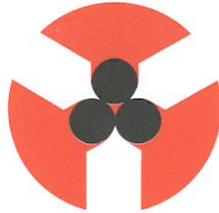


SOCIETÀ ITALIANA GALLERIE



**IL CONSOLIDAMENTO DEL SUOLO E DELLE ROCCE
NELLE REALIZZAZIONI IN SOTTERRANEO**

***SOIL AND ROCK
IMPROVEMENT IN UNDERGROUND WORKS***

Milano, 18-20 Marzo 1991

U. Amagliani, A. Balossi Restelli

**MOVIMENTI DI UN GRATTACIELO INTERESSATO DALLO SCAVO DI UNA GROSSA
STAZIONE METROPOLITANA NELLA CITTÀ DI MILANO**

*MOVEMENTS OF A TALL BUILDING CONNECTED WITH THE EXCAVATION
OF A WIDE UNDERGROUND STATION*

ESTRATTO/REPRINT

**ATTI
PROCEEDINGS**

VOL. I

MOVIMENTI DI UN GRATTACIELO INTERESSATO DALLO SCAVO DI UNA GROSSA STAZIONE METROPOLITANA NELLA CITTÀ DI MILANO

MOVEMENTS OF A TALL BUILDING CONNECTED WITH THE EXCAVATION OF A WIDE UNDERGROUND STATION

Ugo Amagliani, Metropolitana Milanese S.p.A., Milano, Italia
Achille Balossi Restelli, Libero professionista, Milano, Italia

La galleria di stazione Repubblica del Passante Ferroviario di Milano interessa da vicino il terreno di fondazione del "Grattacielo di Milano". Si tratta di un edificio di 29 piani fondato su una platea di travi a graticcio. La situazione statica della fondazione si presentava prossima al limite di sicurezza per le armature all'inizio dei lavori e di conseguenza le operazioni relative alla galleria del Passante hanno dovuto essere condotte con grande cautela per non indurre ulteriori sollecitazioni. La galleria ha una larghezza di scavo di 25 m ed una altezza di 13 m. Utilizzando i risultati di una backanalysis relativa ad un tratto di galleria già scavato è stato progettato il consolidamento del terreno, calcolati gli spostamenti in corrispondenza del grattacielo e le sollecitazioni indotte nella platea, in fase di consolidamento e di scavo. I movimenti della struttura e del terreno sono stati tenuti sotto costante controllo dalla strumentazione installata (caposaldi topografici, multiassestimetri, pendolo ecc.) e si sono rivelati prossimi a quelli calcolati.

Una ulteriore backanalysis è stata effettuata allo scopo di affinare ulteriormente i parametri caratteristici del terreno consolidato.

The paper presents the experimental data and the numerical analysis of the settlement pattern of a multistorey building located in Milan, Piazza della Repubblica, caused by the excavation of a station of the underground railway connecting line (Passante Ferroviario) passing nearby.

The tunnel is 25 m wide and 13 m high and it has been excavated in successive phases: first the lateral drifts, then the crown and the invert.

Owing to the critical state of the raft foundation of the building, special care was necessary in designing the grouting treatment of the alluvial soil.

In order to foresee possible leak of the foundation and consequent additional bending moments in the raft, it was necessary to perform accurate numerical analysis.

The displacements of the foundation occurred during the works have been constantly recorded by a set of various measuring devices, such as sliding micrometers, datum points, pendulum and others.

The displacement development both of the skyscraper raft foundation and of the grouted soil around the tunnel are presented and discussed in the paper.

We point out that the observed movements are close to those predicted by the numerical analysis.

A further backanalysis of the displacement pattern was finally performed with a more sophisticated constitutive model which is able to describe the behaviour of grouted soil in a way closer to the actual behaviour.

1. Generalità

La progettazione della galleria di stazione di piazza della Repubblica del Passante Ferroviario di Milano ha richiesto uno studio molto particolareggiato reso necessario a causa dell'ampiezza della galleria (25 m di larghezza di scavo) ed alla sua prossimità alle fondazioni di un grattacielo di 29 piani.

Il tratto di galleria oggetto di questa memoria fa parte del lotto 1PB del Passante Ferroviario dalla progr. 7225,042 alla progr. 7285,78.

L'obiettivo era quello di realizzare il consolidamento del terreno e lo scavo della galleria rispettando dei valori massimi di sollevamento e cedimento del grattacielo; oltre questi valori da una parte sarebbe stato superato il limite ammissibile per il tasso di lavoro delle armature della platea di fondazione, dall'altra parte sarebbe stata compromessa la stabilità dell'immobile.

Sulla base dell'esperienza acquisita nella costruzione del primo tratto di galleria di stazione, che non interessava ancora il grattacielo (da progr. 7190,82 a progr. 7225,042), si è potuto risalire, tramite una back-analysis, ai valori dei moduli elastici conseguiti con il trattamento di consolidamento nelle diverse stratificazioni di terreno; questi valori sono stati poi utilizzati nelle successive analisi effettuate per la progettazione del consolidamento nella zona del grattacielo.

Le suddette analisi hanno evidenziato che non sarebbe stato sufficiente affinare il progetto realizzato nella zona lontana dal grattacielo (mantenendo la forma dell'arco consolidato), ma che invece sarebbe stato necessario estendere la zona di terreno trattato al di sotto delle fondazioni di questo particolare edificio. Parallelamente alla fase di progettazione del consolidamento è stato studiato un sistema di strumentazione per il controllo delle deformazioni indotte nel terreno e negli edifici interessati dal passaggio dello scavo, con speciale riguardo al grattacielo.

La strumentazione ha consentito in particolare di tenere sotto costante controllo gli spostamenti mano mano indotti dalle diverse fasi di lavorazione.

2. Lo stato di fatto della platea del grattacielo all'origine e dopo il passaggio dello scavo della MM3

È stato condotto uno studio assai accurato riguardante l'evoluzione dello stato tensionale e deformativo all'interno sia della platea di fondazione del grattacielo che del terreno ad essa circostante.

Questo studio è risultato necessario per gli effetti indotti dagli interventi che si sono susseguiti durante i lavori relativi al lotto 5 della linea MM3, ossia prima dell'inizio delle operazioni di consolidamento necessarie per lo scavo della galleria di stazione "Repubblica".

Le analisi numeriche si sono basate su una cospicua messe di dati forniti dalla MM, relative a misurazioni effettuate durante i lavori del lotto 5 dal settembre 1984 al maggio 1988, che hanno integrato le misure eseguite sulla platea di fondazione dell'edificio durante il periodo della sua costruzione.

2.1. Lo stato deformativo iniziale

La platea di fondazione del grattacielo lungo i due lati più lunghi della torre sporge a sbalzo per circa 6 m coprendo così un'area che supera dell'80% quella propria della torre.

Questo spiega la differenza fra l'ordine di grandezza dei cedimenti delle

"ali" rispetto a quello della zona sotto la parte più alta, che la struttura presentava già in fase di inizio del suo esercizio.

L'elevato carico della torre aveva provocato durante la costruzione un affondamento più pronunciato nel centro (12-16 mm) rispetto alle estremità (6-9 mm).

La fig. n. 1 illustra due sezioni ortogonali tra di loro del grattacielo e la deformata della platea alla fine della costruzione (5/6/1954).

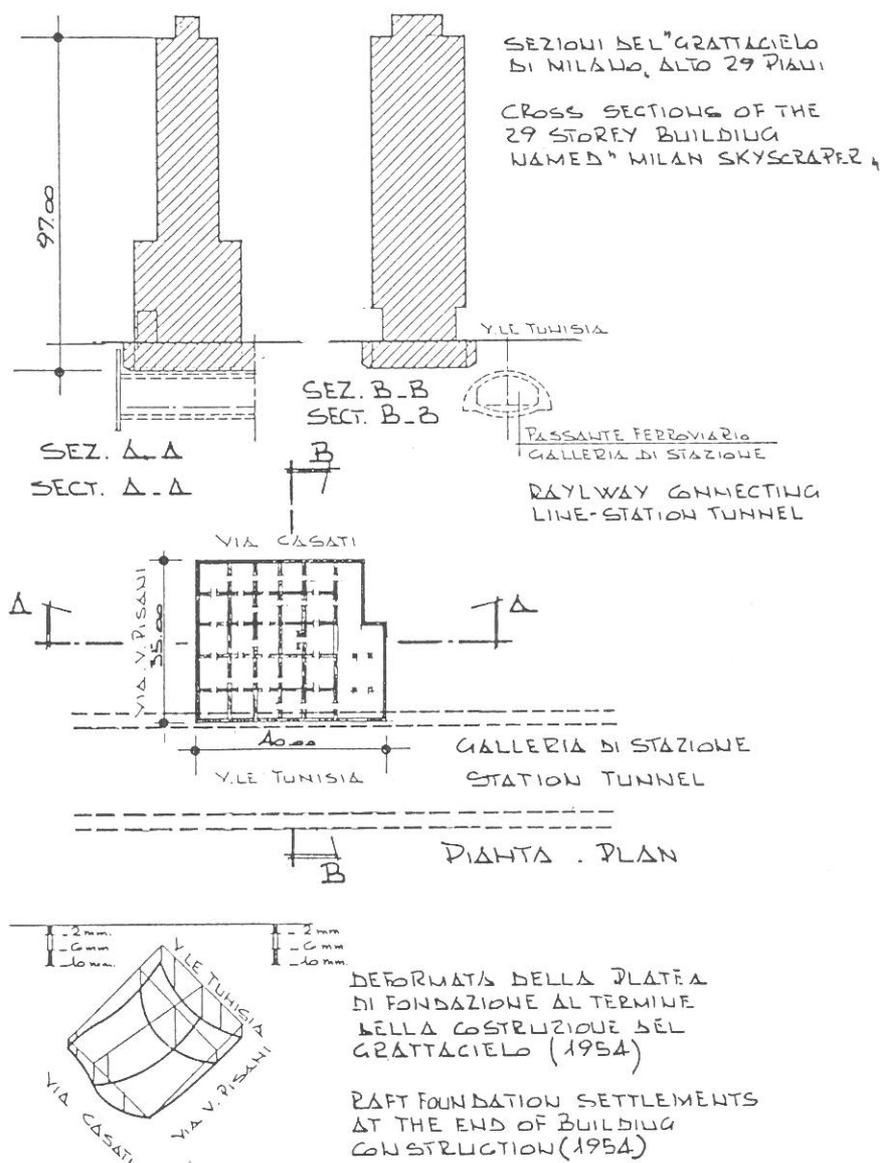


Fig. 1 - Sezioni e pianta del grattacielo con l'ubicazione della galleria di stazione del Passante. La deformata della platea al termine della costruzione dell'edificio (1954)

Layout and cross sections of the building with the Repubblica railway station location. Raft foundation settlements (1954)

2.2. Lo stato deformativo durante i lavori del lotto 5 della linea 3 della MM

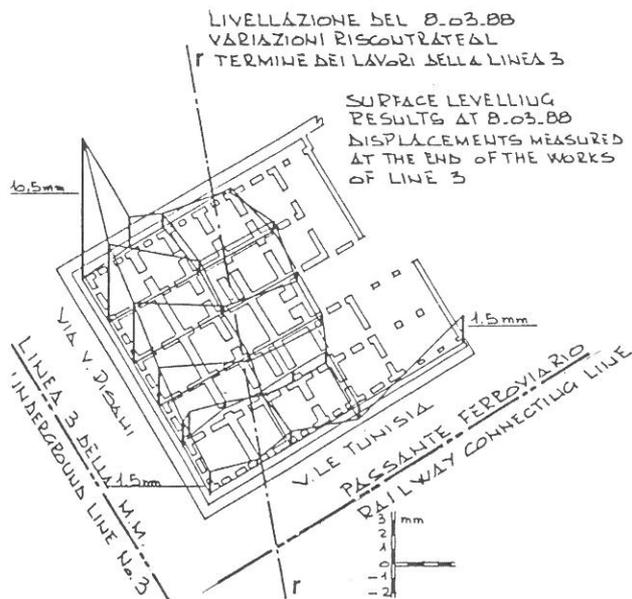
I lavori del lotto 5, lungo Via Vittor Pisani, interferenti col grattacielo

sono stati controllati in maniera attenta e continua tramite livellazioni, letture inclinometriche, estensimetriche e di convergenza.

Le deformazioni indotte dai lavori hanno coinvolto un lato del perimetro della platea e la zona centrale accentuando ancora di più il differenziale di cedimento verificatosi in fase di costruzione del grattacielo.

I lavori sono consistiti nell'esecuzione di una paratia in c.a. tirantata: la struttura del terreno al di sotto della platea del grattacielo è stata alterata dalle iniezioni cementizie preventive e dalla posa in opera delle tirantature profonde 30 m all'incirca.

L'ultima serie di misure disponibili (8/3/88) indicava un sollevamento molto pronunciato dello spigolo tra via Vittor Pisani e via Casati (10 mm circa).



Inoltre, come si può vedere in fig. 2, dove sono riportati gli spostamenti riscontrati a seguito dei lavori del lotto 5, il fronte del grattacielo di via Pisani presentava dal suddetto punto un sollevamento decrescente andando verso via Tunisia.

Si configurava dunque una situazione variata rispetto a quella di inizio lavori della linea 3, evidenziandosi una rotazione della struttura verso via Tunisia attorno alla generatrice r-r evidenziata in figura.

Fig. 2 - Deformazioni della platea provocate dai lavori della linea 3 della MM

Raft displacements after the line MM3 construction

2.3. Stati tensionali nella platea del grattacielo

Al fine di conoscere i margini di sicurezza ancora sfruttabili dei lavori del lotto 1PB del Passante è stato analizzato lo stato di sforzo della platea di fondazione del grattacielo con lo scopo di ricostruirne la storia tensionale. Le analisi numeriche sono state condotte su un modello tridimensionale ad elementi finiti della platea, che teneva in conto anche dell'interazione col terreno e della parte in elevazione della struttura.

Le analisi numeriche effettuate sulla base delle deformate della platea alla fine della sua costruzione ed a seguito dei lavori della MM3, hanno permesso di risalire allo stato tensionale corrispondente alle suddette due situazioni. Lo studio ha evidenziato la presenza di uno stato tensionale indotto che collocava il tasso di lavoro delle armature in alcuni casi prossimo al limite ammissibile (σ massimo nelle armature nella zona centrale pari a 1350 Kg/cm²).

La realizzazione del solo arco di scarico consolidato con la forma tradizionale, adottata nel corso dei lavori della prima parte della stazione, diveniva pertanto molto rischiosa in quanto avrebbe indotto degli ulteriori sollevamenti concentrati lungo il perimetro della platea, lato Viale Tunisia.

Questo fatto avrebbe portato al superamento dei limiti ammissibili per il tasso di lavoro delle armature.

La nuova progettazione è stata quindi mirata al contenimento dei sollevamenti differenziali tra lembo esterno della platea e la sua parte centrale, entro il valore di 2,5 mm, calcolato quale massimo compatibile con le tensioni ammissibili per le armature.

3. La progettazione

Alla forma geometrica definitiva del consolidamento si è giunti dopo alcuni tentativi che vengono qui di seguito illustrati.

Nella prima soluzione presa in esame, illustrata in fig. 3, era prevista l'esecuzione di due setti simmetrici di jet-grouting costituiti ognuno da due file di colonne per uno spessore complessivo di 1,2 m.

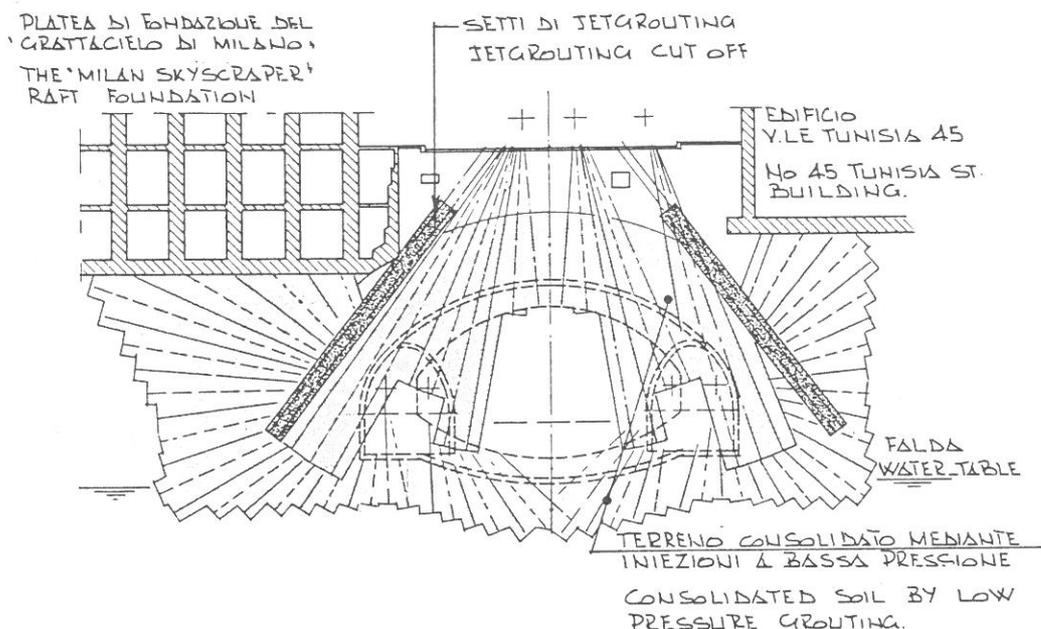


Fig. 3 - Progettazione iniziale con setti di jet-grouting
First design scheme with jet-grouting cut offs

La funzione di questi setti doveva essere quella di irrigidire ai due lati il consolidamento e di costituire una sorta di barriera protettiva nei confronti della platea riguardo alle iniezioni da eseguire nell'arco di calotta e lungo i piedritti.

Il programma di consolidamento prevedeva, oltre ai setti di jet-grouting, iniezioni tradizionali tramite tubi a manchettes eseguite sia dal piano strada sia dai cunicoli in fase successiva.

La verifica ad elementi finiti di questa prima soluzione ha portato a risultati non soddisfacenti in quanto ha evidenziato valori dei cedimenti, a fine scavo, troppo elevati per assicurare il grattacielo (vedere fig. 4).

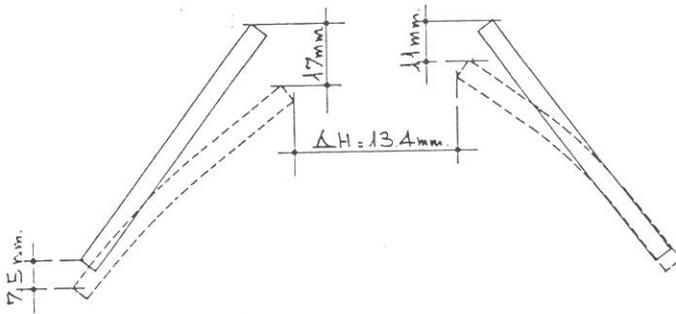


Fig. 4 - Deformata finale dei setti di jet-grouting
Jet-grouting cut off displacements at the end of excavation

E' stata quindi presa in esame una seconda soluzione, molto simile alla precedente, in cui il setto di jet-grouting, lato grattacielo, aveva uno spessore di 1,80 m ed il trattamento dall'esterno era esteso anche alla zona di ribasso dei cunicoli.

Anche in questo caso l'analisi numerica ha evidenziato dei cedimenti ancora molto elevati, pari a 11,7 mm, dello spigolo della platea lato Viale Tunisia al termine di tutte le lavorazioni.

Sembra comunque interessante evidenziare due aspetti importanti emersi dai risultati delle analisi numeriche di queste prime due soluzioni e cioè:

- i carichi specifici alla base dei setti di jetgrouting risultavano sempre molto alti, tanto da creare zone di plasticizzazione; questo fatto sta ad indicare che un importante flusso di sforzi è captato da queste porzioni di terreno molto più rigide del contorno e quindi una distribuzione non omogenea degli sforzi stessi nell'ambito del masso trattato
- le porzioni di terreno consolidato, esterne ai setti di jetgrouting, contribuivano solo in piccola parte al trasferimento dei carichi verso le zone all'esterno dell'arco principale di scarico.

I risultati scoraggianti delle prime due analisi hanno quindi nuovamente indirizzato la progettazione verso una soluzione più tradizionale basata su trattamenti di sole iniezioni a bassa pressione di miscele cementizie e Silacsol da realizzarsi attraverso tubi in plastica valvolati, inseriti ed "inguainati" nelle apposite perforazioni.

La geometria finale del consolidamento, nella zona sottostante la platea del grattacielo, è illustrata in fig. 5 dove sono anche evidenziati i moduli elastici attribuiti al terreno consolidato nelle verifiche numeriche effettuate.

I valori dei moduli, tarati sulla base di precedenti back-analysis, sono funzione sia del tipo del trattamento, sia della composizione granulometrica del terreno naturale (desunta dai sondaggi e dalle indagini eseguite secondo la metodologia dei parametri di perforazione - Pa.Pe.Ro.).

Il progetto prevedeva l'esecuzione delle iniezioni di consolidamento secondo raggere ad interasse di 1,5 m a loro volta suddivise in tre semiraggere ogni 0,5 m, questo allo scopo di rendere il trattamento omogeneo e causare la minor turbativa possibile al grattacielo.

La tempistica operativa prevedeva una prima fase di iniezioni dal piano strada per il consolidamento dell'arco di calotta, dei piedritti, dell'arco interno laterale ai cunicoli e di quasi tutto l'arco rovescio; la seconda fase, eseguita dal cunicolo lato grattacielo, per il consolidamento della zona "al largo" sotto la platea e della parte di arco rovescio non compresa nella prima fase.

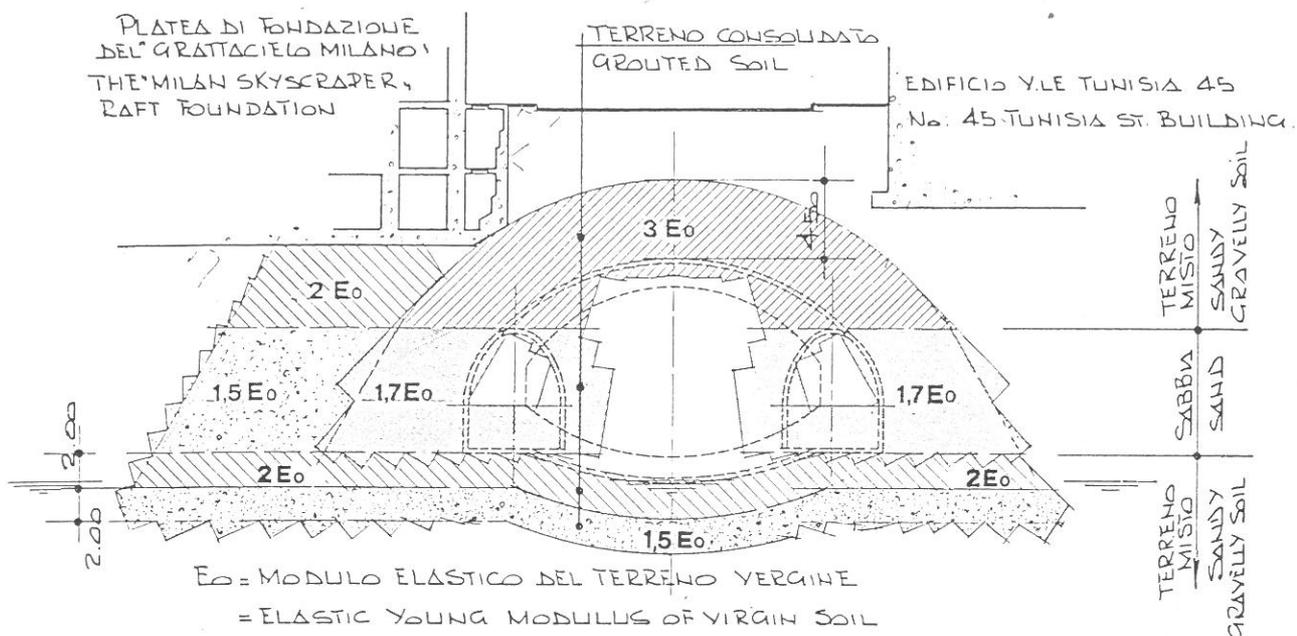


Fig. 5 - Progetto finale realizzato
Final design scheme adopted

Per quanto riguarda le miscele di iniezione erano state scelte le seguenti:

- cementizia: Solena nell' arco attorno alla galleria e nella parte interna a protezione dei cunicoli laterali.
- Mistrà-L nella zona "al largo" sotto la platea di fondazione del grattacielo
- integrativa: Silacsol-S dappertutto ad esclusione del guscio sotto l'arco rovescio.

I quantitativi di miscela da iniettare, calibrati in funzione del grado di consolidamento da raggiungere, del tipo di terreno e dei sollevamenti consentiti, prevedevano dei valori variabili da 0,10 a 0,14 del volume teorico da iniettare per le miscele cementizie, e da 0,10 a 0,18 per la chimica.

Con gli stessi criteri seguiti per determinare i quantitativi di miscela erano anche stati prefissati i valori massimi di pressione "di rifiuto", raggiunti i quali le iniezioni avrebbero dovuto essere sospese; questo allo scopo di evitare delle rotture del terreno nelle zone a granulometria più fine e così limitare i sollevamenti degli edifici.

L'analisi numerica, relativa a questo progetto finale, ha permesso di stimare i cedimenti attesi durante tutte le diverse fasi delle lavorazioni (scavo cunicoli, scavo calotta e scavo arco rovescio) che si sono rivelati decisamente inferiori rispetto a quelli relativi alle precedenti geometrie di trattamento analizzate.

In tabella 1 vengono riportati i valori dei cedimenti calcolati in corrispondenza dell'asse strada e dello spigolo del grattacielo.

TAB. 1 - Cedimenti calcolati
Calculated settlements

Cedimenti	Scavo cunicoli mm	Scavo calotta mm	Totale mm
Spigolo grattacielo	2,5	4,5	7,0
Asse strada	2,0	10,0	12,0

4. La strumentazione di controllo

L'estrema vicinanza di una struttura così alta allo scavo della grossa galleria di stazione Repubblica, ha richiesto l'installazione di una strumentazione molto sofisticata per il controllo dei movimenti dell'edificio stesso e delle deformazioni del terreno circostante lo scavo.

Nella fig. 6 è illustrata l'ubicazione della strumentazione installata nella zona del grattacielo che consta di:

- caposaldi topografici sulla strada, sul perimetro degli edifici ed all'interno

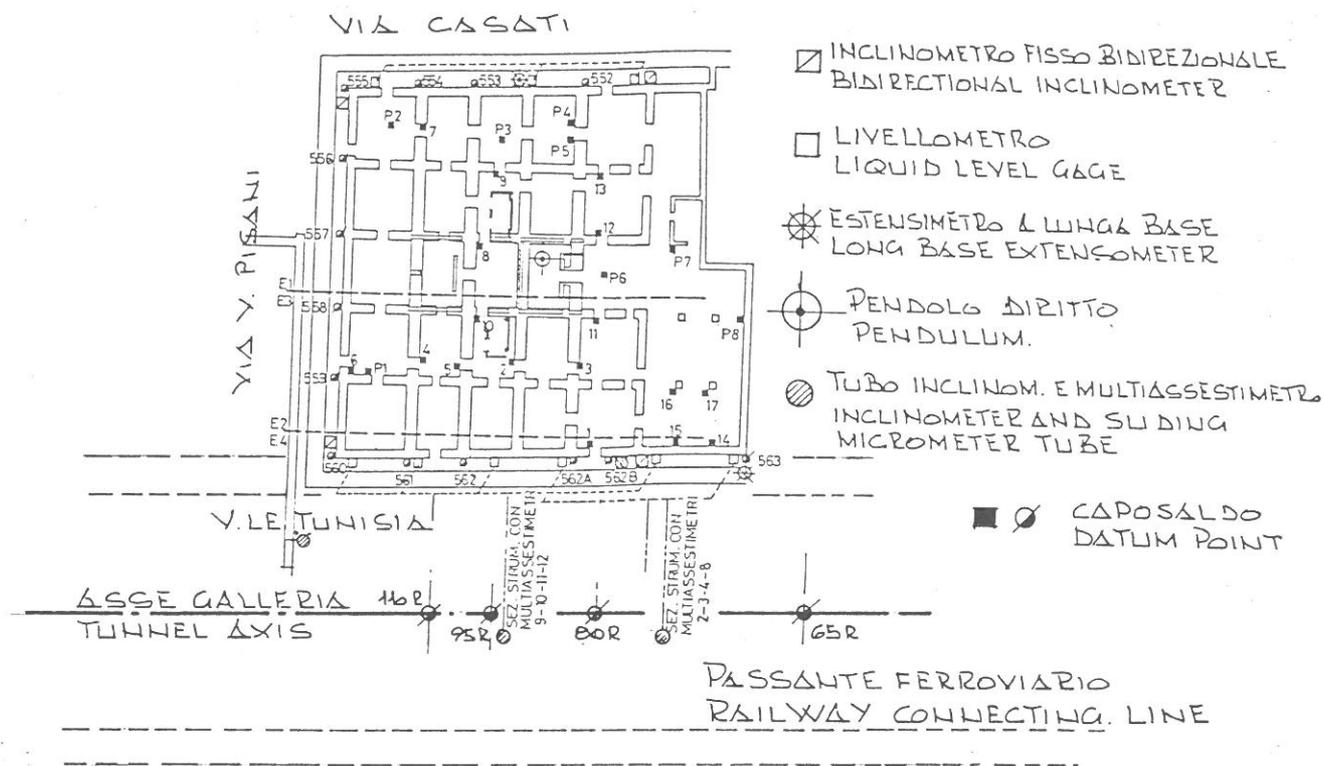


Fig. 6 - Strumentazione di controllo
Layout of control device system

- della platea di fondazione del grattacielo
- multiassestimetri-inclinometri posti in due sezioni trasversali all'asse della galleria per il controllo delle deformazioni del terreno consolidato
- due estensimetri a lunga base con bulbo cementato a 25 m sotto la platea di fondazione e collegati all'unità di acquisizione dati
- circuiti livellometrici collegati all'unità di acquisizione dati
- inclinometri fissi biassiali collegati all'unità di acquisizione dati

- pendolo diritto con filo a piombo montato nella tromba delle scale del grattacielo anch'esso collegato con l'unità di acquisizione dati
- unità di acquisizione dati in grado di effettuare ad intervalli di tempo prefissati la misura dei segnali analogici e convertirli nelle corrispondenti grandezze fisiche, di memorizzare i dati acquisiti e di visualizzare i dati numerici su schermo in tempo reale.

Per verificare inoltre lo stato deformativo e tensionale del prerivestimento e del rivestimento in c.a. della calotta sono state montate:

- tre coppie di barrette estensimetriche fissate alle ali di una centina in corrispondenza della chiave e dei reni di calotta
- due coppie di barrette estensimetriche fissate all'armatura di intradosso ed estradosso in due diverse sezioni
- due coppie di celle di pressione annegate nel getto in corrispondenza dell'intradosso ed estradosso delle stesse sezioni di cui al punto precedente.

I valori delle letture più interessanti sono stati rappresentati in grafici mano mano aggiornati durante i lavori.

5. Il consolidamento di Ia fase dal piano strada

L'inizio dei lavori di consolidamento (7/7/88) è stato condizionato dalla presenza dei tiranti di sostegno della paratia del lotto 5 della MM3 che interessavano la sezione di scavo della galleria di stazione del Passante per una lunghezza di circa 30 m; solamente dopo il 29/9/88 non è esistito più alcun vincolo per le perforazioni.

Con riferimento a ciascuna raggera di fori, il consolidamento è iniziato iniettando attraverso le valvole dei tubi più esterni ed è proceduto in chiusura verso quelli centrali; inoltre, per esigenze di tempistica operativa, il consolidamento della metà sezione lato grattacielo si è concluso con qualche mese di anticipo rispetto a quello del lato opposto, in modo tale da permettere lo scavo della parte superiore del cunicolo dalla quale si sarebbe poi effettuato il consolidamento di IIa fase sotto la platea del grattacielo.

Sulla base delle letture strumentali si può dire che questa prima fase di consolidamento non abbia provocato mediamente degli spostamenti importanti nella fondazione del grattacielo (+1,5 mm come massimo).

Fanno eccezione i valori evidenziati dal caposaldo 563 e dall'estensimetro E1 (+6 mm), che tuttavia non interessano la platea del grattacielo perchè rilevati nella zona limitrofa fondata su plinti.

Per quanto riguarda le deformazioni subite dal terreno consolidato è stato interessante osservare le deformate inclinometriche ed estensimetriche rilevate dai tubi multiassestometrici.

Ad esempio la fig. 7 rappresenta l'evoluzione della deformata multiassestometrica del tubo S9 nel periodo delle iniezioni dalla strada.

Gli allungamenti maggiori si sono verificati in corrispondenza dell'arco consolidato di calotta durante il periodo di iniezione della miscela Silacsol, quando l'arco ha raggiunto il suo massimo e definitivo consolidamento.

Le deformate inclinometriche hanno tutte evidenziato uno spostamento della sommità dei tubi verso l'asse galleria.

Questi spostamenti sono stati provocati dalle prime iniezioni eseguite nei fori più esterni nel terreno ancora vergine.

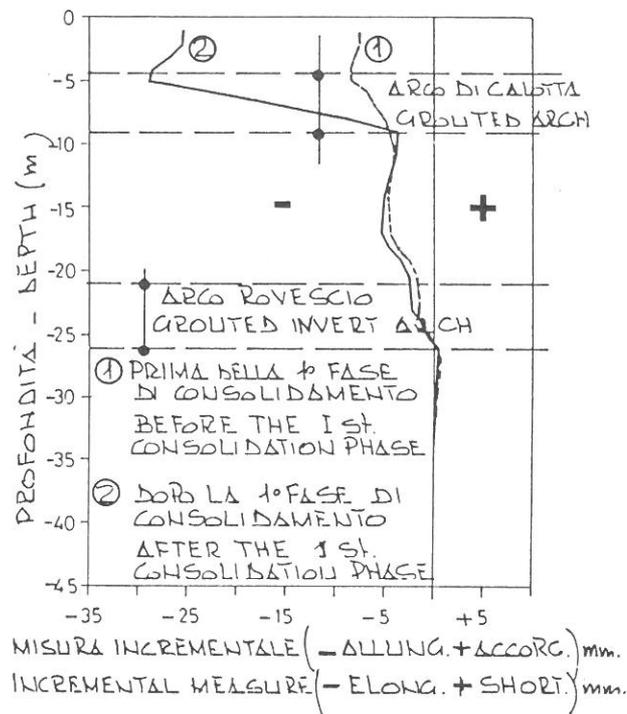


Fig. 7 - Deformazioni assiali nel tubo S9
Axial strains in sliding S9

6. Scavi dei cunicoli laterali e reazioni del terreno

Mentre continuavano le iniezioni di consolidamento lungo il lato degli edifici opposti, l'1/2/89 ha avuto inizio lo scavo della parte superiore del cunicolo lato grattacielo a partire dalla progressiva 7225,042.

Il rivestimento provvisorio era costituito da centine ogni 0,8 m e da betoncino proiettato armato con rete elettrosaldata.

Solamente dopo l'esecuzione delle iniezioni sotto la platea del grattacielo ed il ribasso del cunicolo sono stati eseguiti i getti per la realizzazione dei piedritti del rivestimento definitivo.

Dai risultati delle letture multiassessimetriche, che rilevano le deformazioni in profondità del terreno metro per metro, si sono avute delle informazioni interessanti per quanto riguarda lo stato deformativo del terreno indotto dallo scavo del cunicolo.

Questo infatti, come si può vedere in fig. 8, ha provocato delle compressioni nella zona consolidata lateralmente al cunicolo.

Le compressioni di maggiore entità sono state rilevate dai tubi (S8 ed S12) posti con la testa nell'intercapedine della platea del grattacielo ed hanno presentato un valore massimo di 0,75 mm/m in corrispondenza del tubo 12.

Il terreno non consolidato all'interno della sezione della galleria ha subito delle compressioni, mentre delle zone di estensione sono state misurate in corrispondenza del consolidamento dell'arco di calotta.

Questi allungamenti sono però da attribuire alle iniezioni ancora in corso al momento dello scavo del cunicolo.

Per quanto riguarda lo scavo del cunicolo lato civici dispari, iniziato l'1/3/89 e conclusosi il 4/4/89, sono state rilevate anche in questo caso delle compressioni nell'arco di scarico lateralmente al cunicolo e nella zona di terreno non consolidata all'interno della sezione della galleria; non si sono invece avute

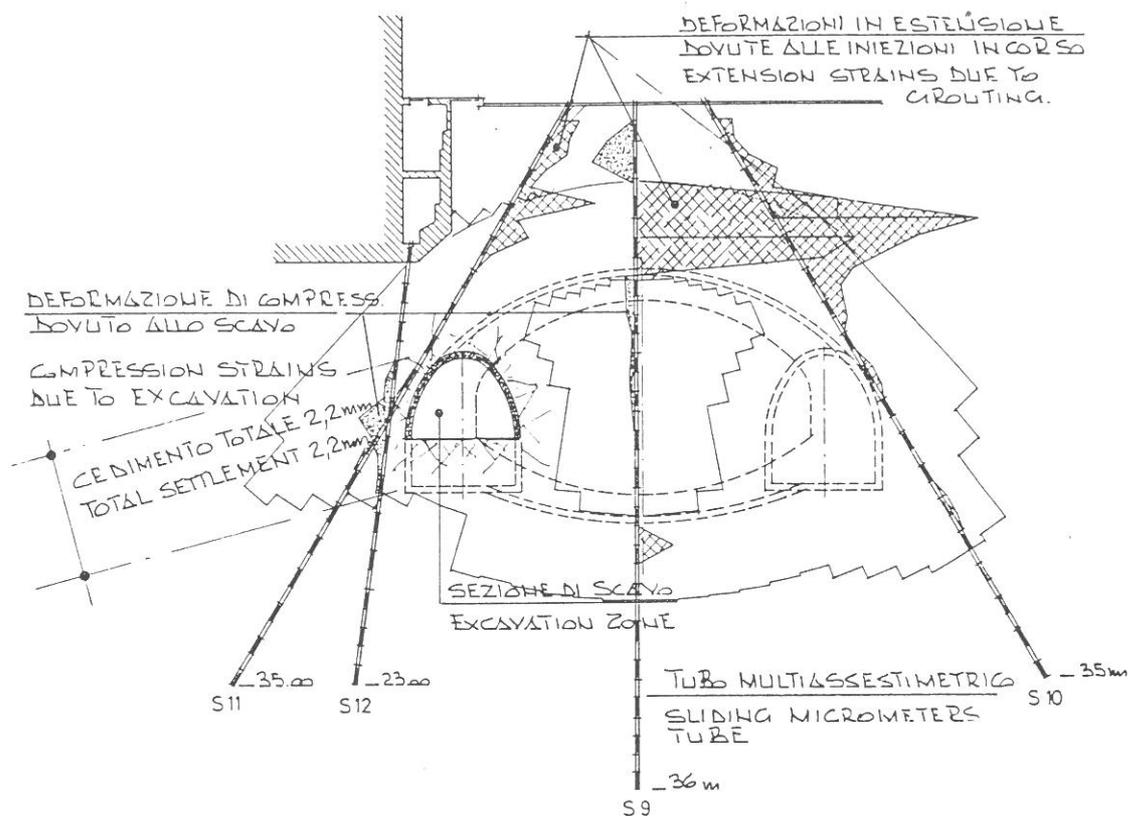


Fig. 8 - Deformazioni assestometriche del terreno durante lo scavo del 1° cunicolo
Strains inside the soil during the 1st drift excavation

deformazioni apprezzabili nel terreno sottostante la platea, come si può osservare dalla fig. 9.

Un altro aspetto interessante, evidenziato dalle letture inclinometriche, è stato lo spostamento, verso la parte opposta della sezione scavata, subito dai tubi S3 ed S10 durante lo scavo del cunicolo.

Questo fenomeno deformativo potrebbe fare intuire un effetto di entrata in carico del "grande arco consolidato" sotto l'effetto del peso del grattacielo (fig. 10).

Completato lo scavo del cunicolo è stato gettato il piedritto del rivestimento definitivo per realizzare, in fase successiva, un sicuro appoggio delle centine del grande arco di calotta.

A questo proposito riteniamo interessante fare rimarcare che, in corrispondenza della sommità dei piedritti, alle centine sono stati applicati degli speciali "rostri" metallici che una volta annegati nel getto hanno reso le due strutture collaboranti: durante lo scavo della calotta il flusso di sforzi è stato così deviato nell'ambito dei due piedritti laterali e si è eliminata totalmente la deformazione dovuta all'azione di "punzonamento" lungo le parti inferiori delle centine.

7. Il consolidamento di IIa fase dal cunicolo lato grattacielo

La fase più delicata dell'intervento di consolidamento è stata quella relativa alle iniezioni "al largo" sotto la platea del grattacielo.

Come già detto, esistevano infatti delle limitazioni per i massimi sollevamenti

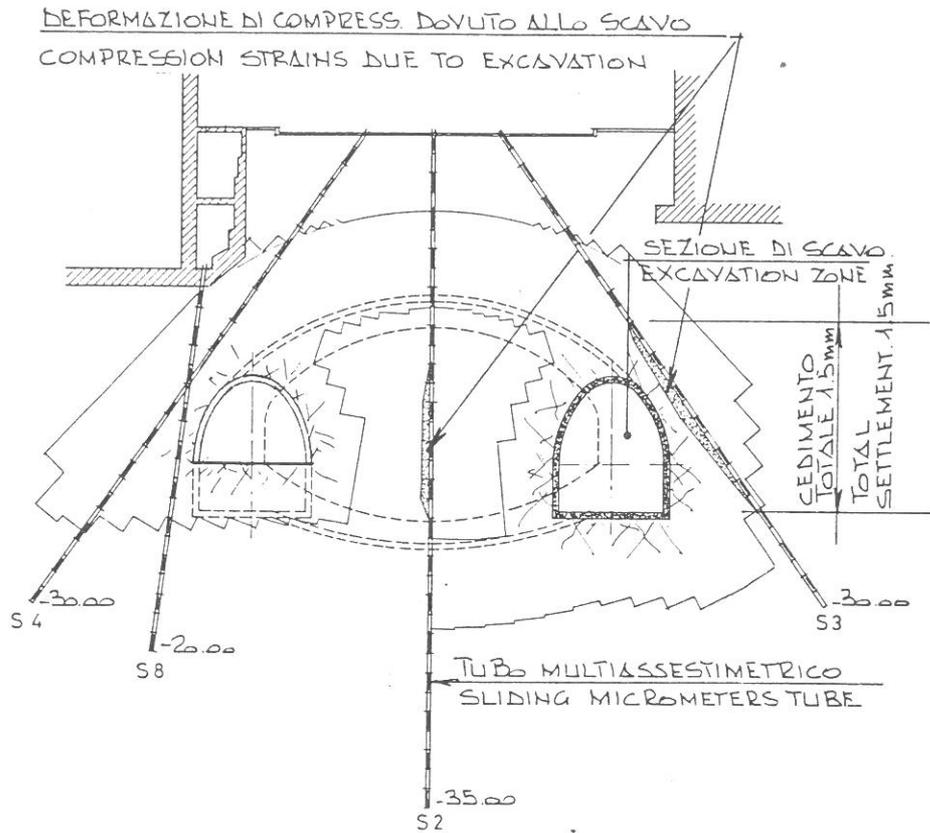


Fig. 9 - Deformazioni assestimetriche del terreno durante lo scavo del 2° cunicolo
Strains inside the soil during the 2nd drift excavation

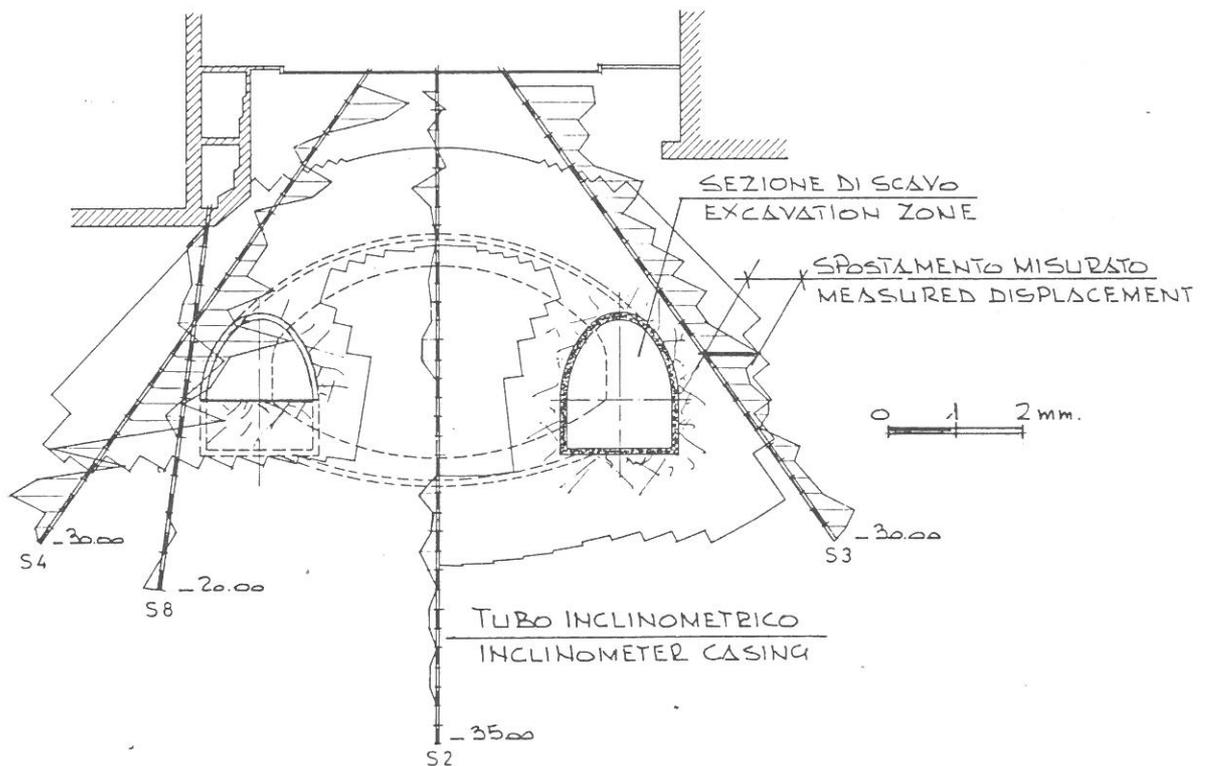


Fig. 10 - Letture inclinometriche. Spostamenti orizzontali puntuali provocati dallo scavo del 2° cunicolo
Inclinometer readings. Horizontal local displacements during the 2nd drift excavation

delle estremità della platea rispetto alla sua parte centrale pari a 2,5 mm. Le iniezioni sono state eseguite in più passate allo scopo di iniettare il quantitativo di miscela previsto, mantenendo sempre le pressioni di iniezione al di sotto dei limiti stabiliti dal progetto.

Tra una passata e quella successiva venivano controllate le deformazioni della platea, sia attraverso i movimenti rilevati dalla strumentazione con lettura automatica, sia attraverso le livellazioni manuali dei caposaldi topografici e, in funzione di queste, venivano stabilite le modalità (quantitativi di miscela e pressioni di iniezione) per la prosecuzione del consolidamento.

Anche la localizzazione delle valvole da iniettare veniva regolata in funzione dei sollevamenti riscontrati fino a quel momento: molti fori sono stati iniettati, nelle passate successive alla prima, solamente nella loro parte più profonda e cioè sotto la zona spostata verso il centro della platea.

I quantitativi di miscela cementizia iniettati sono stati inferiori a quelli previsti in fase progettuale, in quanto, in alcuni casi, per non causare sollevamenti incompatibili con la platea, è stato necessario interrompere le iniezioni prima del raggiungimento dei volumi prefissati.

In generale la miscela chimica di chiusura è stata invece assorbita così come previsto.

Per quanto riguarda i sollevamenti assoluti (a partire dall'inizio delle lavorazioni) dei punti di livellazione posti sulla platea del grattacielo lungo il lato di Viale Tunisia, sono stati tutti inferiori a 2,5 mm, ad eccezione del caposaldo n. 561 che ha raggiunto i 3 mm.

In fig. 11 sono riportate le deformate dell'estensimetro E2 e del caposaldo corrispondente 562B relative a tutto il periodo di durata dei lavori di consolidamento, scavo e getto.

Si può notare che i massimi sollevamenti si sono verificati durante la fase di

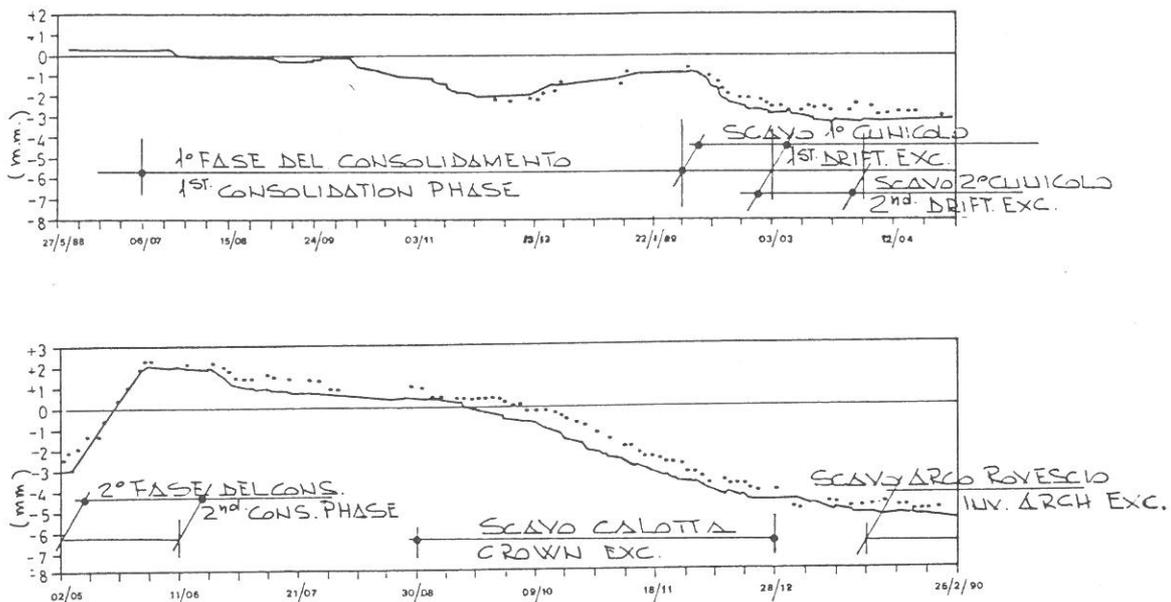


Fig. 11 - Movimenti verticali rilevati dall'estensimetro E2 (____) e dal caposaldo 562B (.)
Vertical movements surveied through extensometer E2 (____) and datum point 562B (.)

iniezione da cunicolo, specialmente in fase di chiusura quando i vuoti più grossi del terreno erano già stati intasati.

8. Lo scavo di ribasso del cunicolo, lo scavo di calotta e getti successivi

Solo a seguito dell'intervento da cunicolo, che prevedeva anche il completamento del consolidamento del terreno dell'arco rovescio, è stato scavato il ribasso di quest'ultimo e successivamente eseguito il getto del piedritto.

In questa fase i cedimenti misurati in corrispondenza dei caposaldi posti lungo il perimetro del grattacielo sono stati sempre inferiori al millimetro.

Il 30/8/89 è iniziato lo scavo del grande arco di calotta (fig. 12) secondo tratte giornaliere di 0,8 m o 1,6 m corrispondenti alla messa in opera di una o due centine.



Fig. 12 - Scavo dell'arco di calotta. Si notano i piedritti già gettati nei due cunicoli laterali.

The crown excavation. The piers casted inside the lateral drifts can be noticed

Il prerinvestimento era costituito da centine HEB 220 e da uno spessore di 30 cm di betoncino spruzzato armato con rete elettrosaldada ed il rivestimento definitivo veniva gettato per conci successivi di 5 m di lunghezza ciascuno.

Il tratto più lungo di scavo sostenuto dal solo prerinvestimento è stato di 23 m nella zona esterna alla platea, mentre in quella direttamente interessata dalla platea del grattacielo di 15 m circa.

Lo scavo si è concluso il 21/12/89 con l'abbattimento della paratia a suo tempo costruita per il sostegno degli scavi del lotto 5 della MM3.

In fig. 13 sono rappresentate alcune deformate del lato del grattacielo su Viale Tunisia durante tutto il periodo occorso per lo scavo della calotta; si può osservare che il cedimento massimo è stato rilevato dal caposaldo 562A ubicato in corrispondenza della parte alta del grattacielo e che è risultato di poco superiore a quello previsto dai risultati dei calcoli dell'analisi numerica (6,6 mm

contro i 4,5 mm calcolati).

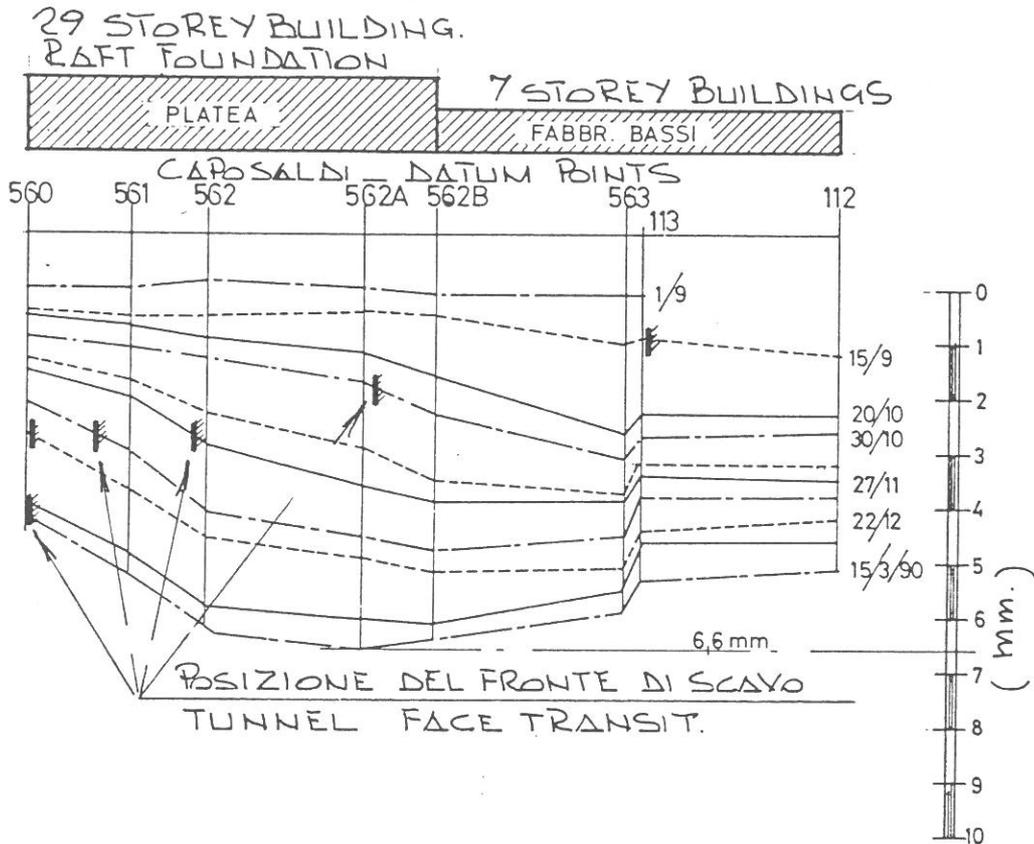


Fig. 13 - Cedimenti degli edifici lato grattacielo durante lo scavo dell'arco di calotta
Buildings' settlements during the crown excavation

Tale risultato dimostra che l'obiettivo principale proposto è stato raggiunto con buona approssimazione.

Per completezza riportiamo qui di seguito anche quello che è avvenuto al di fuori della zona "a rischio" del grattacielo, dove la rispondenza con i calcoli è risultata invece meno precisa.

I valori massimi dei cedimenti sono stati di 22,3 mm in asse strada nel caposaldo 65R e sugli edifici del lato opposto di 6 mm in corrispondenza del caposaldo 104.

Nella tabella n. 2 sono riassunti i valori dei cedimenti misurati nei 4 caposaldi posti in asse strada.

Possiamo notare quanto segue:

- i cedimenti totali sono generalmente superiori rispetto a quelli calcolati
- tuttavia in corrispondenza della platea del grattacielo i cedimenti in asse strada sono i più bassi e sono praticamente uguali a quelli calcolati.

Ad esempio per il caposaldo 110R lo scavo di calotta ha determinato un cedimento di (16,1-4,2) 11,9 mm, contro i 10 mm calcolati.

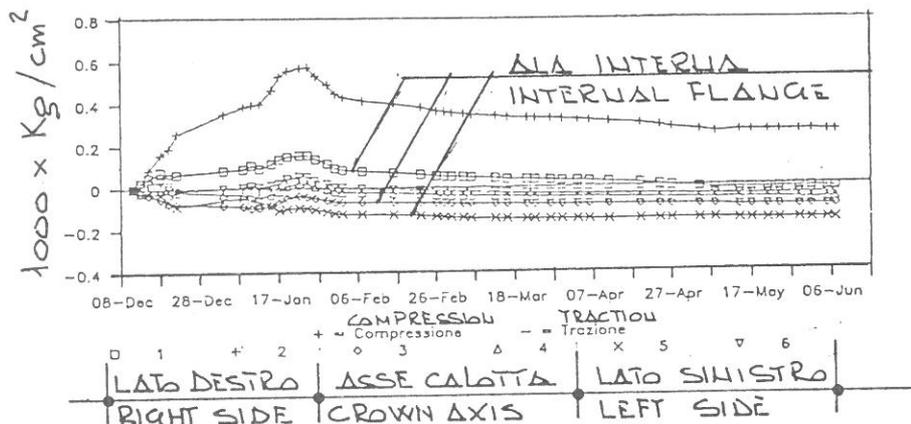
Questo sta a significare che il consolidamento "al largo" sotto il lembo della platea verso viale Tunisia ha deviato il flusso dei carichi al di fuori dell'arco tradizionale di scarico

- il cedimento massimo di 22,3 mm del caposaldo 65R è originato dalla velocità di scavo (2 centine/giorno), dalla riduzione del consolidamento al largo e

infine dal fatto che il rivestimento provvisorio ha sostenuto da solo il cavo per 23 m di lunghezza (operazioni consentite dalla distanza dal grattacielo).

Tab. 2 - Cedimenti della strada in asse galleria in funzione delle fasi di scavo calotta ed arco rovescio
Surface settlements (tunnel axis) during the crown and invert excavation

Caposaldo	65R	80R	95R	110R
Cedimento totale	22,3 mm	21,3 mm	18 mm	16,1 mm
Effetto di richiamo	1,9 mm 8,5%	3,4 mm 16%	3 mm 16,5%	2,8 mm 17,5%
Cedimento immediato con il solo prerivestimento	14 mm 62,6%	10,9 mm 51%	8,7 mm 48,5%	7,5 mm 46,5%
Effetto "coda" con rivestimento definitivo	3,4 mm 15,5%	4,1 mm 19,5%	2,6 mm 14,5%	1,6 mm 10%
Cedimento ulteriore: scavo e getto arco rovescio	3 mm 13,5%	2,9 mm 13,5%	3,7 mm 20,5%	4,2 mm 26%



Se si passa ora ad esaminare i dati rilevati dalle barrette estensimetriche montate sulla centina alla progressiva 7173,442 posta in opera il 30/11/89 (fig. 14), si può vedere che i tassi di lavoro sono decisamente inferiori a quelli ammissibili per il materiale utilizzato (Fe510 $\sigma_{6 \text{ amm.}} = 2400 \text{ Kg/cm}^2$).

Fig. 14 - Sforzi nella centina di calotta
Stresses in the crown steel rib

Si deve però tenere conto del fatto che la lettura di zero è stata effettuata l'11/12/89 e che pertanto non è stato possibile registrare l'incremento di sforzi durante il periodo precedente di 11 giorni. Riteniamo tuttavia che il tasso di lavoro sia sempre assai basso ed importante il fatto che il fenomeno si sia completamente stabilizzato dopo due mesi dalla posa degli strumenti.

Per quanto riguarda invece i valori misurati dalle barrette estensimetriche posizionate sull'armatura del getto nelle due sezioni alle progressive 7272,442 e 7269,442 si hanno dei tassi di lavoro massimi di 1600 Kg/cm^2 .

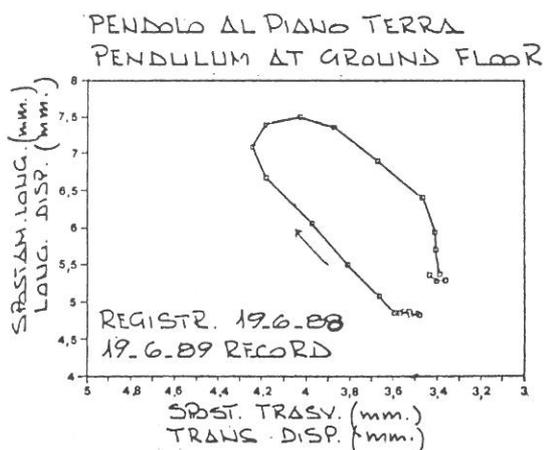
Questi valori dovrebbero essere assoluti in quanto la lettura di zero è stata

effettuata prima del getto.

10. Risultati finali e ulteriori backanalysis per ritarare i parametri in queste condizioni assai severe

Nei precedenti paragrafi si è cercato di esporre solamente gli aspetti più importanti e caratteristici che hanno riguardato la fase di progettazione e lo svolgimento dei lavori, soprattutto con riferimento all'interazione tra scavo e grattacielo.

Tra i risultati delle misure effettuate che non è stato possibile commentare in dettaglio ricordiamo in particolare il grafico che compara gli spostamenti rilevati dal pendolo (nell'ipotesi di platea perfettamente rigida) con la differenza di spostamenti misurati su due coppie di caposaldi omologhi posti alle due estremità della platea (561-554 e 562A-552).



Molto interessanti, anche indipendentemente dall'esecuzione dello scavo, sono risultate inoltre le misure registrate dal pendolo che hanno messo chiaramente in evidenza gli effetti deformativi sulla struttura provocati dalla variazione giornaliera e stagionale della temperatura.

Ad esempio in fig. 15 si possono notare gli spostamenti nel corso di un giorno solare (19 giugno 1988) prima dell'inizio dei lavori.

Gli effetti indotti dallo scavo sul grattacielo si possono poi notare guardando per esempio i diagrammi che riportano

Fig. 15 - Oscillazione giornaliera del pendolo
Daily pendulum's oscillation

gli spostamenti orizzontali del pendolo, riferiti ai due assi principali d'inerzia del grattacielo.

Prima dello scavo (1988) gli spostamenti trasversali (direzione perpendicolare a viale Tunisia) oscillavano tra -4 mm e 0 mm, dopo lo scavo (1990) tra -15 mm e -9 mm (fig. 16), mentre lo spostamento longitudinale è rimasto pressochè invariato; il grattacielo ha quindi subito una leggera rotazione verso lo scavo che ne caratterizzerà d'ora in avanti la situazione statica degli elementi strutturali.

Sulla base di tutti i dati sperimentali e le informazioni raccolte è stata effettuata una ulteriore back-analysis allo scopo soprattutto di affinare i parametri caratteristici del terreno trattato con iniezioni ed i cui risultati vengono esposti in un'altra memoria di questo stesso convegno.

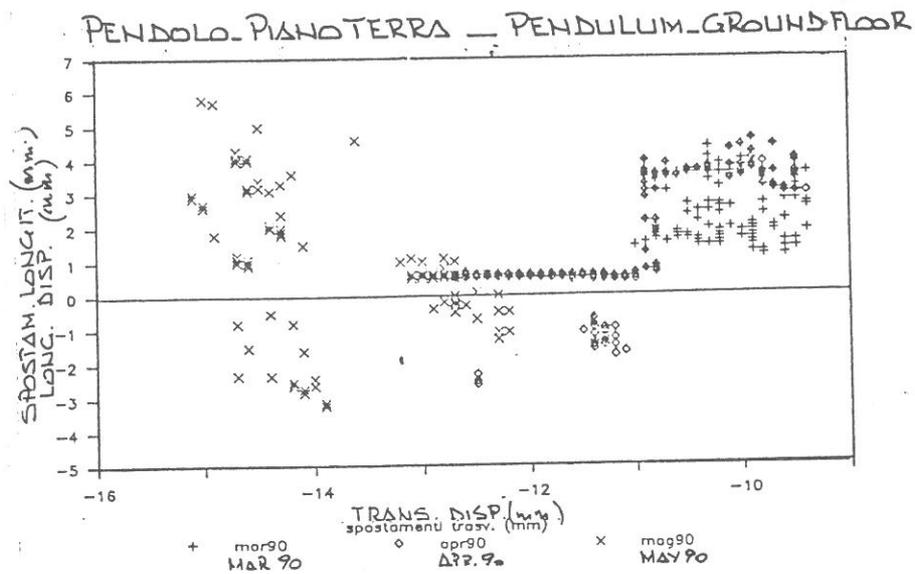


Fig. 16 - Oscillazioni del pendolo al piano terra, dopo lo scavo
Pendulum's oscillation at groundfloor, after the excavation

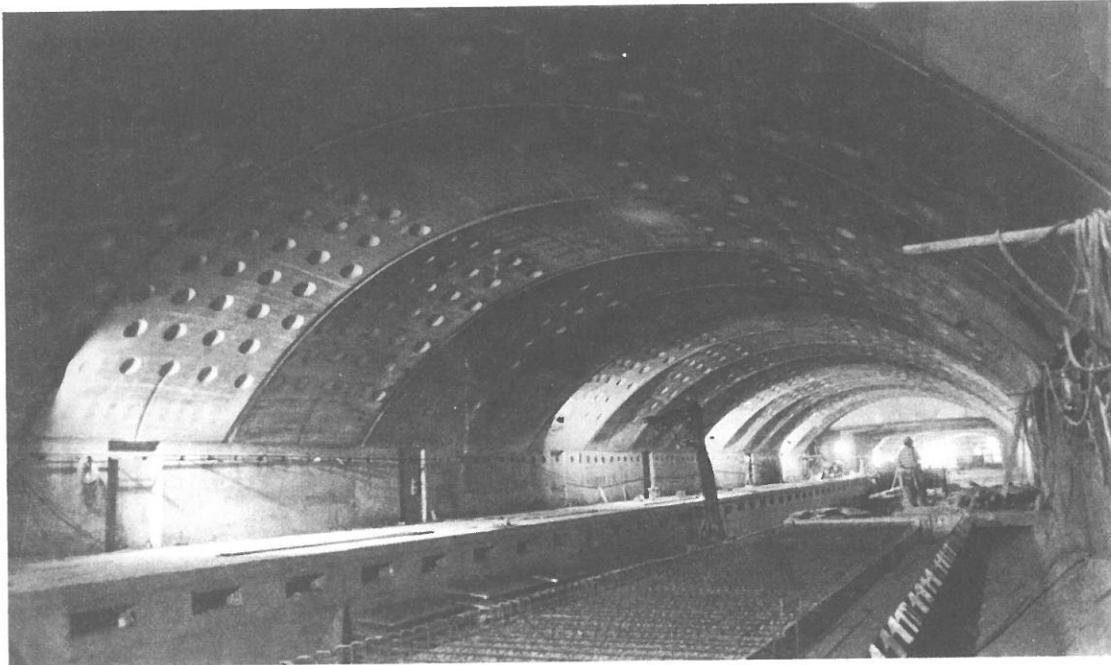


Fig. 17 - La galleria di stazione Repubblica quasi ultimata
The Repubblica railway station nearly completed

Personalia e ringraziamenti

Committente	: Regione Lombardia, Comune di Milano, FF.SS., F.N.M.
Ente concessionario	: M.M. Strutture e Infrastrutture del territorio SpA
Consulenti per il grattacielo:	Proff. Ingg. L. Finzi e E. Vitiello, Ing. C. Mascardi
Progettazione generale e Direzione Lavori	: MM S.p.A. Ing. U. Amagliani
Direttore dei Lavori	: Ing. G. Ghelfi

Progettista rivestimenti gal-
 leria, provvisori e definitivi: IN.CO. S.p.A. Ingg. S. Zorzi e F. Cortiana
 Progettista opere di consoli-
 damento : Ing. A. Balossi Restelli
 Consulenti per le analisi nu- : Ce.A.S. s.r.l. Ingg. B. Finzi e G. Canetta
 meriche : Prof. Ing. R. Nova - Politecnico di Milano
 Impresa generale : Impresa Recchi S.p.A. e Impresa Paride Cariboni
 S.p.A.; responsabile ing. E. Ceccolini
 Impresa per i lavori specia-
 lizzati : Rodio S.p.A., responsabile ing. P. Foppiani

Si ringraziano vivamente tutti gli Enti e le Persone sopra riferite per la collabo-
 razione prestata sia in fase progettuale che in fase operativa.

Un grazie particolare all'ing. E. Rovetto ed all'ing. R. Taboni per aver collabora-
 to alla raccolta ed organizzazione dei dati ed alla stesura dell'articolo.

Bibliografia

Amagliani U., Balossi Restelli A., Canetta G., Colombo A., Nova R. (1991). Settlement
 of a tall building induced by a tunnel excavation. X ECSMFE. Firenze.

Balossi Restelli A., Castellotti U., Ceccolini E., Ghelfi G., Finzi B. (1989).
 Blindhole tunnel for underground station in Milan: finite element analysis and com-
 parison with in situ measured settlements. Proc. Tunnels et micro-tunnels en ter-
 rain meuble, p. 295-306. Paris. Presses Ponts et Chaussées.

Balossi Restelli A. (1981). Iniezioni nei terreni sciolti. Atti Ist. Scienza delle
 Costruzioni del Politecnico di Torino.

Balossi Restelli A., Colombo A., Gervaso F., Lunardi P. (1986). Tecnologie speciali
 per il sostegno di scavi nelle alluvioni di Milano, in occasione della costruzione
 della linea 3 della MM. Proc. Int. Congress on Large Uderground Openings. Firenze.

Botti E., Canetta G., Nova R., Peduzzi R. (1988). An application of a
 strainhardening model to the design of tunnels in sand. Proc. ICONMIG-88, p. 1641-
 1646. Rotterdam, Balkema.

De Paoli B., Bosco B., Granata R. (1991). Qualche riflessione sulle miscele di
 iniezione a base di cemento con caratteristiche di finezza tradizionali. Proc. Soil
 and Rock Improvement in underground Works. 18-20 March, Milano.

Mongilardi E., Tornaghi R. (1986). Construction of large underground openings and
 use of grouts. Int. Conference on Deep Foundations. Beijing.

Tornaghi R., Bosco B., De Paoli B. (1988). Application of recently developed
 grouting procedures for tunnelling in the Milan urban area. 5th Int. Symposium Tun-
 nelling 88, 18-21 April, London.