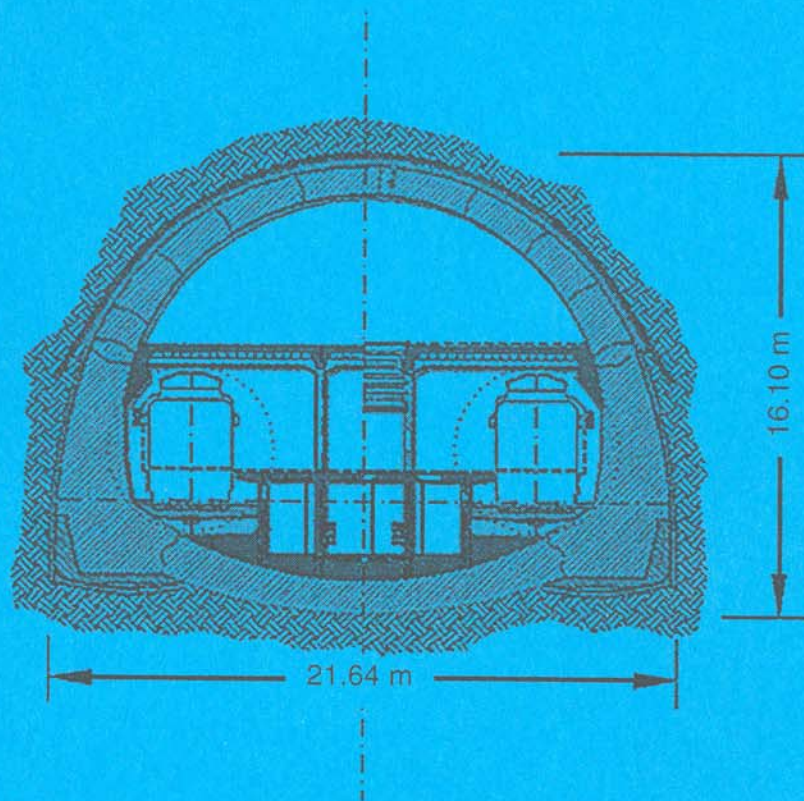


LA METROPOLITANA DI ROMA - LINEA A

Stazione «Baldo degli Ubaldi»

Prof. Ing. Pietro Lunardi - *Studio di progettazione Lunardi, Milano*

Dott. Ing. Alessandro Focaracci - *Rocksoil S.p.A., Milano*



estratto da «**Quarry and Construction**» marzo 1998

Stazione "Baldo degli Ubaldi"

Prof. Ing. Pietro Lunardi - Studio di progettazione Lunardi, Milano

Dott. Ing. Alessandro Focaracci - Rocksoil S.p.A., Milano

Ente concedente: COMUNE DI ROMA
 Concessionaria: INTERMETRO S.p.A.
 Direzione lavori: Dott. Ing. M. Cangiano
 Impresa generale: IMPREGILO S.p.A.
 Direttore tecnico: Geom. G. Berrone
 Direttore di Cantiere: Dott. Ing. S. Merlo
 Capo Cantiere: P.I. G. Ciani
 Assistente: Geom. A. Mastropietro
 Impresa specializzata: RODIO S.p.A.
 Direttore tecnico: Geom. G. Ciciotti
 Direttore di Cantiere: Dott. Ing. A. Cullaciati
 Progettazione: ROCKSOIL S.p.A.
 Progettista: Prof. Ing. P. Lunardi
 Direttore tecnico: Dott. Ing. A. Focaracci
 Assistenza tecnica in sito: Dott. Ing. A. Belfiore

1. Generalità

La stazione "Baldo degli Ubaldi" della metropolitana di Roma è una delle cinque nuove stazioni attualmente in fase di costruzione sul prolungamento della Linea A Ottaviano-Battistini, che completerà il collegamento tra i quartieri periferici della zona Ovest della città con il centro storico e la Città del Vaticano (fig. 1). Essa è ubicata nel centro cittadino, a circa 25 m di profondità, in corrispondenza di una delle più importanti arterie di collegamento viario con l'aeroporto di Fiumicino (via Baldo degli Ubaldi). Le sue ingenti dimensioni (21,5 m di luce per 16 m di altezza), la presenza di edifici civili pluripiano con le fondazioni a meno di due metri di distanza dall'estradosso di calotta della galleria (fig. 2), il tipo di terreni da scavare (argille plioceniche sotto falda) e l'obbligo contrattuale di costruirla senza mai interrompere il flusso del traffico di via Baldo degli Ubaldi durante le fasi della sua realizzazione hanno imposto l'adozione di scelte progettuali e costruttive inusuali, che costituiscono il tema centrale di questo rapporto.

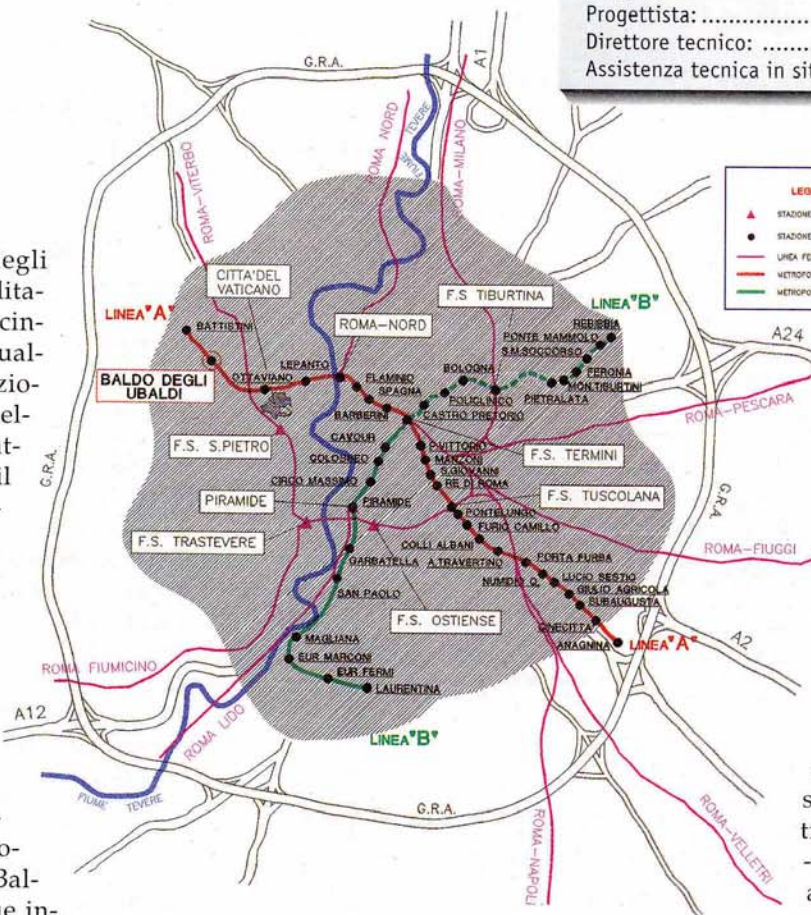


FIG. 1 - Situazione attuale della rete metropolitana e ferroviaria di Roma

2. Inquadramento geologico-geotecnico (fase conoscitiva)

I terreni che costituiscono il sito ove viene costruita la Stazione "Baldo degli Ubaldi" si possono distinguere entro due categorie principali:

- i terreni appartenenti alla formazione di base, costituita da argille azzurre plioceniche con livelli sabbiosi di spessore da centimetrico a decimetrico;
- i terreni recenti appartenenti alla fascia superiore, costituiti

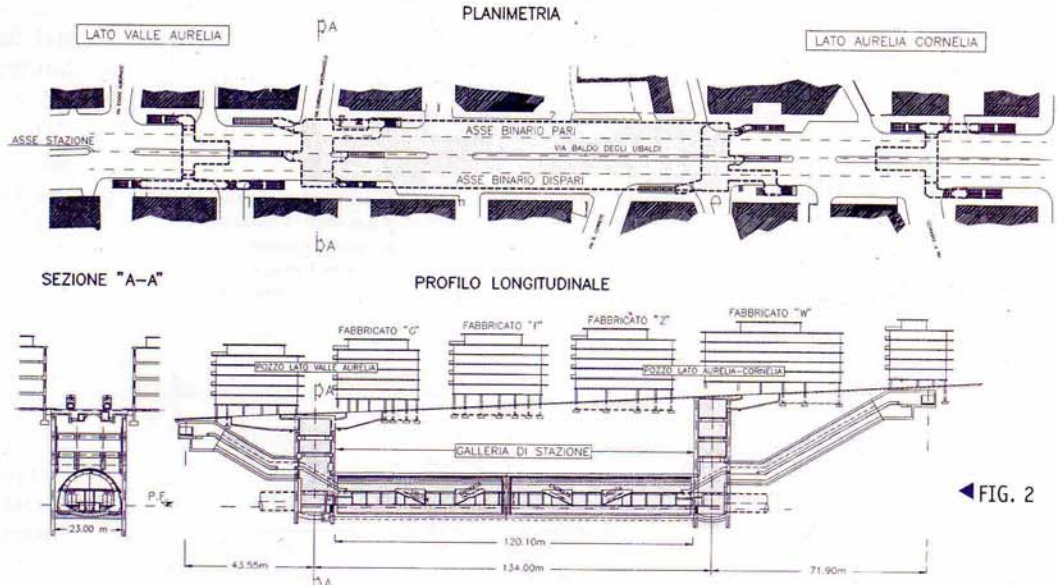


FIG. 2

da sabbie limose poco addensate e, presso il pozzo lato Valle Aurelia, da limi sabbiosi soffici di paleoalveo. Una intensa campagna geognostica condotta dal 1987 fino al 1994 ha permesso, in fase conoscitiva, di ricostruire con accuratezza la successione stratigrafica (fig. 3), e, in particolare, l'andamento del letto del paleoalveo presso il pozzo di valle, che arriva a lambire l'estradosso di calotta in zona reni. Dal punto di vista idrogeologico, le letture dei numerosi piezometri installati nell'area interessata dalla stazione hanno evidenziato la presenza, a 10+12 m di profondità dal piano campagna, di una falda a pelo libero non influenzata dalle precipitazioni meteoriche. Inol-

tre, all'interno dei livelli sabbiosi della formazione pliocenica, si è riscontrata l'esistenza di falde in pressione (circa 2 bar), con ogni probabilità confinate all'interno degli interstrati sabbiosi. Dal punto di vista geotecnico, si sono investigati con attenzione i diversi livelli superiori e la formazione delle argille plioceniche, unica ad essere interessata direttamente dagli scavi della galleria di stazione. Essa è risultata costituita da limi argillosi sovraconsolidati e consistenti. Le numerose prove di laboratorio, esperite su campioni di sondaggio prelevati da detta formazione, hanno fornito i parametri geomeccanici riportati in Tab. I.

TABELLA I	
peso specifico	$\gamma = 2,0 \text{ t/m}^3$
angolo d'attrito	$\phi = 24^\circ + 33^\circ$
coesione CD	$c' = 1,5 + 4,1 \text{ t/m}^2$
coesione non drenata	$c_u = 20 + 57 \text{ t/m}^2$
modulo elastico	$E = 10000 + 25000 \text{ t/m}^2$
permeabilità	$K = 10^{-6} \text{ cm/sec}$

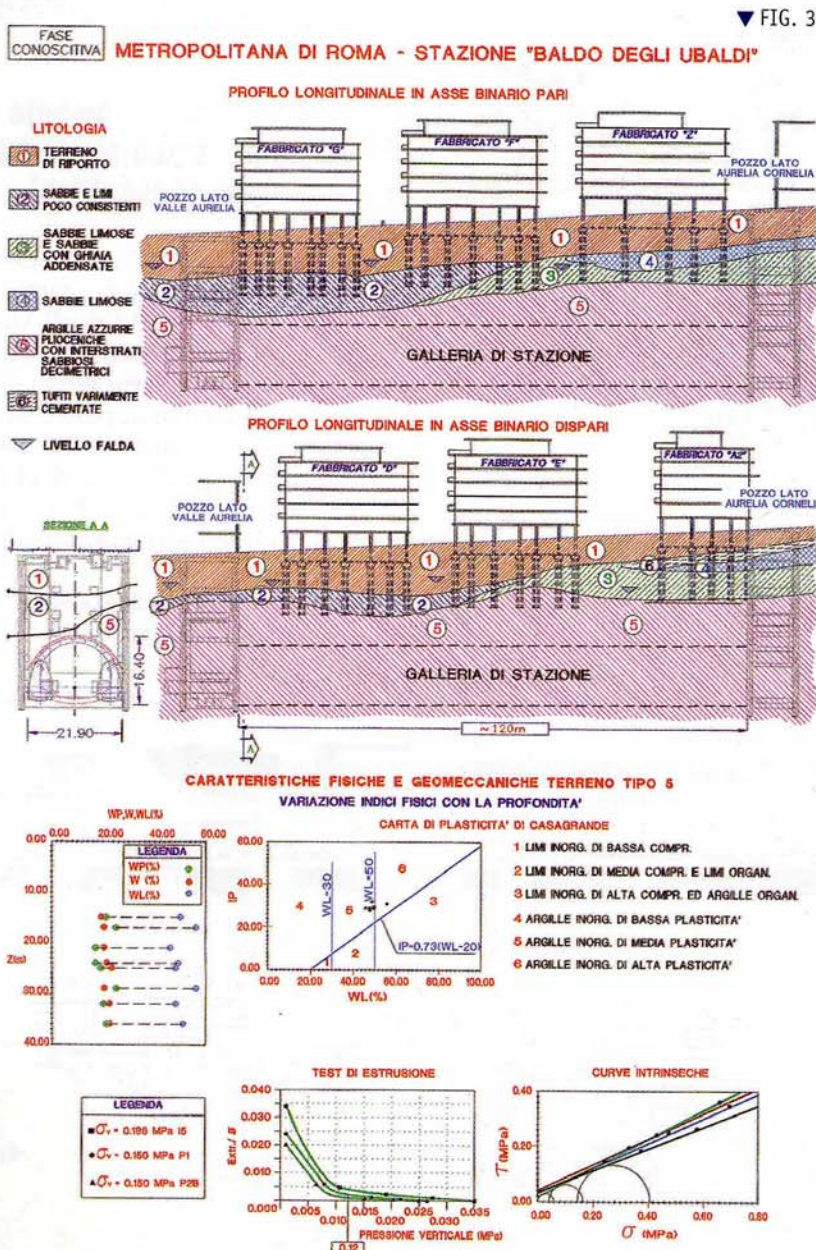
3. Aspetti progettuali (fasi di diagnosi e di terapia)

La progettazione della galleria di stazione "Baldo degli Ubaldi" è stata condotta sulla base dei principi dell'approccio ADECO-RS (Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli). Come noto, questo approccio ripartisce il momento progettuale vero e proprio in due fasi (fig. 4):

- **la fase di diagnosi:** durante la quale, sulla base degli elementi raccolti in fase conoscitiva, il progettista opera, per via teorica, previsioni attendibili riguardo alla risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo, per giungere, infine, ad un inquadramento della galleria in tratte a comportamento deformativo omogeneo, nell'ambito di tre categorie di comportamento fondamentali (Categoria A: fronte stabile, Categoria B: fronte stabile a breve termine, Categoria C: fronte instabile);

- **la fase di terapia:** durante la quale, a seguito delle previsioni fatte in fase di diagnosi, il progettista opera la scelta del tipo di azione da esercitare (precontenimento o semplice contenimento) e degli interventi necessari, nell'ambito delle tre categorie di comportamento A, B, C, per ottenere la completa stabilizzazione della galleria. Egli perfeziona quindi la scelta in termini di sistemi, cadenze e fasi di scavo, componendo le sezioni tipo longitudinali e trasversali, dimensionandole e verificandole attraverso gli strumenti del calcolo matematico.

Nel caso in questione, gli studi eseguiti in fase di diagnosi, soprattutto attraverso l'interpretazione di prove d'estrusione in cella triassiale (fig. 5), hanno permesso di inquadrare la galleria da realizzare in categoria B (fron-



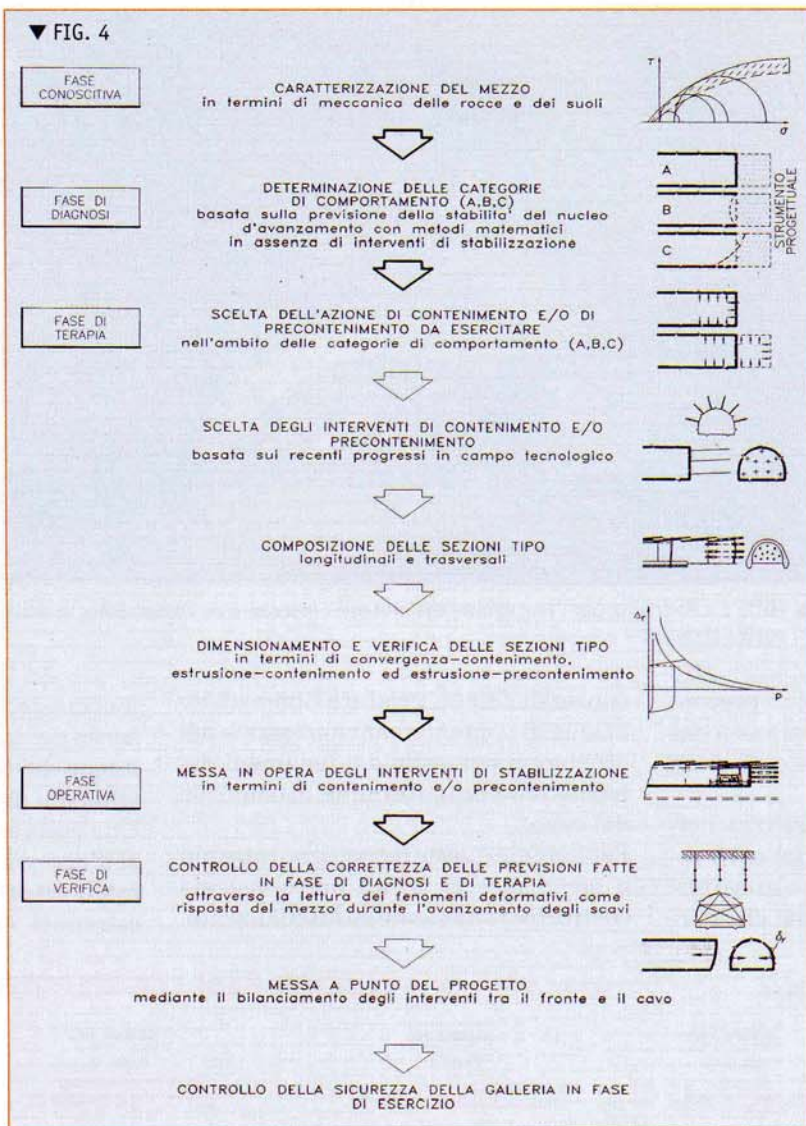
te stabile a breve termine), che corrisponde alla situazione in cui, a seguito di un ipotetico avanzamento in assenza d'interventi di stabilizzazione, lo stato di coazione del terreno al fronte e al contorno del cavo supererebbe la capacità di resistenza in campo elastico dello stesso, senza però evolvere immediatamente in campo di rottura.

In tale situazione l'"effetto arco" non si realizza immediatamente al contorno del cavo, bensì ad una distanza che dipende dalla potenza della fascia dove il terreno subisce il fenomeno della plasticizzazione. I fenomeni deformativi evolvono in campo elastoplastico, sono differiti e di ordine decimetrico. Il fronte di scavo alle normali cadenze d'avanzamento è stabile a breve termine e la sua stabilità migliora o peggiora aumentando o diminuendo la velocità d'avanzamento, a prescindere dall'ampiezza del fronte. Le deformazioni del nucleo, sotto forma di estrusioni, non condizionano la stabilità della galleria perché il terreno è ancora in grado di mobilitare una sufficiente resistenza residua. I fenomeni d'instabilità avvengono sotto forma di splaccaggi diffusi al fronte e al contorno del cavo. La presenza di acqua, se non adeguatamente regimata, favorendo l'estendersi della plasticizzazione del terreno, può accrescere l'importanza di detti fenomeni.

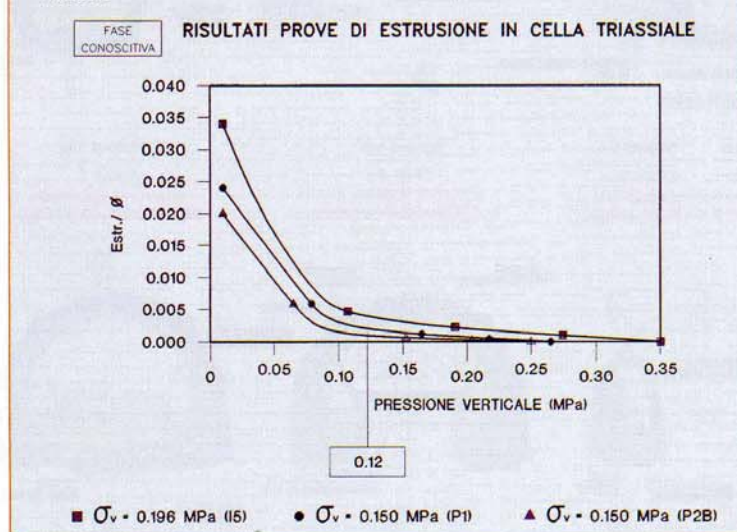
Sulla base di queste previsioni, in fase di terapia è apparso subito evidente che, trovandosi la galleria da scavare in prossimità di fabbricati di civile abitazione, il contenimento dei fenomeni deformativi entro valori minimi, ben al di sotto dell'or-

dine di grandezza normalmente accettato per gallerie da scavare in terreni coesivi, sarebbe stata un'esigenza pri-

maria. L'adozione di interventi e metodi costruttivi tradizionali, basati sul rivestimento dello scavo mediante centine metalliche e spritz-beton, non avrebbe consentito di fronteggiare questa esigenza, nemmeno parzializzando gli scavi tra gallerie di piedritto, calotta, strozzo e arco rovescio. Pertanto, si sono studiati interventi di precontenimento del nucleo al fronte e del cavo che, agendo a monte del fronte, fossero in grado di mantenere il nucleo d'avanzamento in elasticità e, di conseguenza, potessero garantire un adeguato controllo dei fenomeni deformativi del cavo durante le diverse fasi di costruzione della galleria di stazione. Per la realizzazione delle gallerie di piedritto si è optato per un sistema d'avanzamento che prevede l'adozione del preconsolidamento del nucleo con elementi strutturali di vetroresina (onde limitare i movimenti estrusivi che si sarebbero tradotti immediatamente in cedimenti in superficie) quindi lo scavo a piena sezione e il rivestimento con spritz-beton fibrorinforzato, centine metalliche con puntone in arco rovescio e murette di cemento armato. Per la realizzazione dello scavo di calotta, invece, si è progettato un nuovo sistema costruttivo, che coniuga il preconsolidamento del nucleo d'avanzamento con elementi strutturali di vetroresina e la tecnologia del pretaglio meccanico (per la prima volta al mondo applicata su una luce di 21,5 m) con



▼ FIG. 5



il principio della "volta attiva".

Questa scelta è stata dettata dalla assoluta necessità di ottenere il controllo più completo possibile dei fenomeni deformativi in galleria, premessa indispensabile per poter poi rispettare i vincoli alle subsidenze in superficie imposti dalla presenza di edifici abitati. Infatti:

- il preconsolidamento del nucleo d'avanzamento con elementi strutturali di vetroresina riduce i fenomeni di estrusione al fronte e, di conseguenza, ostacola l'innesco dei fenomeni di preconvergenza e convergenza del cavo che sono la causa primaria dei cedimenti in superficie;

- il pretaglio meccanico realizza l'effetto di precontenimento del cavo indispensabile per annullare, a breve termine, i fenomeni deformativi che normalmente insorgono prima dell'arrivo del fronte di scavo e che possono rendere precaria la sicurezza del cantiere in galleria e in superficie;

- la "volta attiva", costituita da un guscio di rivestimento definitivo di conci prefabbricati posti in opera a brevissima distanza dal fronte di scavo e resi attivi agendo su appositi martinetti inseriti nel



▲ FOTO 1 - Macchina per l'esecuzione del pretaglio meccanico e l'assemblaggio della «volta attiva»

si è progettata, in collaborazione con i tecnici di Impregilo e Rodio, un'apposita macchina, che è stata poi realizzata dalla ditta STAC. Essa consiste (foto 1) in un grande portale metallico, geometricamente rispondente al profilo di calotta della galleria di stazione, appoggiato, all'interno delle gallerie di piedritto, tramite stabilizzatori posti su longheroni in modo da consentirne la traslazione longitudinale. Sul portale, oltre all'attrezzatura necessaria per l'esecuzione dei gusci di pretaglio

meccanico, è montata anche quella che serve per la movimentazione e il montaggio dei conci prefabbricati del rivestimento definitivo.

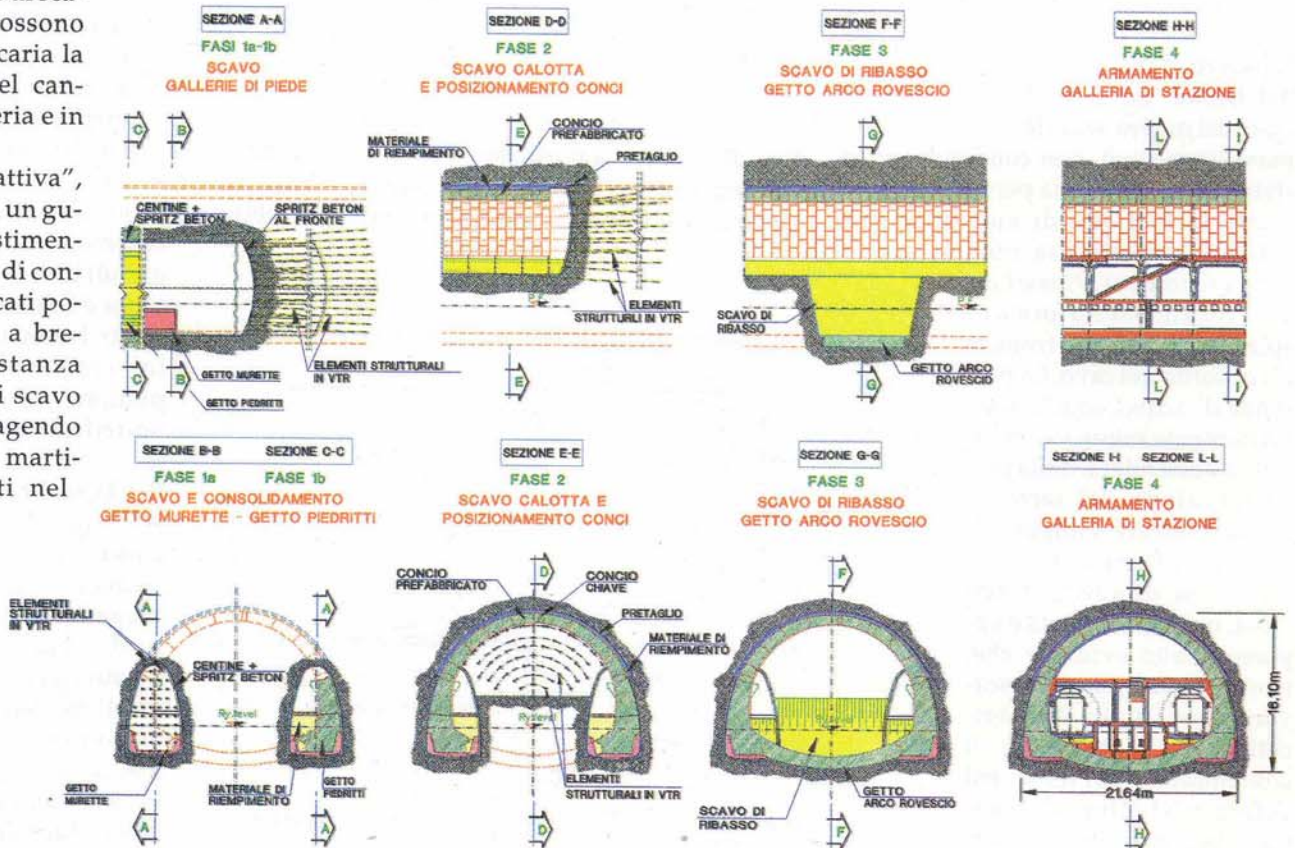
Una volta eseguito lo scavo di due pozzi d'accesso di 200 m² di sezione e profondi rispettivamente 30 e 40 m alle estremità della galleria da realizzare

meccanico, è montata anche quella che serve per la movimentazione e il montaggio dei conci prefabbricati del rivestimento definitivo.

Una volta eseguito lo scavo di due pozzi d'accesso di 200 m² di sezione e profondi rispettivamente 30 e 40 m alle estremità della galleria da realizzare

▼ FIG. 6

GALLERIA DI STAZIONE FASI COSTRUTTIVE



(al termine dei lavori saranno utilizzati per l'ubicazione di alcuni locali tecnologici), per costruire la galleria di stazione si sono previste, in estrema sintesi, le seguenti fasi esecutive (fig. 6):

1a. scavo di due gallerie laterali di 5 m di larghezza per 9 m d'altezza, futura sede dei piedritti della galleria di stazione, previo consolidamento del nucleo con elementi strutturali di vetroresina e rivestimento del cavo con spritz-beton fibrorinforzato armato con centine metalliche dotate di puntone;

1b. getto dei suddetti piedritti in calcestruzzo armato;

2. scavo di calotta della galleria di stazione (21,5 m di luce, 8,5 m d'altezza, per una sezione di 125 m²), previo consolidamento del nucleo con elementi strutturali di vetroresina ed esecuzione del guscio di pretaglio meccanico, quindi rivestimento immediato della calotta con "volta attiva" di conci prefabbricati;

3. scavo di ribasso della galleria di stazione (90 m² di sezione) e getto immediato dell'arco rovescio, per campioni (7 m max) dopo la realizzazione della calotta.

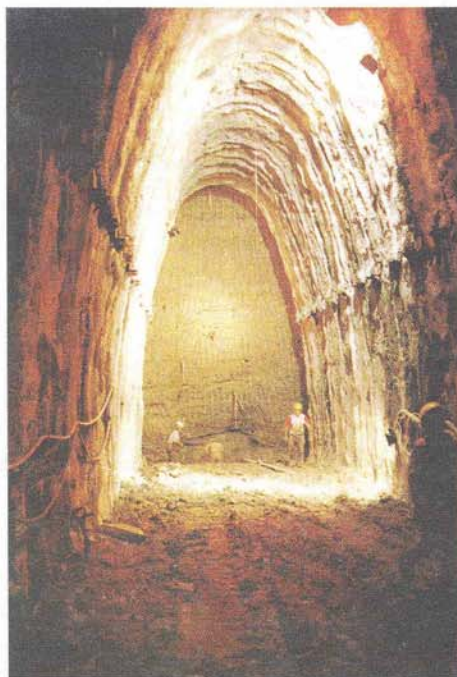
4. completamento delle infrastrutture di stazione con la realizzazione del piano banchina e del mezzanino, nonché delle relative scale d'accesso alle discenderie.

Il sistema di scavo e il dimensionamento degli interventi di stabilizzazione sono stati verificati per le diverse fasi di lavorazione attraverso numerosi calcoli numerici condotti mediante elaboratore su modelli agli elementi finiti in campo non lineare, anche tridimensionali. I calcoli hanno permesso, tra l'altro, di verificare l'idoneità del sistema a garantire la sicurezza degli edifici limitrofi all'area del cantiere. I cedimenti massimi in superficie da prevedere, in seguito allo scavo della galleria, sono risultati pari a 1,4 cm in corrispondenza del suo asse e dell'ordine del centimetro in corrispondenza dei fabbricati.

Confortati dai risultati dei calcoli, si è finalmente iniziato a costruire l'opera.

4. Aspetti costruttivi (fase operativa)

Dopo aver delimitato lo spazio neces-



▲ FOTO 2 - Scavo di una galleria di piedritto

sario al cantiere sottraendo al traffico le corsie centrali di via Baldo degli Ubaldi, si è cominciato a scavare i due pozzi d'accesso ubicati alle estremità della futura galleria di stazione (Pozzo Valle Aurelia e Pozzo Aurelia Cornelia), previo contenimento del terreno al contorno con paratie di pali Ø 1200 e contrasti in cemen-

to armato realizzati durante lo scavo. Una volta completato il pozzo di monte, si sono scavate le gallerie di piedritto, procedendo dal Pozzo Aurelia Cornelia verso il Pozzo Valle Aurelia (foto 2). Come accennato in precedenza, le caratteristiche e la situazione tenso-deformativa del terreno, le dimensioni e la forma allungata verso l'alto della sezione di scavo, insieme ai vincoli relativi ai cedimenti ammissibili in superficie, hanno richiesto l'adozione di severe misure di stabilizzazione preventiva per contenere l'estrusione del fronte di scavo. Queste sono consistite nell'esecuzione di un intenso preconsolidamento del nucleo d'avanzamento con elementi strutturali di vetroresina (fig. 7) appositamente progettati per ottenere la massima resa dal trattamento; le pareti delle gallerie, invece,

▼ FIG. 7 - Elementi strutturali di vetroresina (VTR) utilizzati per il consolidamento del nucleo di terreno al fronte di scavo



sono state stabilizzate mediante un rivestimento di

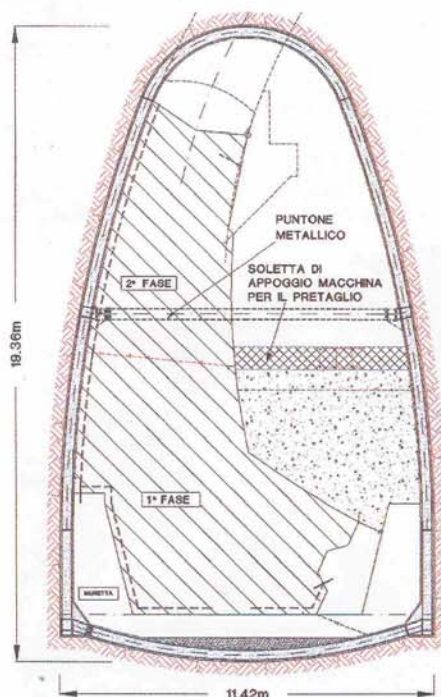
spritz-beton fibrorinforzato di 20 cm di spessore, armato con centine metalliche doppie IPN 180 chiuse in arco rovescio con puntone metallico e getto di murette armate. Un puntone è stato utilizzato anche all'altezza delle reni delle gallerie laterali (fig. 8) per contenere le convergenze entro 2 cm (valore stimato accettabile). In tal modo le due gallerie si sono potute realizzare, mantenendo i fronti di scavo sfalsati di almeno 40 m, senza incontrare inconvenienti di sorta, con produzioni dell'ordine di 2 m/giorno.

Ultimate le gallerie laterali, al loro interno si sono gettati in opera, in due fasi, i piedritti di cemento armato della galleria di stazione (foto 3).

Si è quindi passati alla parte più interessante e caratterizzante il progetto della Stazione "Baldo degli Ubaldi": la costruzione della grande galleria a volta unica.

L'avanzamento è stato frazionato in uno scavo di calotta e in un successivo

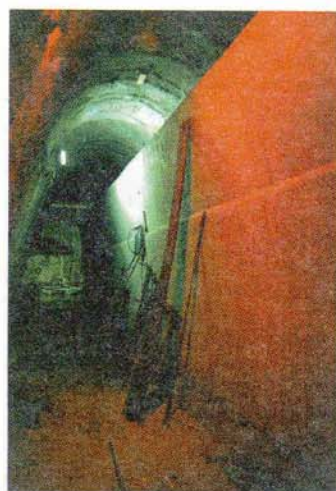
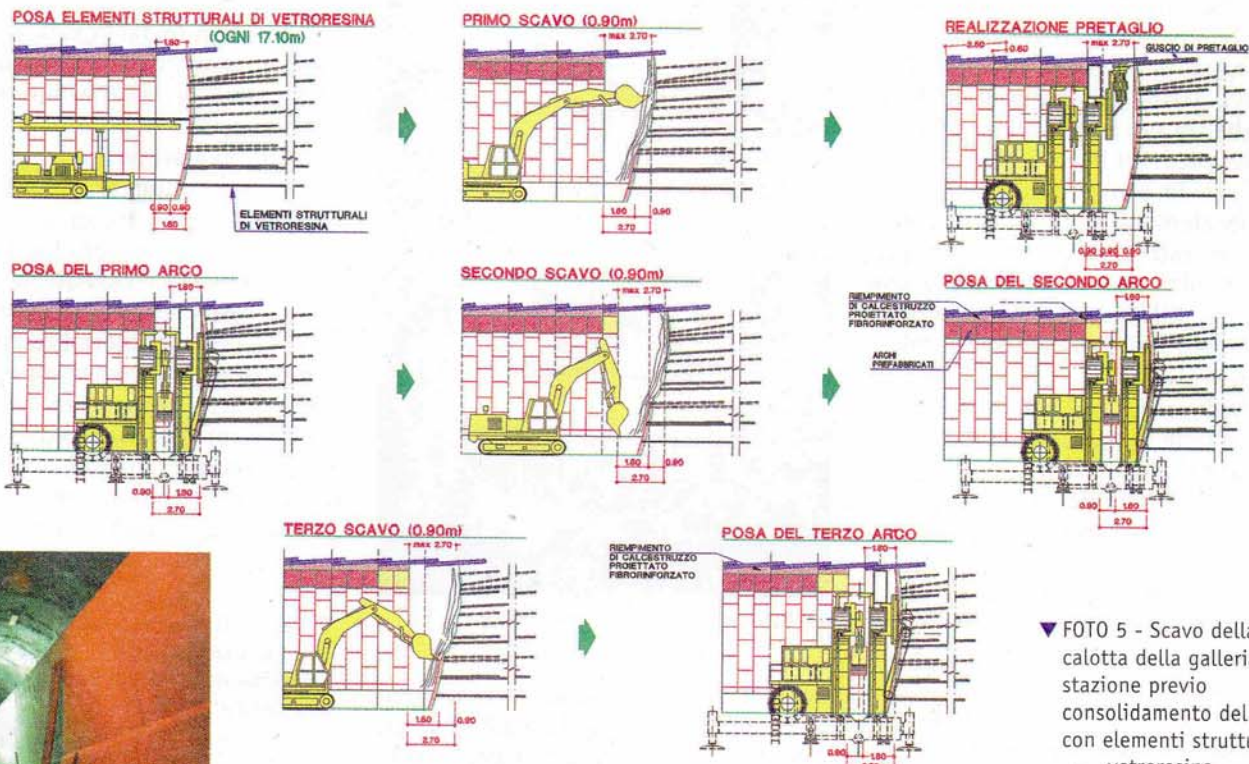
▼ FIG. 8 CARPENTERIA PIEDRITTO



► FIG. 9

FASE OPERATIVA

FASE COSTRUTTIVE CALOTTA GALLERIA DI STAZIONE



▼ FOTO 3 Il pedritto disarmato

scavo di ribasso, con getto dell'arco rovescio, per campioni. Procedendo dal Pozzo Valle Aurelia verso il Pozzo Aurelia Cornelia si è realizzato innanzi tutto (fig. 9) un intervento d'irrigidimento del nucleo di terreno al fronte mediante l'inserimento nello stesso di 47 elementi strutturali di vetroresina di 25 m di lunghezza (sovrapposizione minima tra elementi successivi: 6,10 m). Quindi si è eseguito, ogni 2,70 m, un guscio di pretaglio meccanico di 3,50 m di lunghezza e 20 cm di spessore, per uno sviluppo di circa 28 m su 21,5 m di luce netta.

Per ottenere un guscio particolarmente omogeneo e resistente, la tecnica del pretaglio è stata opportunamente modificata in modo da poter impiegare calcestruzzo pompato, anziché spruzato.

A questo scopo, per evitare che, duran-

te la fase di riempimento, il calcestruzzo debordasse fuori dal taglio, si sono posizionati, lungo il bordo dello stesso, a tergo della lama, speciali casseri pneumatici tubolari di diametro compatibile con l'altezza del taglio da casserare (foto 4).

All'esecuzione di ogni guscio

▼ FOTO 4 - Esecuzione del pretaglio e suo riempimento con calcestruzzo pompato previo utilizzo di speciali casseri pneumatici tubolari



▼ FOTO 5 - Scavo della calotta della galleria di stazione previo consolidamento del nucleo con elementi strutturali di vetroresina, esecuzione del guscio di pretaglio e realizzazione del rivestimento definitivo a «volta attiva» a 2,70 m max dal fronte

seguiva lo scavo (per sfondi di 0,90 m) e l'immediato assemblaggio del rivestimento definitivo a non più di 2,70 m dal fronte (foto 5).

Questo consisteva nella posa in opera di 12 conci prefabbricati del peso medio di 6,5 t ciascuno: 2 conci di appoggio sui pedritti, 9 conci standard e un concio di chiave (figg. 10, 11 e foto 6). Una volta ultimato un arco di rivestimento, con questo ancora appoggiato alla macchina, lo spazio che rimaneva tra esso e il guscio di pretaglio veniva riempito di conglomerato cementizio additivato e proiettato. Quindi, agendo su due martinetti tipo Freyssinet da 360 t (corsa massima di 3,5 cm) alloggiati all'interno del concio di chiave, si metteva una prima volta in precom-

pressione (per 40 t) l'intero arco di rivestimento rendendolo così immediatamente attivo e autoportante, in modo da annullare qualsiasi fenomeno deformativo insorgente e, addirittura, recuperare le deformazioni elastiche già subite dal guscio di pretaglio.

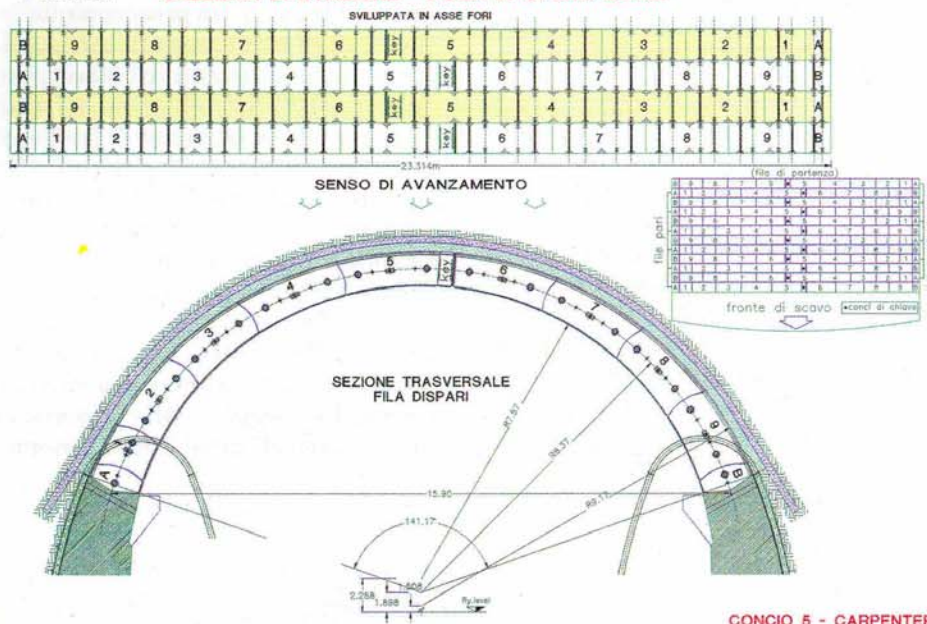
Procedendo in tal modo si è riusciti a garantire la realizzazione e l'attivazione del rivestimento definitivo della galleria a brevissima distanza dal fronte, riducendo enormemente il rischio di cedimenti in superficie e ottenendo una produzione media di 0,7÷0,9 m/giorno di calotta finita.

Una volta completata la calotta della



▲ FOTO 7 - Scavo e getto dell'arco rovescio

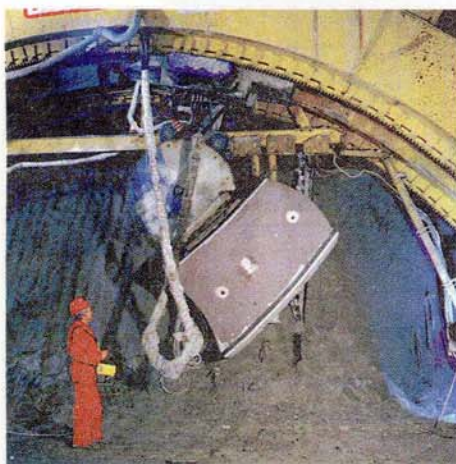
▼ FIG. 10 GALLERIA DI STAZIONE - POSA IN OPERA CONCI



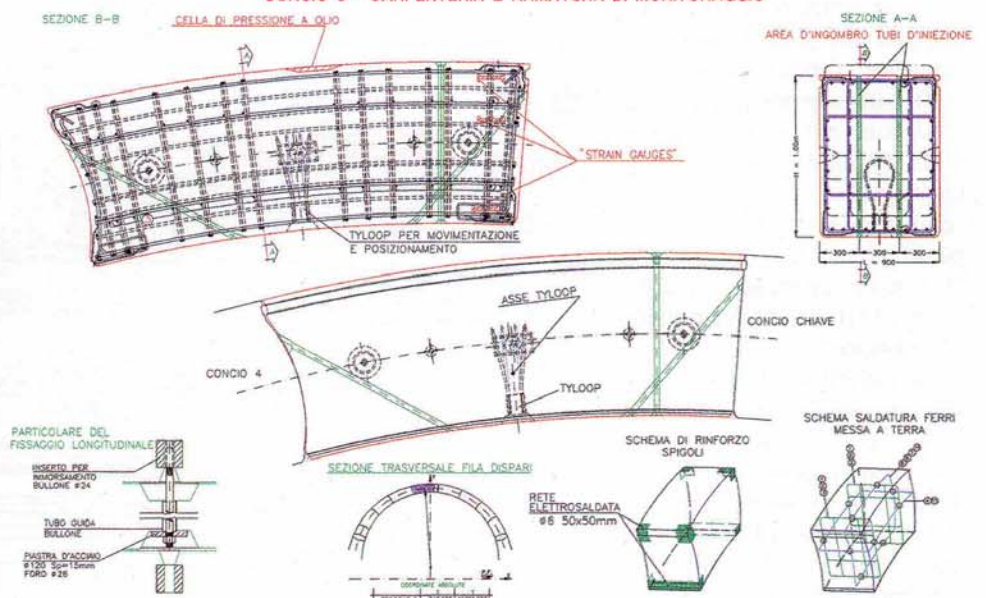
galleria si è passati all'esecuzione, per campioni, dello scavo di ribasso e al getto dell'arco rovescio (foto 7). A seguire, è stata completata la precompressione degli archi di rivestimento sino a raggiungere il valore di 360 t, necessario per ottenere il centraggio definitivo delle sollecitazioni instauratesi negli stessi.

La volta così realizzata rimane faccia a vista e la sua impermeabilità è garantita, oltre che dalle guarnizioni in neoprene opportunamente dimensionate, da iniezioni di miscela impermeabilizzanti eseguite attraverso tubi predisposti all'interno dei conci (fig. 11).

▼ FOTO 6 - Movimentazione e posizionamento di un concio prefabbricato per l'assemblaggio della «volta attiva»



CONCIO 5 - CARPENTERIA E ARMATURA DI MONITORAGGIO



▼ FIG. 11

METROPOLITANA DI ROMA - STAZIONE "BALDO DEGLI UBALDI"
 MONITORAGGIO GALLERIA DI PIEDRITTO - LATO BINARIO PARI

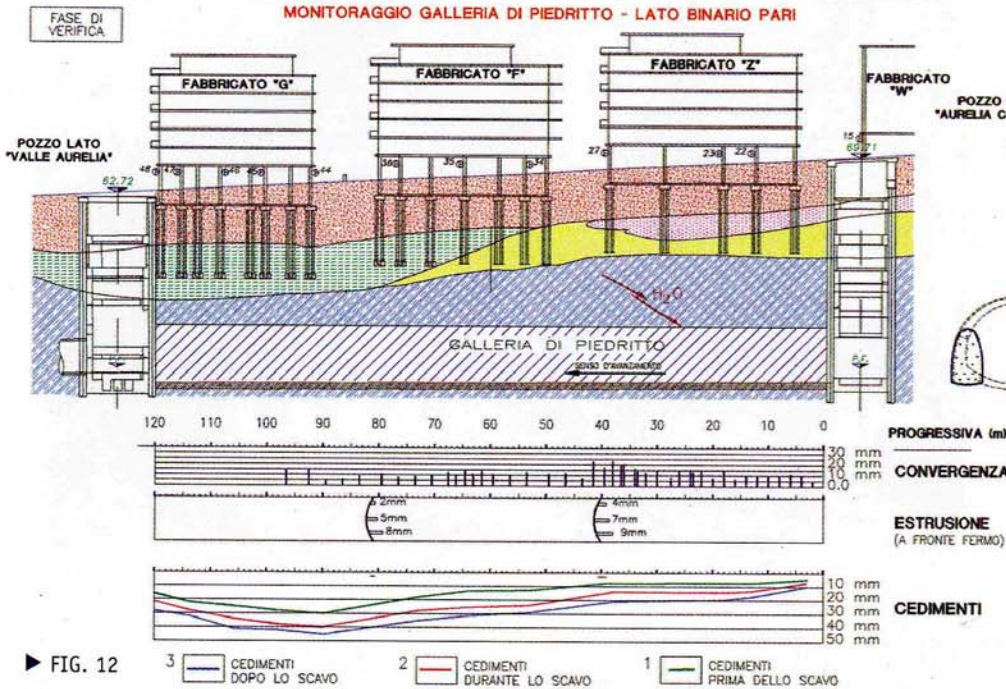


FIG. 12 3 CEDIMENTI DOPO LO SCAVO 2 CEDIMENTI DURANTE LO SCAVO 1 CEDIMENTI PRIMA DELLO SCAVO

5.1 Il monitoraggio durante lo scavo dei pozzi d'accesso e delle gallerie di piedritto

In questa fase, lo scopo principale del monitoraggio era controllare l'ampiezza e l'effetto dei fenomeni di subsidenza del terreno sui fabbricati e correlare la loro escursione temporale con le lavorazioni eseguite, onde verificare l'attendibilità delle previsioni progettuali, da un lato, e risalendo alle cause dei fenomeni osservati, poter intervenire nella maniera più efficace per contrastarli, dall'altro lato.

In questo senso appare importante sottolineare come le misure abbiano permesso di individuare tempestivamente l'inizio di un preoccupante fenomeno di subsidenza in corrispondenza all'asse del futuro binario pari, vicino al fabbricato G presso il Pozzo Valle Aurelia, allorché il fronte di scavo della galleria di piedritto lato pari si trovava a 50 m dal fabbricato in questione, mentre il suddetto pozzo era ancora in costruzione. L'analisi di tutti i dati disponibili (misure di estrusione e convergenza eseguite in galleria (figg. 12 e 13), misure assestometriche, inclinometriche e piezometriche eseguite dalla superficie) consentivano di attribuire il fenome-

5. Verifica in corso d'opera

La fase di verifica in corso d'opera, soprattutto nel caso di lavori in sotterraneo, assume grande rilievo, essendo questo il momento in cui si controlla la validità delle previsioni fatte in fase di diagnosi e di terapia, onde valutare l'idoneità del progetto nella sua globalità e procedere alla sua perfetta e definitiva messa a punto.

Nel caso della Stazione "Baldo degli Ubaldi", poi, la collocazione in ambito urbano rende d'importanza fondamentale eseguire, oltre ai consueti controlli sul comportamento tenso-deformativo delle gallerie, il monitoraggio continuo degli effetti delle lavorazioni in corso in termini di subsidenza superficiale.

Di conseguenza, si sono sottoposti ad attento e continuo monitoraggio:

- i movimenti dei fabbricati ubicati nell'area interessata dalle lavorazioni;
- i cedimenti del terreno di fondazione degli stessi;
- la variazione del livello delle falde superficiali e profonde;
- l'estrusione del nucleo al fron-

te di scavo e la convergenza al contorno delle gallerie;

- l'evoluzione delle sollecitazioni e delle deformazioni all'interno del rivestimento di conci prefabbricati.

Nel seguito si distinguerà, per opportunità, tra misure effettuate durante lo scavo dei pozzi d'accesso e delle gallerie di piedritto e misure eseguite durante lo scavo della calotta e dell'arco rovescio della galleria di stazione.

METROPOLITANA DI ROMA - STAZIONE "BALDO DEGLI UBALDI"
 MONITORAGGIO GALLERIA DI PIEDRITTO - LATO BINARIO DISPARI

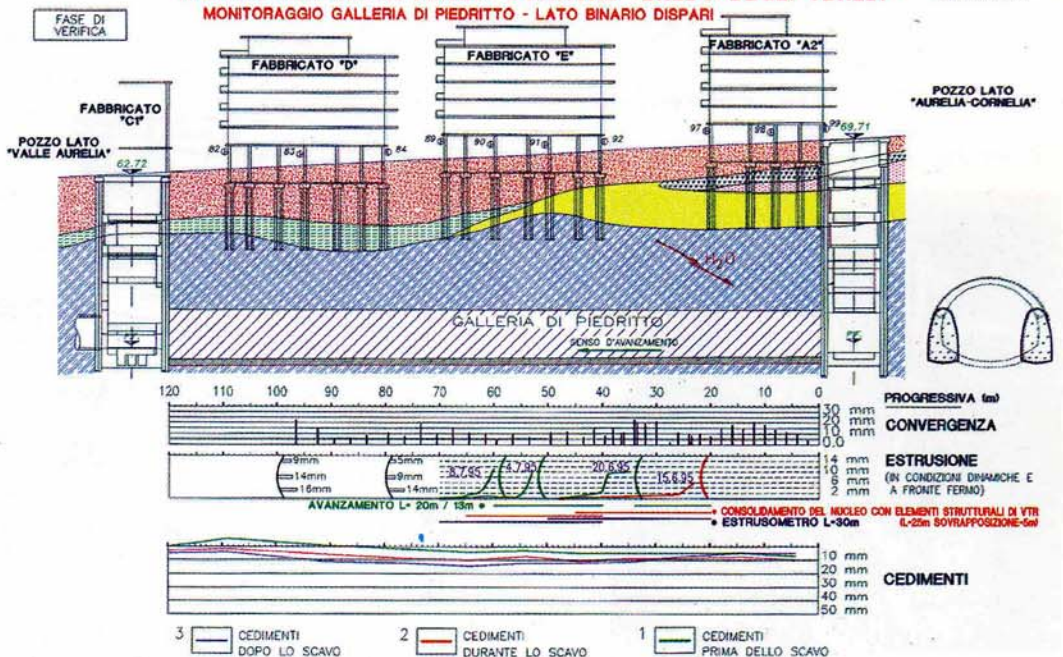


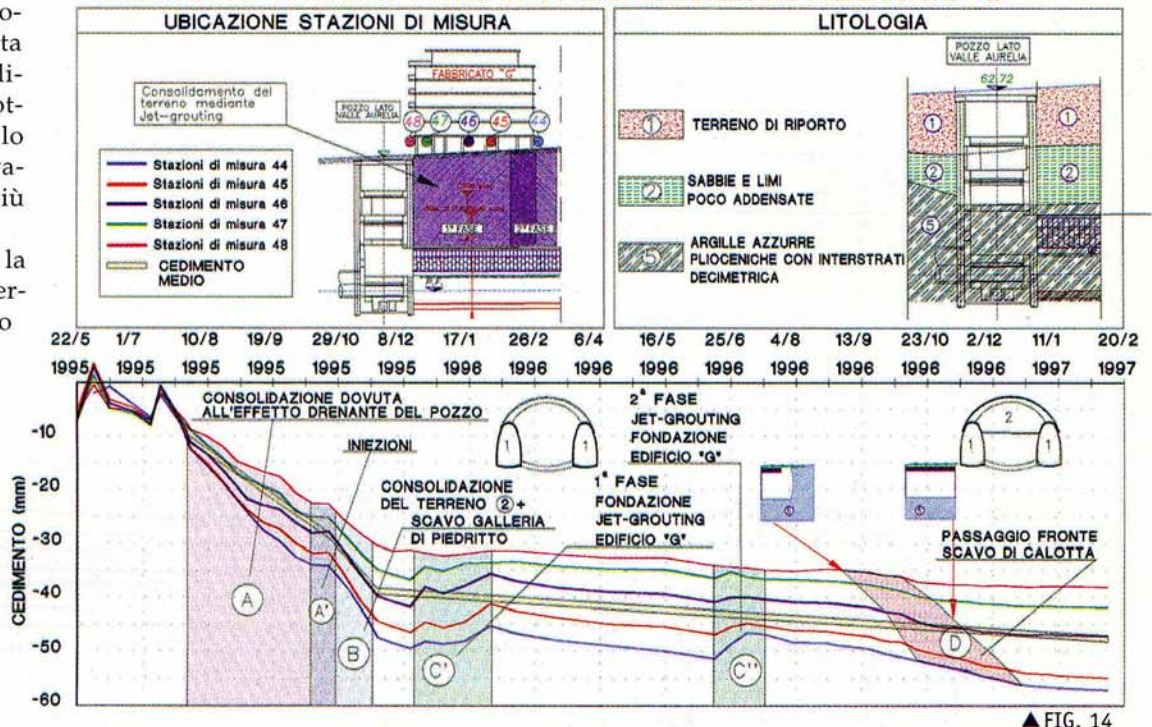
FIG. 13

no, con ragionevole certezza, alla consolidazione dei terreni limo-sabbiosi del paleoalveo - dovuta alle variazioni d'equilibrio idrogeologico indotte dalle lavorazioni per lo scavo del pozzo - e di valutare i provvedimenti più idonei da adottare.

Alla fine si è optato per la realizzazione di un intervento di confinamento del terreno di fondazione dei fabbricati, costituito da due ordini di colonne di terreno consolidato mediante jet-grouting (circa 250 trattamenti colonnari Ø 600, in terasse medio $i = 60$ cm). In tal modo si è raggiunto il duplice scopo di attenuare i cedimenti dei fabbricati ubicati in corrispondenza del binario pari e di fornire un adeguato confinamento al terreno di fondazione degli stessi in vista dello scavo della grande volta della galleria di stazione.

Se si esclude l'effetto del succitato fenomeno di consolidazione del terreno, i valori dei cedimenti misurati in superficie durante la realizzazione delle due gallerie di piedritto non hanno mai superato gli 8 + 10 mm su entrambe le canne (fig. 14). Per quanto riguarda, invece, l'estrusione del fronte, essa è risultata contenuta, nei passaggi più delicati, mediamente entro il centimetro, a fronte dei due considerati ammissibili. A questo scopo, fondamentale è stato l'effetto del consolidamento del nucleo con elementi strutturali di vetroresina. Lo dimostra il fatto che l'estrusione misurata aumentava proporzionalmente al decrescere, in seguito all'avanzamento, della lunghezza residua degli elementi di vetroresina inseriti nel nucleo (vedi figg. 13 e 15).

**MONITORAGGIO GALLERIA DI STAZIONE
ANDAMENTO CEDIMENTI TOTALI IN CORRISPONDENZA AL FABBRICATO "G"**



▲ FIG. 14

5.2 Il monitoraggio durante lo scavo della calotta e dell'arco rovescio della galleria di stazione

Il progetto di monitoraggio della galleria di stazione prevedeva l'esecuzione di:

- misure d'estrusione topografiche (a fronte fermo) e mediante *sliding micro-*

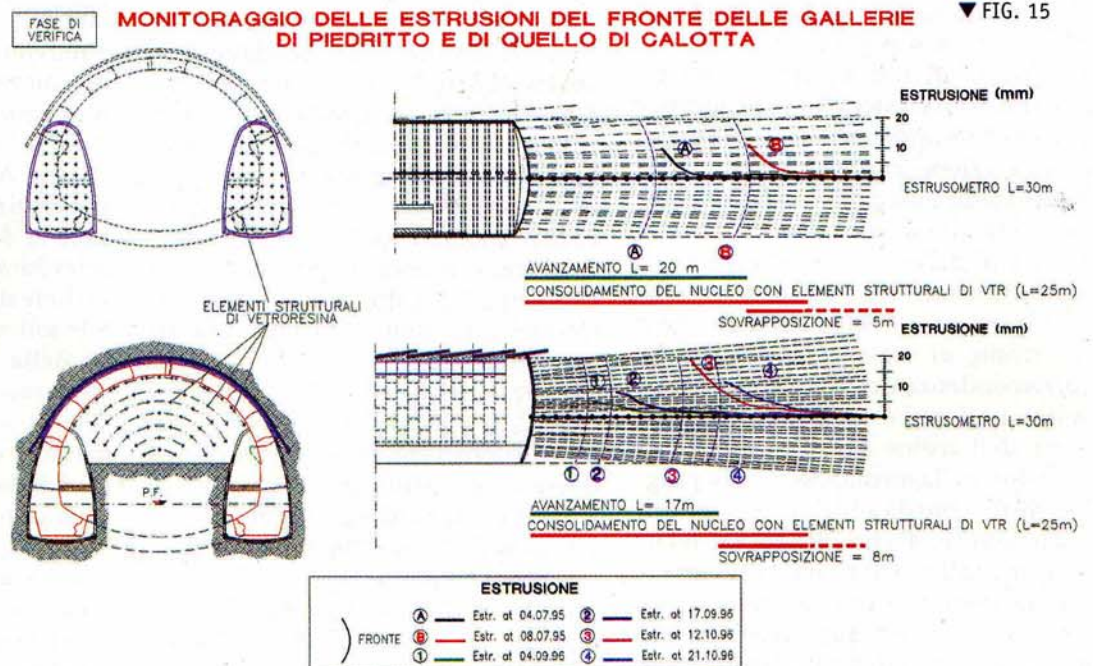
metre di 30 m di lunghezza installati sul fronte;

- misure assestometriche incrementali e inclinometriche per valutare gli spostamenti del terreno in profondità;
- misure piezometriche per controllare le variazioni di livello delle falde.

Contemporaneamente si è proceduto al controllo delle subsidenze e dell'in-

MONITORAGGIO DELLE ESTRUSIONI DEL FRONTE DELLE GALLERIE DI PIEDRITTO E DI QUELLO DI CALOTTA

▼ FIG. 15

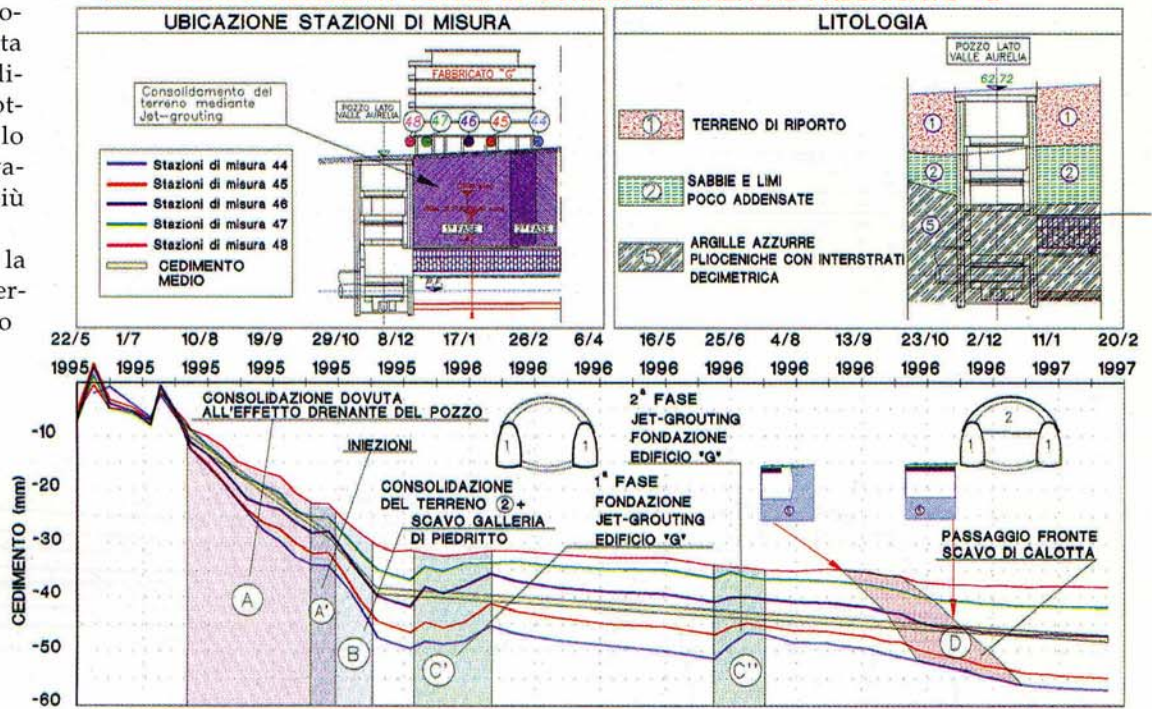


no, con ragionevole certezza, alla consolidazione dei terreni limo-sabbiosi del paleoalveo - dovuta alle variazioni d'equilibrio idrogeologico indotte dalle lavorazioni per lo scavo del pozzo - e di valutare i provvedimenti più idonei da adottare.

Alla fine si è optato per la realizzazione di un intervento di confinamento del terreno di fondazione dei fabbricati, costituito da due ordini di colonne di terreno consolidato mediante jet-grouting (circa 250 trattamenti colonnari Ø 600, in terasse medio $i = 60$ cm). In tal modo si è raggiunto il duplice scopo di attenuare i cedimenti dei fabbricati ubicati in corrispondenza del binario pari e di fornire un adeguato confinamento al terreno di fondazione degli stessi in vista dello scavo della grande volta della galleria di stazione.

Se si esclude l'effetto del succitato fenomeno di consolidazione del terreno, i valori dei cedimenti misurati in superficie durante la realizzazione delle due gallerie di piedritto non hanno mai superato gli 8 + 10 mm su entrambe le canne (fig. 14). Per quanto riguarda, invece, l'estrusione del fronte, essa è risultata contenuta, nei passaggi più delicati, mediamente entro il centimetro, a fronte dei due considerati ammissibili. A questo scopo, fondamentale è stato l'effetto del consolidamento del nucleo con elementi strutturali di vetroresina. Lo dimostra il fatto che l'estrusione misurata aumentava proporzionalmente al decrescere, in seguito all'avanzamento, della lunghezza residua degli elementi di vetroresina inseriti nel nucleo (vedi figg. 13 e 15).

**MONITORAGGIO GALLERIA DI STAZIONE
ANDAMENTO CEDIMENTI TOTALI IN CORRISPONDENZA AL FABBRICATO "G"**



▲ FIG. 14

5.2 Il monitoraggio durante lo scavo della calotta e dell'arco rovescio della galleria di stazione

Il progetto di monitoraggio della galleria di stazione prevedeva l'esecuzione di:

- misure d'estrusione topografiche (a fronte fermo) e mediante *sliding micro-*

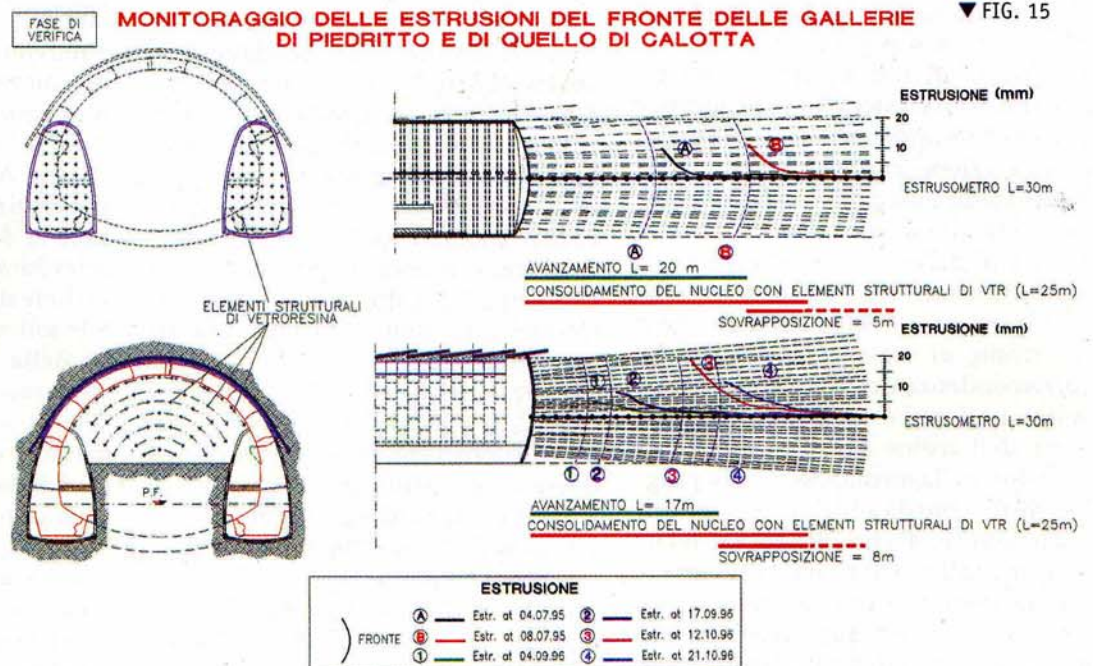
metre di 30 m di lunghezza installati sul fronte;

- misure assestometriche incrementali e inclinometriche per valutare gli spostamenti del terreno in profondità;
- misure piezometriche per controllare le variazioni di livello delle falde.

Contemporaneamente si è proceduto al controllo delle subsidenze e dell'in-

MONITORAGGIO DELLE ESTRUSIONI DEL FRONTE DELLE GALLERIE DI PIEDRITTO E DI QUELLO DI CALOTTA

▼ FIG. 15



MONITORAGGIO GALLERIA DI STAZIONE

SEZIONE LONGITUDINALE ASSE STAZIONE

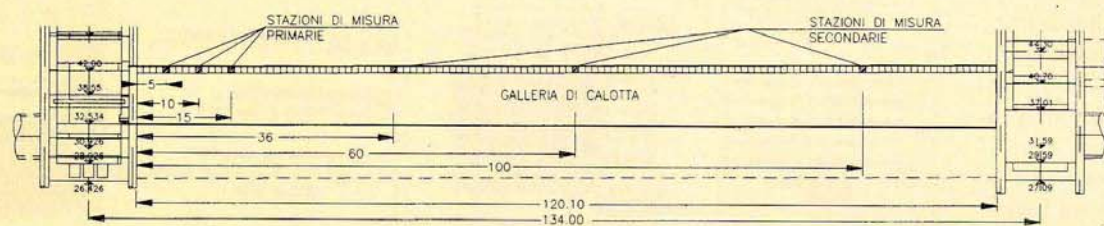
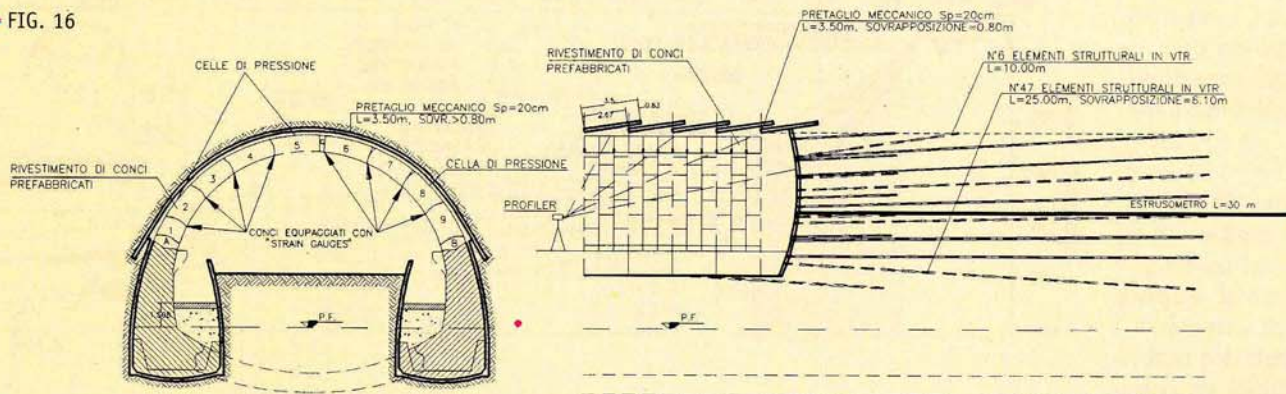


FIG. 16



tegrità dei fabbricati soprastanti. Le misure eseguite mostrano che (figg. 14 e 15):

- le estrusioni cumulative si sono mantenute mediamente su valori di 10÷15 mm, in funzione della lunghezza residua del consolidamento del nucleo di terreno al fronte, dell'andamento della stratigrafia del terreno soprastante e delle caratteristiche geotecniche locali del materiale scavato;

- la fascia di terreno interessata da movimenti si è estesa, in verticale, per circa 3+4 m sopra la calotta della galleria di stazione, con movimenti massimi di 15÷20 mm durante il passaggio del fronte di scavo;

- il bacino dei cedimenti in superficie è assai contenuto. Questi iniziavano a verificarsi circa 10 m prima dell'arrivo del fronte di scavo. I movimenti in corrispondenza dei fabbricati sono risultati uniformi e conformi alle previsioni, dell'ordine di 6÷7 mm. I valori maggiori della media, osservati a prog. 25 ÷ 40 m, sono da addebitarsi a residui del fenomeno di consolidazione dei livelli delle alluvioni recenti. Dall'analisi delle deformazioni misurate in galleria, i cedimenti in superficie sembrano correlati alle estrusioni. Infatti, dove

queste sono state maggiori anche i cedimenti sono risultati più importanti.

Tra gli scopi del monitoraggio rientrava anche il "collaudo" del sistema costruttivo adottato, essendo questo assolutamente nuovo e all'avanguardia nel campo delle opere in sotterraneo. A tal fine, si sono eseguite misure di convergenza del guscio di pretaglio e misure di deformazione e di sollecitazione della volta di conci prefabbricati mediante la messa in opera di (fig. 16):

- 3 stazioni primarie (ubicata a 5, 10 e 15 m di distanza dal Pozzo Valle Aurelia), ciascuna composta da:
 - 3 "strain gauges" a corda vibrante per concio, montati sui nove conci standard, per conoscere lo stato di sollecitazione nella struttura e le modalità di trasmissione della sollecitazione di compressione;

- 3 celle di pressione a olio montate sui conci 2, 5, 8 all'estradosso della volta, per misurare le pressioni trasmesse tra il terreno e la struttura.

- 3 stazioni secondarie (ubicata a 36, 60 e 90 m di distanza dallo stesso pozzo), ciascuna composta da:

- 3 "strain gauges" a corda vibrante, montati sui conci 2, 5, 8 della volta attiva;

- 3 celle di pressione a olio, montate sui conci 2, 5, 8.

- targets disposti sui conci per valutare le variazioni di posizione di questi mediante misure laser.

I risultati forniti da questa strumentazione mostrano:

- valori massimi di abbassamento del guscio di pretaglio dell'ordine di 1÷1,5 mm;

- movimenti della volta, in fase di prima compressione, quasi esclusivamente orizzontali e variabili tra un minimo di qualche millimetro a un massimo di 20 mm. All'allontanamento del fronte il rivestimento ha assestamenti inferiori ai 5 mm (sia verticalmente che orizzontalmente verso il centro della sezione di scavo);

- le sollecitazioni di trazione all'interno della volta di conci prefabbricati risultano nulle già dopo la prima precompressione e permangono eventualmente in misura minima solo in corrispondenza del piedritto (fig. 17).

Riguardo alla fase di scavo dell'arco rovescio, vengono misurati gli spostamenti verticali e orizzontali subiti dai piedritti. Dopo lo scavo dei primi campioni, rispettivamente di 7 e di 5 m di lunghezza, si sono registrati valori del-

l'ordine del millimetro, inferiori a quelli calcolati. Non si sono osservate variazioni significative nelle altre grandezze monitorate (cedimenti in superficie, livello della falda, ecc.).

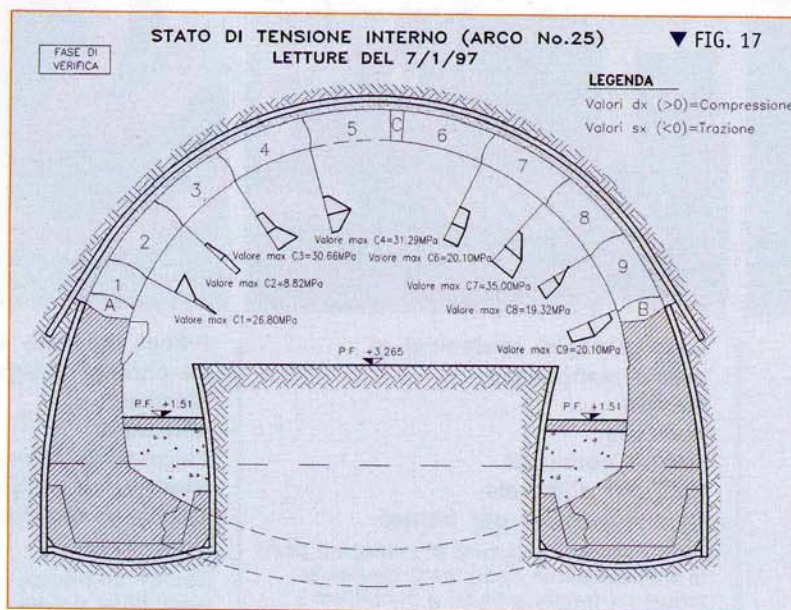
6. Conclusioni

Si sono illustrate le problematiche progettuali e costruttive della Stazione sotterranea "Baldo degli Ubaldi", attualmente in fase di finitura per il prolungamento della linea A della metropolitana di Roma. Si tratta di una grande galleria a volta unica di 21,5 m di luce per 16 d'altezza, da scavare a circa 25 m di profondità in condizioni tenso-deformative difficili, in prossimità di importanti edifici civili e sotto vincoli particolarmente restrittivi.

Per realizzarla si è progettato un nuovo sistema costruttivo, che coniuga il preconsolidamento del nucleo d'avanzamento con elementi strutturali di vetroresina e la tecnologia del pretaglio meccanico (per la prima volta al mondo applicata su una luce di 21,5 m) con il principio della "volta attiva", in modo da conseguire l'attivazione del rivestimento definitivo della galleria a meno di 3 m di distanza dal fronte, riducendo enormemente ogni rischio di cedimenti in superficie. I lavori per le opere civili, iniziati alla fine del 1992, sono oramai terminati: il sistema ha evidenziato un eccellente funzionamento, avendo permesso di tenere, sino a oggi, produzioni superiori alla media per questo genere di opere e di terreni scavati. I cedimenti in superficie, se si esclude quello avvenuto per consolidazione del terreno presso il Pozzo Valle Aurelia e prontamente contenuto, sono risultati assai ridotti e inferiori a quelli previsti dal calcolo.

Bibliografia

- [1] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Nouvelles orientations pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Etudes et experiences sur le preconfinement de la cavite et la preconsolidation du noyau au front", Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble - Parigi 7-10 Febbraio 1989
- [2] LUNARDI P. et al., "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
- [3] FOCARACCI A., "Interventi conservativi: aspetti riguardanti l'Impresa specializzata", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20



Marzo 1991

- [4] ARSENA F.P., FOCARACCI A., LUNARDI P., VOLPE A., "La prima applicazione in Italia del pretaglio meccanico", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991
- [5] LUNARDI P., "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991
- [6] MASSAROG., LUNARDI P., "Costruire presto e bene", Ingegneria ferroviaria, settembre 1991
- [7] LUNARDI P., FOCARACCI A., GIORGI P., PAPACELLA A., "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", Convegno Internazionale su "Towards New Worlds in Tunneling" - Acapulco 16-20 Maggio 1992
- [8] LUNARDI P., FOCARACCI A., GRANATA R., MONGILARDI E., "Shotcreting applied to shell construction in the precutting tunnelling method", Convegno Interna-

zionale su "Towards New Worlds in Tunneling" - Acapulco 16-20 Maggio 1992

- [9] LUNARDI P., FOCARACCI A., "Tunnelling in soil: design, construction materials and monitoring", Seminario Russo-Italiano - Central Institute for Advanced Training of Construction Engineers (TSMIPKS), Mosca, 11 Marzo 1993
- [10] LUNARDI P., "Fibre-glass tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils", SAIE: Seminar on "The application of fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering" - Bologna, 22 Ottobre 1993
- [11] LUNARDI P., "Evolution des techniques de creusement en terrain meuble", Colloque chez le "Comité Marocain des Grands Barrages" - Rabat, 30 settembre 1993
- [12] LUNARDI P., "La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble: etudes et experiences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposium international "Renforcement des sols: experimentations en vraie grandeur des années 80", Parigi, 18 novembre 1993
- [13] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte prima: Presostegno e precontenimento", Quarry and Construction, marzo 1994
- [14] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Il metodo del pretaglio, I treni, Agosto 1994
- [15] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Pianificazione tecnico-economica delle opere in sotterraneo mediante l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli", Costruzioni, Settembre 1994
- [16] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte seconda: Ruolo e risultati della ricerca sperimentale", Quarry and Construction, marzo 1995
- [17] LUNARDI P., "L'importanza del precontenimento del cavo in relazione ai nuovi orientamenti in tema di progetto e costruzione di gallerie", Gallerie e grandi opere in sotterraneo, n. 45 anno 1995
- [18] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli" - Parte terza: Proposta del nuovo approccio. Quarry and Construction, aprile 1996
- [19] LUNARDI P., "Avanza la galleria meccanica", Le Strade, maggio 1996
- [20] LUNARDI P., "L'influenza della rigidità del nucleo d'avanzamento sulla sicurezza degli scavi in galleria", Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 52 anno 1997
- [21] LUNARDI P., "Usages du sous-sol urbain en Italie: confrontation de deux cas significatifs: - Ligne ferroviaire souterraine de Milan: Stazione "Venezia" (technique de l'arc cellulaire); - Métro de Rome: Stazione "Baldo degli Ubaldi" (technique du prédécoupage mécanique). Atti delle Journées d'Étude "La ville souterraine 2" - Paris, 19-20 marzo 1997.