

INTERAZIONE TERRENO STRUTTURA NELLE GALLERIE DELLA METROPOLITANA DI CARACAS

Gianfranco PERRI, professore di Meccanica delle Rocce
nell'Università Centrale del Venezuela in Caracas

RIASSUNTO: Nella nota é presentato un breve resoconto sugli aspetti geotopografici della città di Caracas e si descrive la struttura attuale, in esecuzione ed in progetto, della Metropolitana di Caracas, indicandone le tipologie ed i metodi costruttivi impiegati. Con piú dettaglio, si descrive la problematica relativa alla costruzione delle gallerie gemelle, eseguite con scudo e scavo a piena sezione e con l'utilizzazione di un anello di rivestimento prefabbricato in conci di cemento armato. Infine si propone la adozione di indici di efficienza del processo costruttivo, stimati sulla base di rilevamenti in situ eseguiti con apposita strumentazione geotecnica in tre distinte sezioni durante la costruzione delle gallerie ed interpretati numericamente mediante un modello ad elementi finiti.

1. CARACAS

La città di Caracas si estende nella valle omonima costituita da una depressione lunga e stretta attraversata in tutta la sua lunghezza, da ovest ad est, dal fiume Guaire. I due estremi: Petare ad est e Catia ad ovest, distano approssimativamente 25 Km, mentre la massima larghezza raggiunge scarsamente i 4 Km in direzione nord sud, e l'altezza media del fondovalle é di circa 900 m sul livello del mare, presente immediatamente al nord e separato dalla valle solamente dalla imponente nonché stretta catena montagnosa della Sierra dell'Avila che si eleva a 2640 m sul livello del mare, sovrastando la città.

La valle si originó probabilmente come conseguenza indiretta del sistema di importanti faglie presenti, con direzione est ovest, su tutto il versante sud dell'Avila. Da questo discendono, verso sud, numerosi corsi torrentizi che intagliano profonde e strette gole. Sono presenti inoltre numerosi coni alluvionali pedemontani, alcuni dei quali si estendono verso la valle e

si confondono gradualmente con i depositi alluvionali del Guaire.

A sud la delimitazione della valle é meno netta, con la presenza di un rilievo minore di tipo collinare, dai cui versanti scendono verso il Guaire affluenti che attualmente tagliano i propri sedimenti alluvionali.

Le rocce che costituiscono i rilievi della regione sono preterziarie, sottoposte ad un intenso metamorfismo termodinamico ed alterate in scisti micacei calcarei e grafitosi ed, in grado minore, in gneiss ed anfiboliti. Tutti gli affioramenti e gli orizzonti subsuperficiali, manifestano una meteorizzazione intensa che raggiunge frequentemente il risultato della trasformazione della roccia originale in terreno residuale.

Il manto dei terreni che ricopre la valle, proviene prevalentemente dai rilievi adiacenti e, solo in minor grado, dalla sedimentazione alluvionale di origine piú remota proveniente dal Guaire e dai suoi affluenti. Si tratta di depositi lenticolari generalmente discontinui

ed estremamente variabili nelle dimensioni dei componenti che possono raggiungere, isolatamente, quelle di blocchi decimetrici. Ciò è conseguenza diretta della diversità estrema nelle caratteristiche del asporto in quanto a lunghezze, carichi e pendenze dei corsi contribuenti.

In fine, per quanto riguarda l'acqua di falda, il gradiente generale segue la pendenza ovest est del fondovalle. Però localmente questo è modificato capricciosamente da un gran numero di fattori circostanziali che vanno, dalla presenza dei corsi trasversali superficiali e subsuperficiali provenienti dalle falde montuose, alla esistenza di serbatoi naturali di acqua sotterranea, in sacche isolate dal casuale intercalarsi di lenti e strati di terreni permeabili ed impermeabili. In ogni caso si tratta in generale di falde freatiche subsuperficiali, con profondità raramente superiori alla decina di metri e sensibilmente variabili con l'alternarsi delle stagioni climatiche.

2. LA METROPOLITANA

Nel 1968, si iniziò il progetto della Metropolitana di Caracas e la sua costruzione si avviò, nel 1972, con un settore in struttura elevata per poi passare allo scavo delle prime gallerie nel 1976.

La rete basica della Metropolitana di Caracas è formata da tre linee principali: La Linea 1, che si sviluppa sull'asse est ovest del fondovalle ed in buona parte parallelamente al fiume Guaire, con 23 stazioni su una lunghezza di circa 21 Km. Essa è completa dal punto di vista delle opere civili ed è in servizio su 19 stazioni; circa l'ottanta per cento del percorso è in sotterraneo. La Linea 2, che si sviluppa dal sud ovest al centro, dove converge sulla Linea 1, è lunga approssimativamente 19 Km con 13 stazioni ed è in servizio su tutta la sua estensione; circa il trenta per cento del percorso è in sotterraneo. La Linea 3, che si sviluppa quasi parallelamente alla Linea 2 e

converge da sud sulla Linea 1, sarà lunga circa 20 Km con 14 stazioni; attualmente è completamente progettata ed in appalto; circa il 70% del suo percorso è previsto in sotterraneo.

Oltre la metà del percorso sotterraneo si sviluppa in gallerie gemelle con sezioni circolari di raggio interno di 2.63 m e raggio esterno di 2.85 m, costruite mediante l'utilizzazione di macchine di scavo a sezione integrale tipo "scudo", disposte per il montaggio continuo del rivestimento costituito da anelli in conci prefabbricati in calcestruzzo armato. Le coperture medie sono sui 15 m, variabili tra un minimo di 5-6 m ed un massimo di 25-30 m.

3. INTERAZIONE TERRENO STRUTTURA

Durante il processo di avanzamento dello scavo ed immediata collocazione dell'anello del rivestimento, si induce una ridistribuzione degli sforzi preesistenti nel terreno, con deformazioni nel fronte e nelle pareti del vuoto scavato.

L'entità della ridistribuzione degli sforzi e delle deformazioni è funzione del diametro delle gallerie, della separazione trasversale tra le due gallerie gemelle, della posizione della sezione scavata rispetto alla superficie del terreno, delle caratteristiche geomeccaniche di quest'ultimo e finalmente, e principalmente, del processo costruttivo seguito.

In particolare, la grandezza delle deformazioni del terreno associate al processo di scavo delle gallerie, dipende direttamente, in gran parte dall'accortezza mantenuta nell'evitare perdite di terreno nel fronte di scavo, nonché nella coda dello scudo.

Inoltre, quando lo spazio vuoto che si produce inevitabilmente tra il terreno e l'anello del rivestimento appena estruso dalla coda dello scudo, non viene riempito in modo immediato e completo, impiegando a tal fine una boiaccia di cemento bentonite e sabbia, si

producono deformazioni addizionali nella massa del terreno adiacente alla galleria appena scavata.

In effetti, durante il tempo in cui lo spazio anulare rimane vuoto fino al suo riempimento con l'iniezione di boiaccia), si vanno producendo deformazioni nel terreno circondante l'anello, e tali deformazioni crescono proporzionalmente col tempo a sua volta conseguenza dell'inefficienza nel processo costruttivo.

Specialmente questa tappa costruttiva é la fase piú delicata in tutto il processo di scavo e rivestimento delle gallerie eseguito con scudo, e diventa molto difficile realizzare una valutazione diretta della efficienza dell'iniezione di riempimento dato che non é facile misurare in forma pratica ed economica, il grado di otturazione ottenuto e la

rigidezza risultante dello spazio anulare iniettato.

E' pertanto evidente come in fase di progetto sia difficile la previsione delle condizioni geostatiche finali che si stabiliranno nelle gallerie, specificamente dei carichi che graveranno sull'anello del rivestimento con le corrispondenti deformazioni in sotterraneo ed in superficie.

Da queste considerazioni deriva l'idea di proporre indici d'efficienza per la valutazione sia della qualità del processo costruttivo, sia dell'intensità dei carichi sul rivestimento e delle deformazioni, connesse, come detto, al processo costruttivo stesso.

4. MISURAZIONI IN SITU E SIMULAZIONE NUMERICA

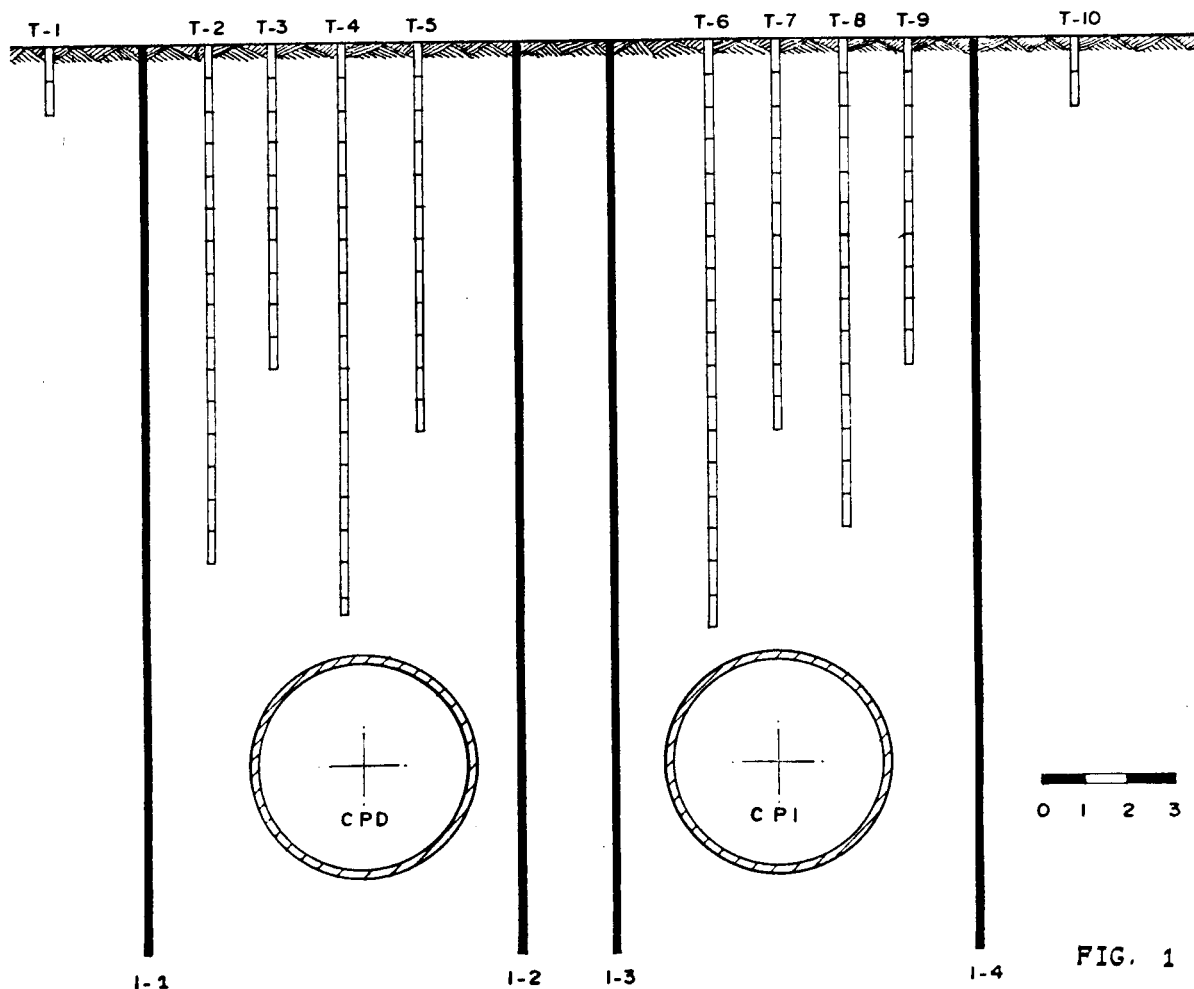


FIG. 1

Con l'obiettivo finale di stabilire e quantificare tali indici d'efficienza, si sono strumentate tre sezioni rappresentative dello scavo, relative alla Linea 1 della Metropolitana di Caracas, mediante la utilizzazione di inclinometri ed stensimetri verticali, secondo lo schema geometrico indicato nella figura 1 (Roberto Centeno e Gianfranco Perri, 1987), misurando così le deformazioni del terreno intorno ad ogni scavo e durante tutte le principali fasi del processo costruttivo relativo alle due gallerie gemelle nelle tre sezioni prescelte.

Previamente e contemporaneamente alla installazione degli strumenti di misura, si sono caratterizzate geomeccanicamente le formazioni presenti nelle tre sezioni strumentate, mediante una dettagliata esplorazione geognostica del sottosuolo completata da prove geotecniche in situ ed in laboratorio. Si è così

ottenuto un modello geotecnico sufficientemente affidabile nel quale per ogni strato di terreno incontrato, si sono determinati i parametri geomeccanici di deformabilità.

Una volta ottenuti tutti i dati relativi alle deformazioni del terreno, per ognuna delle tre sezioni strumentate, ed in corrispondenza delle già citate principali fasi rappresentative del processo costruttivo (dal primo avvicinarsi alla sezione strumentata del fronte di scavo della prima galleria, all'allontanarsi della coda dello scudo della seconda galleria e completo stabilizzarsi di ogni movimento superficiale e subsuperficiale del terreno), si è proceduto alla interpretazione dei dati rilevati, mediante simulazione numerica di tutto il processo con un modello ad elementi finiti (figura 2).

Si tratta di un modello piano ad

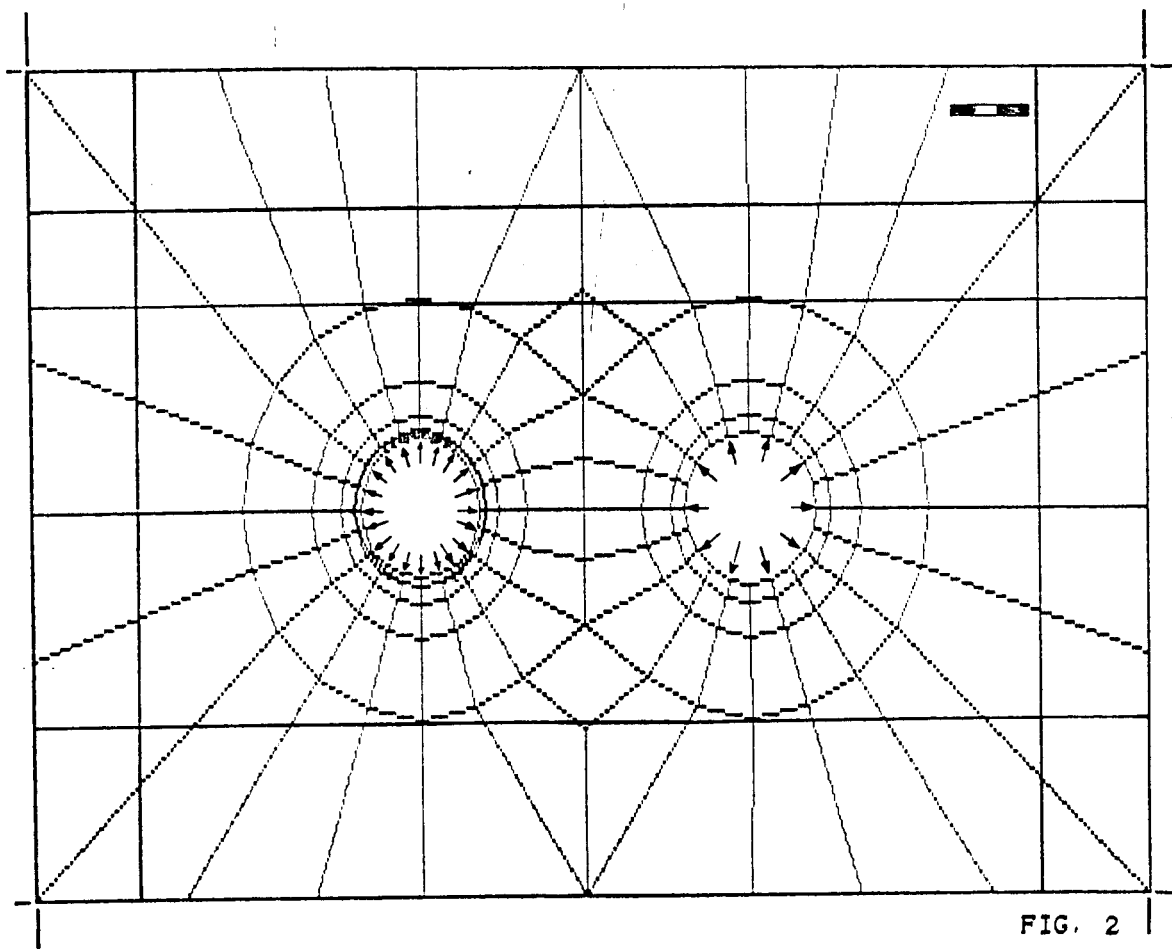


FIG. 2

elementi isoparametrici quadrangolari che permette di simulare un comportamento elastoplastico del terreno secondo il criterio di Mohr Coulomb.

La simulazione della tridimensionalità del problema in prossimità del fronte di scavo viene riprodotta mediante l'artificio di ridurre gradualmente la pressione interna sul perimetro dello scavo: dalle condizioni iniziali di stato di sollecitazione naturale, alle condizioni finali che simulano la pressione definitiva stabilitasi sull'anello del rivestimento.

Il procedimento descritto permette associare ad ogni fase costruttiva simulata numericamente, un valore della pressione interna sul perimetro della galleria, esprimendolo come percentuale del valore iniziale corrispondente allo stato di sollecitazione naturale.

Praticamente il processo numerico di calibrazione consiste nell'effettuare calcoli successivi in cui si fa gradualmente diminuire la

pressione interna sul perimetro della galleria in costruzione, fino a raggiungere una accettabile corrispondenza tra i valori delle deformazioni misurate in situ e quelli ottenuti numericamente dal calcolo, per ognuna delle fasi costruttive simulate per la prima e la seconda galleria, nelle tre sezioni strumentate.

Concretamente, le fasi costruttive simulate per ognuna delle due gallerie gemelle, sono le seguenti cinque (figura 3):

- a) Fronte dello scudo abbastanza lontano dalla sezione strumentata: condizioni naturali nel terreno (Fase 1).
- b) Approssimarsi del fronte dello scudo verso la sezione strumentata, con inizio della decompressione del terreno (Fase 2).
- c) Fronte dello scudo coincidente con la sezione strumentata, con aumento della decompressione e degli assestamenti del terreno

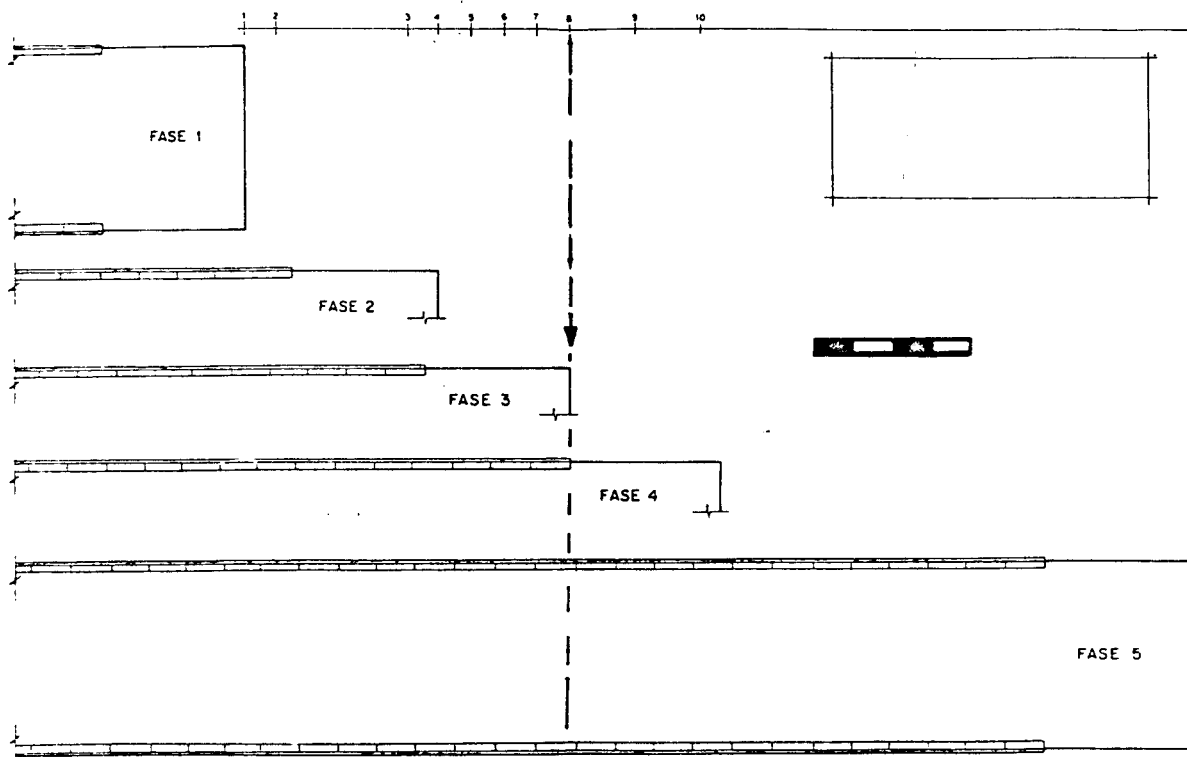


FIG. 3

(Fase 3).

- d) Passaggio della coda dello scudo nella sezione strumentata, con espulsione dell'anello di rivestimento e creazione brusca di uno spazio anulare vuoto tra il rivestimento ed il terreno: si producono deformazioni significative in prossimità della galleria e nella superficie (Fase 4).
- e) Allontanamento della coda dello scudo dalla sezione strumentata ed iniezione nello spazio anulare con un aumento delle deformazioni prima della stabilizzazione finale (Fase 5).

In alternativa, la ultima fase, ed in particolare quella corrispondente alla iniezione, è simulata numericamente mediante una riduzione della rigidità dell'anello da riempire, riprodotto fisicamente nel modello per una sola delle gallerie, partendo da un valore di riferimento in cui la rigidità assegnata è quella del terreno preesistente ed esprimendo la successivamente come percentuale

di tale valore iniziale fino a raggiungere nuovamente una accettabile coincidenza tra le deformazioni finali misurate e le deformazioni calcolate.

5. DATI RISULTATI ED INDICI

Le caratteristiche basiche dei terreni in corrispondenza delle tre sezioni considerate, si possono così riassumere:

Terreni sedimentari densi, costituiti da materiali prevalentemente sabbiosi ed argillosi, con presenza di ghiaia in lenti ed alcuni orizzonti caratterizzati da ciottoli semiarrotondati di scisti e gneiss meteorizzati di origine alluvio-torrentizia.

I valori medi dei moduli di deformazione, ottenuti da prove pressiometriche in situ, sono dell'ordine di $E = (200-600) \text{ Kg/cm}^2$.

Il livello freatico si situa costantemente aldisopra della chiave

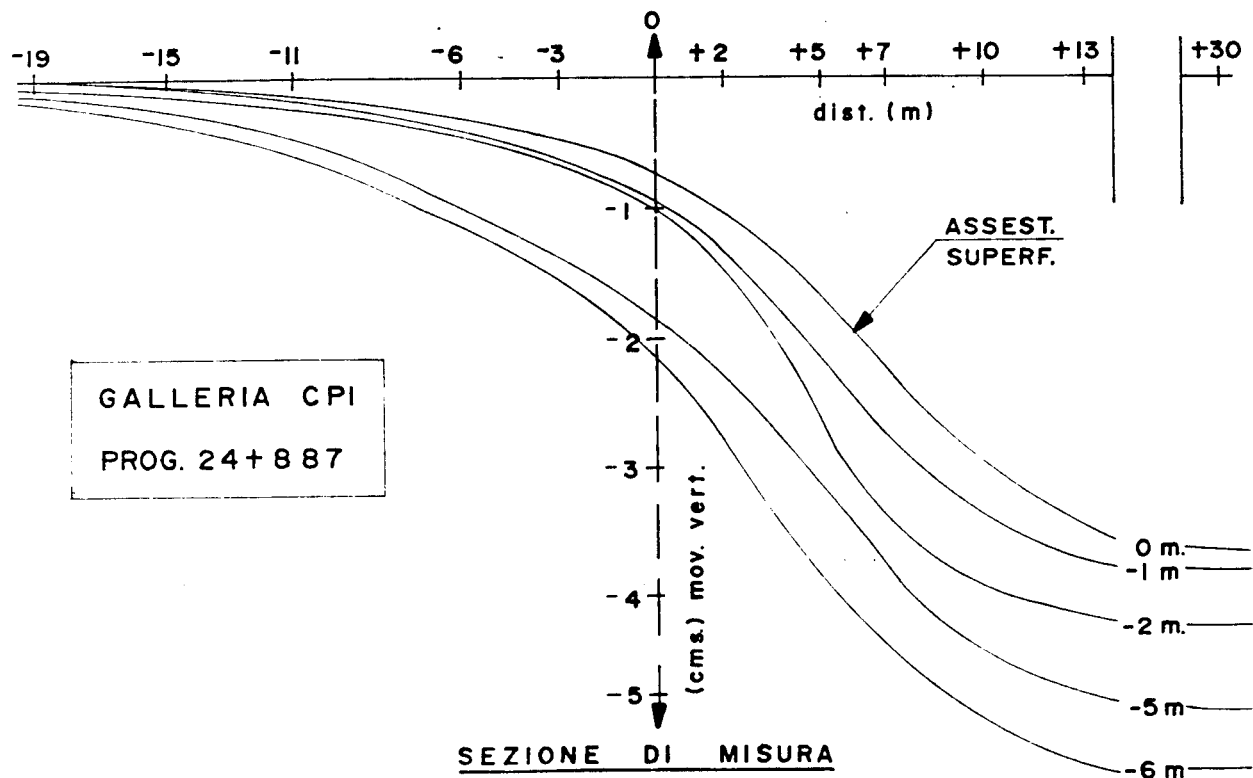


FIG. 4

delle gallerie che presentano una copertura compresa tra i 7 ed i 14 metri.

Gli assestamenti massimi rilevati in superficie, ed in corrispondenza dell'asse della prima galleria scata, si aggirano tra 2.0 cm e 3.5 cm, con un leggero aumento di tali valori a 2.5 cm e 4.5 cm con il passo della seconda galleria.

Gli assestamenti massimi rilevati in superficie, in coincidenza con l'asse della seconda galleria, sono contenuti tra 2.0 cm e 2.5 cm, rilevandosi che il vero massimo degli assestamenti si produce in un punto intermedio tra le due gallerie, con valori compresi tra 5 cm e 6 cm in superficie.

I movimenti verticali superficiali misurati sull'asse della galleria in esecuzione, cominciano a manifestarsi a una distanza compresa tra 12 m e 10 m (4 R) dal fronte di scavo e si stabilizzano quando la coda dello scudo raggiunge una distanza dagli 8 m ai 15 m, dalla sezione dei rilevamenti (figura 4).

L'efficienza globale del processo costruttivo, misurata con la relazione percentuale tra il valore della pressione interna finale di equilibrio (agente sul rivestimento della galleria) ed il valore iniziale della pressione naturale del terreno, risulta di : 52 % - 60 % e 55 %, rispettivamente per le tre sezioni analizzate, al passaggio della prima galleria, e di : 54 % - 58 % e 52 %, per lo scavo della seconda galleria.

A tale proposito, se si osserva che in corrispondenza della fase 3 (fronte dello scavo coincidente con la sezione dei rilevamenti) le pressioni d'equilibrio ottenute indicano una riduzione di circa il 20 % rispetto ai valori iniziali, e considerando che tale livello di decompressione é praticamente inevitabile in quanto prodotto dalla presenza stessa del fronte, potrebbe concludersi che l'efficienza del processo costruttivo risulta piú correttamente valutata sulla base delle deformazioni addizionali che si producono a partire dalla fase 3.

In questo senso, l'efficienza del

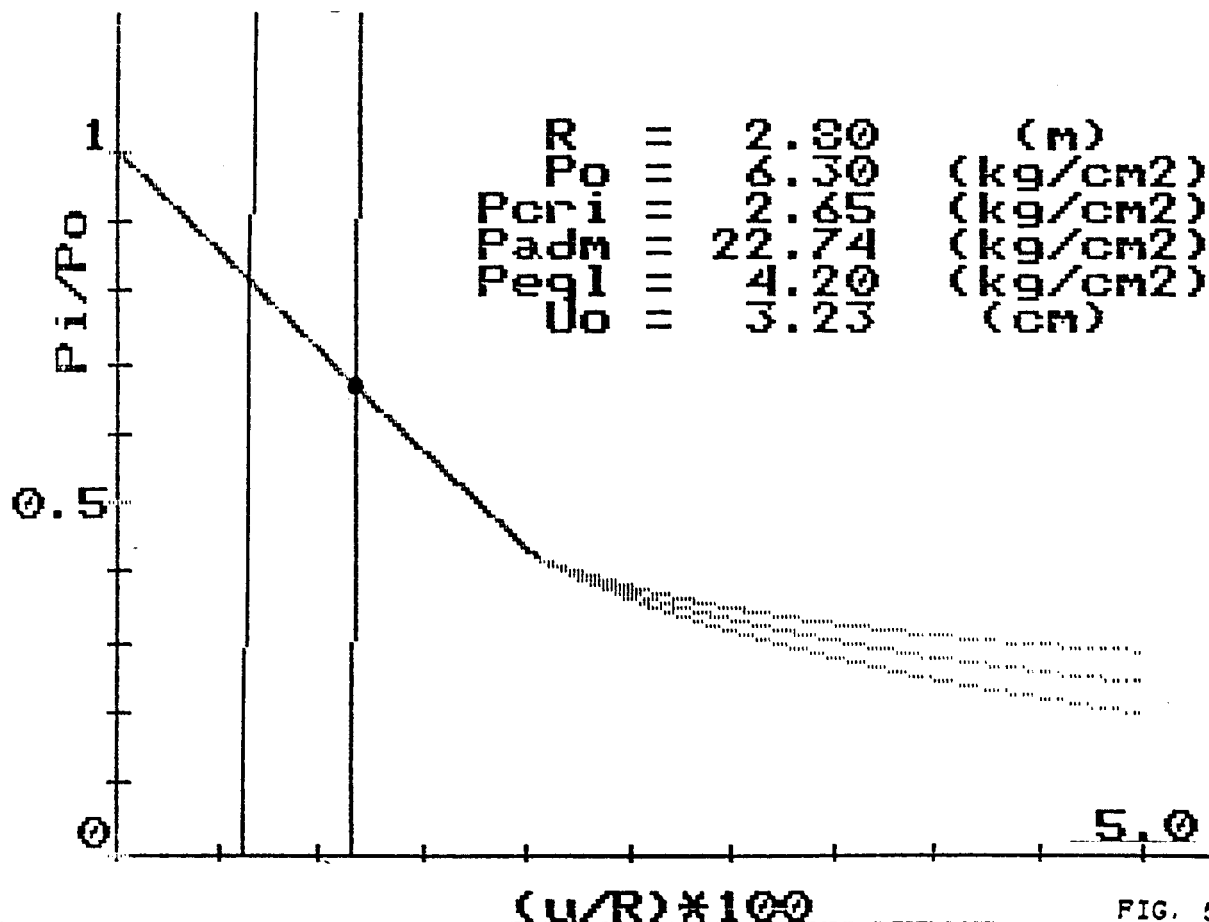


FIG. 5

processo costruttivo, misurata dal valore percentuale della pressione interna di equilibrio finale relativo al valore della pressione interna ottenuta per la fase 3, risulta per i 6 casi analizzati di:
5 % -75 % -70 % -68 % -72 % e 65 %.

D'altra parte, l'efficienza della fase del riempimento dell'anello vuoto mediante iniezioni di boiaccia tra il rivestimento ed il terreno, misurata con il valore percentuale della rigidità di tale anello rispetto a quella del terreno naturale, risulta di: 30 % -34 % e 31 %, rispettivamente nei tre casi considerati per la prima galleria di ogni sezione modellata.

6. CONCLUSIONI

Dall'analisi esposta si conferma che nella costruzione delle gallerie metropolitane scavate a piena sezione utilizzando rivestimenti prefabbricati installati alla coda dello scudo con applicazione della stessa spinta applicata al fronte di avanzamento, una delle fasi più critiche di tutto il processo costruttivo è quella in cui il vuoto anulare che si crea inevitabilmente tra il rivestimento appena posto in opera ed il terreno appena scoperto

dall'avanzare dello scudo, viene riempito per evitare l'accentuarsi delle deformazioni del terreno intorno allo scavo.

In effetti la buona qualità della costruzione ed il controllo degli assestamenti in superficie dipendono in gran parte dall'efficacia ed immediatezza di tale riempimento, mentre la rigidità relativa, estremamente alta tra il rivestimento ed il terreno, indica la trascurabile trascurabile contribuzione della deformazione dell'anello sul punto d'equilibrio finale, ("Peql" nella figura 5): lo spazio critico "Uo", è la somma dello spostamento "U3" che si produce inevitabilmente nel fronte dello scavo e dello spostamento addizionale "U5" che si produce durante la iniezione del vuoto anulare fino all'entrata in carico del rivestimento (Gianfranco Perri, 1988).

In relazione a ciò si ritiene che gli indici di efficienza costruttiva proposti in questo lavoro, i quali rivestono evidentemente un carattere relativo al contesto geotecnico e costruttivo in riferimento, possono essere così utilizzati per la previsione del comportamento degli scavi futuri mediante la loro simulazione su modelli numerici od eventualmente analitici.

BIBLIOGRAFIA

PERRI G. e CENTENO R. "Numerical analysis of interaccion. Caracas subway". VIII PCSMF, vol 2, p.223-234, 16-21 agosto 1987. Cartagena, Colombia.

PERRI GIANFRANCO "Consideraciones acerca de la interacción terreno-estructura en los tuneles". X Seminario Venezolano de Geotecnia, p.223-234, 17-21 ottobre 1988. Caracas, Venezuela.