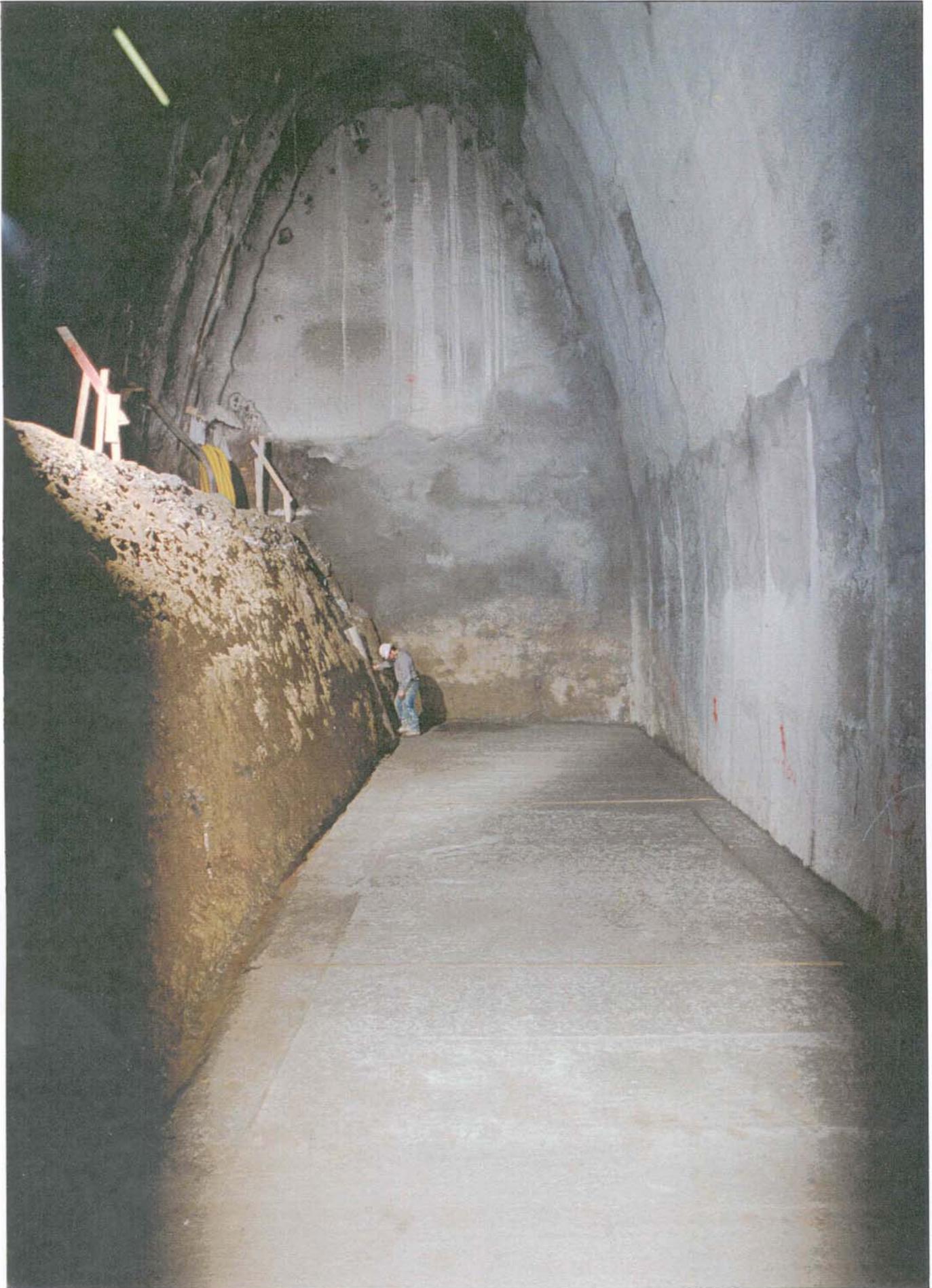


FOTO 2



FOTO 2



FOTO 4



Form 5

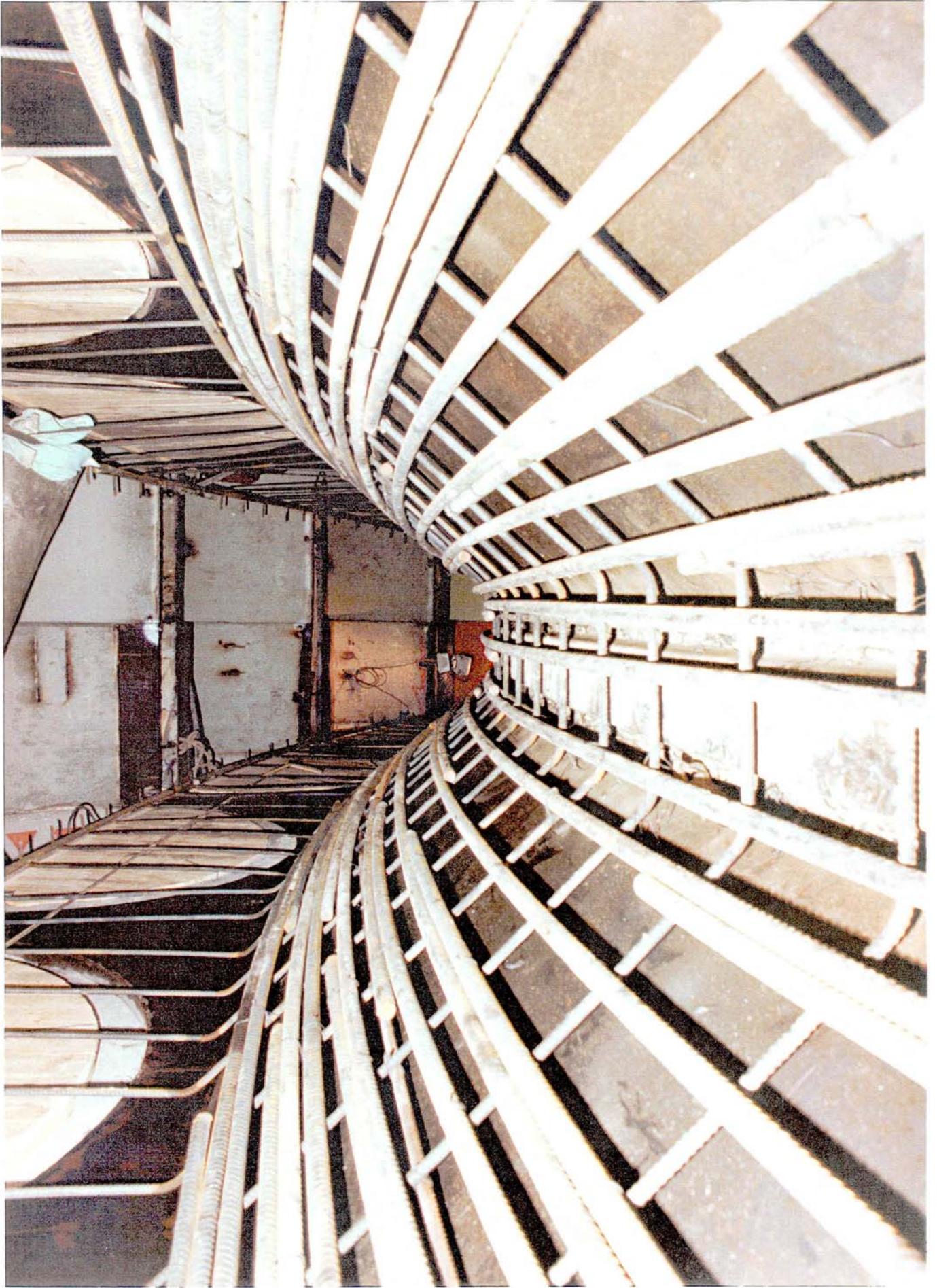


Foto 5

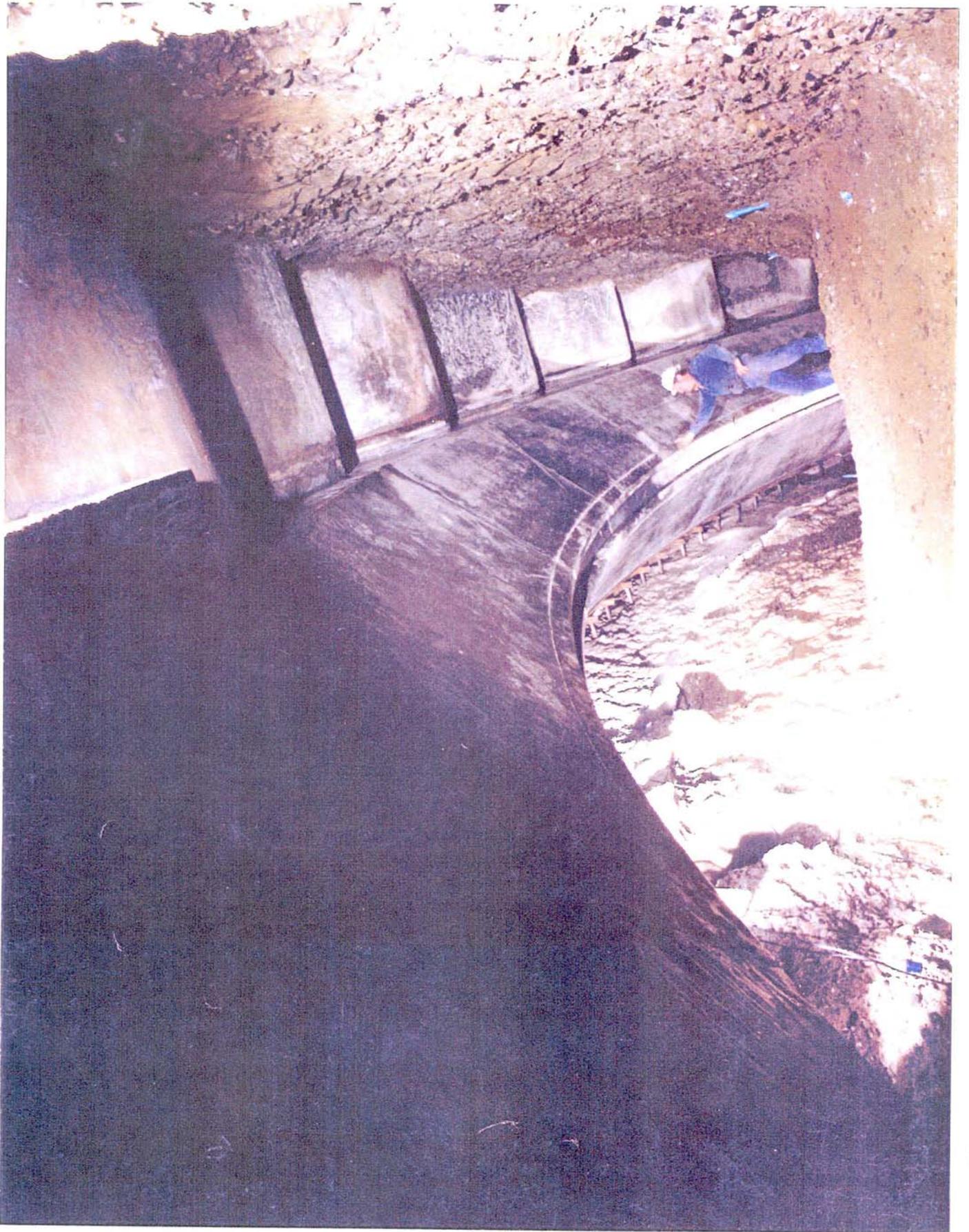


FOTO 7



FOTO 8



FOTO 9