

SCAVI PROFONDI IN ZONA URBANA

opere di sottofondazione e di contenimento di scavi profondi sotto un edificio antico in Milano

Pietro Lunardi *
 Enrico Arrigoni *

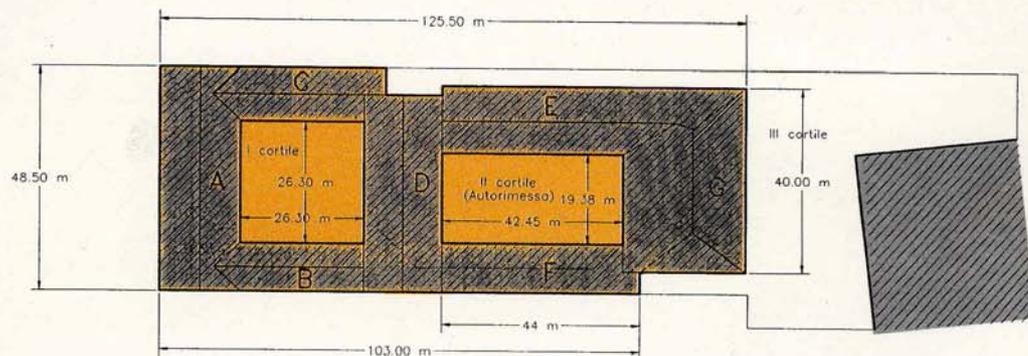


Fig. 1 Planimetria generale edificio

Premessa

I centri storici delle nostre città, sovraedificati, sovraffollati ed ogni giorno più congestionati dal traffico, offrono sempre meno spazi utilizzabili, sovente di qualità mediocre. Si manifesta, quindi, la tendenza, sempre più accentuata, dettata principalmente da necessità e da utilità, di ricercare, in sotterraneo, volumi atti a accogliere impianti, autoparcheggi, attività industriali, iniziative commerciali, ecc., ed a realizzare nuove e più snelle vie di traffico, sia per veicoli privati che per mezzi di trasporto collettivo, decongestionando, in definitiva, le strade e le piazze dei centri storici dall'ingombrante presenza veicolare e contenendo, peraltro, l'eccessivo sviluppo verso l'alto, spesso impedito anche da vincoli urbanistici, nonché l'espansione a macchia d'olio degli agglomerati urbani. Le attrezzature e le sofisticate tecnologie attualmente disponibili consentono, d'altra parte, di realizzare, anche nel sottosuolo, con costi accessibili, opere che, in un passato relativamente recente, non erano praticamente fattibili, né dal punto di vista tecnologico-operativo, né, tantomeno, da quello economico. In questo contesto, si inquadra la ristrutturazione di un antico, aristocratico palazzo, attualmente adibito ad uffici ed alloggi, sede, nel Settecento, del famoso Collegio Longone, che ha ospitato illustri allievi, tra cui Alessandro Manzoni (dal 1798 al 1802), oltre ad altri illustri personaggi, quali Federico Confalonieri, Giuseppe Parini e Cesare Correnti.

* Rocksoil Spa, Milano

Ubicato nel centro storico di Milano, l'antico complesso architettonico in oggetto, costituito da sette corpi principali, articolati intorno a tre cortili, si sviluppa su di un'area di oltre 6000 m², di cui ricopre circa 4800 m² (v. Fig. 1).

Si tratta di una struttura in muratura di mattoni, formata da un piano interrato e da quattro/cinque piani fuori terra sostenuti, in massima parte, da solai a volta.

Interventi di ristrutturazione

Il futuro utilizzo dell'edificio prevede la realizzazione di nuovi locali e la trasformazione di altri; ciò comporta un drastico incremento dei carichi permanenti e di esercizio sui solai, la necessità di adeguamento strutturale e la conseguente trasmissione di sovraccarico in fondazione.

E', inoltre, previsto il ribasso del pavimento dell'interrato e la realizzazione, in corrispondenza di un cortile interno ed al di sotto di un'ala dell'edificio, di un'autorimessa sotterranea pluripiano, della relativa rampa di accesso, di scale pedonali e di altri servizi. Il suddetto progetto di ristrutturazione era, dunque, condizionato, oltre che dagli adeguamenti strutturali, dalla realizzazione di efficienti interventi di sottofondazione delle murature e, soprattutto, dall'ideazione e dall'esecuzione di opere di contenimento degli scavi necessari per la realizzazione dell'autorimessa, atte a garantire sicurezza al cantiere ed a salvaguardare la più completa integrità all'antico edificio, mantenendone l'agibilità e l'abitabilità, durante lo svolgimento dei lavori. In particolare, il razionale sfruttamento dello spazio sotter-

raneo per la realizzazione dell'autorimessa e dei necessari servizi imponeva di effettuare scavi, spinti a quota -15.10 m (tutte le quote sono riferite a quella del cortile, fissata pari a 0.00), con pareti verticali addossate alle facciate prospicienti un cortile interno di forma rettangolare, di dimensioni 19.38 x 42.45 m. La facciata prospiciente il lato Est del cortile, di altezza 19.5 m, sottende un edificio (Corpo F) di quattro piani fuori terra ed è sorretta da sette arcate a tutto sesto, poggianti su colonne di granito di diametro 1.0 m ed altezza 5.2 m, poste ad interasse 5.8 m, fondate direttamente, a quota -3.2 m, su plinti di mattoni, a pianta quadrata, di lato 1.40 m, esercitanti un carico valutato pari a 1857 KN (182 t). I lati Ovest e Sud del cortile sono delimitati da fabbricati denominati, rispettivamente, Corpo E e Corpo D, aventi solai a volta, impostati sui muri di facciata, in mattoni, muniti di numerose finestre e fondati direttamente. Il Corpo E, di altezza 19.0 m al cornicione, è formato da quattro piani fuori terra + interrato + sottotetto, mentre il Corpo D contiene cinque piani fuori terra + interrato + sottotetto e totalizza altezza 25.0 m, in facciata: i carichi in fondazione sono stati valutati pari a 650+800 KN/m, dopo ristrutturazione. Sul quarto lato (Nord) del cortile si affaccia un corpo di fabbrica (Corpo G) di cinque piani fuori terra, con solai in c.a., già completamente ristrutturato in elevazione, previo totale sventramento interno e fondazione su palificate di micropali: è adibito ad uffici. Il progetto prevede lo scavo al di sotto di esso, fino a quota -15.10 m, per la realizzazione di un'autorimessa.

Caratteristiche dei terreni di fondazione

Il terreno su cui insiste l'edificio in esame è quello tipico presente sotto il nucleo centrale dell'area urbana della città di Milano. Si tratta di terreni alluvionali pleistocenici, sabbio-ghiaiosi, di deposizione fluviale (Diluvum Recente).

Indagini geognostiche sono state eseguite nel sito in oggetto, consistenti nelle seguenti operazioni: perforazione di sondaggi geognostici, con esecuzione di SPT (con frequenza verticale 1.5 m) e prelievo di campioni significativi per la determinazione della composizione granulometrica; esecuzione di prove penetrometriche dinamiche continue a punta conica, SCPT (tipo Meardi - AGI).

I risultati penetrometrici tipici sono illustrati in Fig. 2. Da essi si evince che i terreni in esame, sciolti in sommità, sono dotati di media-elevata densità, a quote inferiori a quella di appoggio delle fondazioni. A profondità superiori a 18 m, è stato sempre riscontrato elevato grado di addensamento.

L'esame dei testimoni estratti dai sondaggi evidenzia trattarsi di terreni non coesivi, essenzialmente sabbie ghiaiose, ben gradate, contenenti elementi di dimensioni massime 50+60 mm e scarso fino; sono talora presenti sottili livelli inglobanti piccole frazioni limose. Un piezometro, installato all'uopo, ha mostrato la presenza di falda freatica con superficie libera localizzata a quota -22 m, tendente ad innalzarsi.

Opere di sottofondazione e di contenimento scavi

In corrispondenza delle fondazioni degli edifici, soggetti a ristrutturazione interna, comportante sovraccarico sui terreni di sedime e ribasso della pavimentazione del piano interrato, sono stati dimensionati interventi di sottofondazione a mezzo di colonne jet-grouting ϕ 600 mm, ubicate in accostamento ai pilastri ed ai muri portanti, con disposizione appropriata, tale da assicurare, alle fondazioni, la necessaria portanza e prevenire cedimenti.

Necessità funzionali dell'autorimessa sotterranea, imponendo, come delineato nelle pagine precedenti, la realizzazione di uno scavo verticale in aderenza alle facciate prospicienti il cortile interno ed appartenenti ad edifici in muratura del XVIII secolo, in massima parte agibili ed abitati durante tutto il periodo di svolgimento dei lavori, ha indirizzato lo studio progettuale verso l'individuazione di opere di contenimento idonee a sostenere i terreni retrostanti precludendo, contemporaneamente, l'instaurarsi di movimenti orizzontali e verticali dei terreni stessi e, conseguentemente, il manifestarsi di cedimenti degli edifici, su di essi appoggiati tramite fondazioni dirette, esercitanti elevate sollecitazioni.

La situazione strutturale dei fabbricati e le caratteristiche

Fig. 2 Risultati penetrometrici

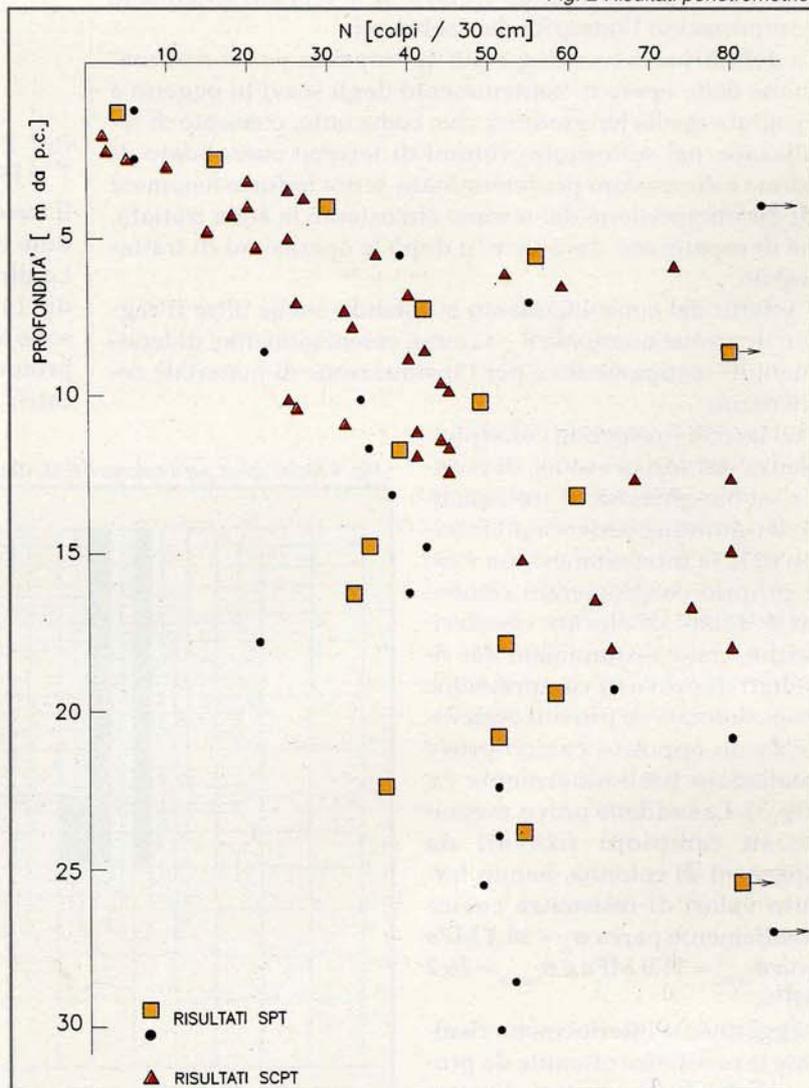




Fig. 3 Campo prove jet-grouting (particolare)

dei terreni hanno decisamente sconsigliato l'uso di opere quali diaframmi a pannelli o paratie di pali trivellati accostati che, comportando l'asportazione di materiale in profondità, avrebbero provocato, in fase di costruzione, l'allentamento, per decompressione, dei terreni adiacenti, peraltro sovraccaricati dalle strutture, e, conseguentemente, l'insorgere di movimenti orizzontali e verticali e, quindi, di pericolosi cedimenti degli edifici.

Absolutamente inaccettabili erano anche tecnologie costruttive che, inducendo vibrazioni, avrebbero seriamente compromesso l'integrità dei fabbricati.

In definitiva, la tecnologia più appropriata per la realizzazione delle opere di contenimento degli scavi in oggetto è risultata quella jet-grouting che, come noto, consente di realizzare, nel sottosuolo, volumi di terreno consolidato di forma e dimensioni predeterminate, senza indurre fenomeni di decompressione del terreno circostante la zona trattata, né di espansione durante e/o dopo le operazioni di trattamento.

L'effetto del consolidamento si estende anche oltre il raggio di azione nominale R_a , a causa, essenzialmente, di fenomeni di costipamento e per l'insinuazione di materiale cementante.

Nei terreni presenti in corrispondenza del sito in esame, di natura sabbio-ghiaiosa, il trattamento jet-grouting provoca all'interno di R_a la formazione di un vero e proprio conglomerato cementizio dotato di elevate caratteristiche, come testimoniato dai risultati di prove di compressione non confinata su provini prelevati da un apposito campo-prove realizzato preliminarmente (v. Fig. 3). Le suddette prove, eseguite su campioni ricavati da spezzoni di colonna, hanno fornito valori di resistenza cubica mediamente pari a $\sigma_{rc} = 18.4$ MPa con $\sigma_{rcmin} = 11.9$ MPa e $\sigma_{rcmax} = 26.2$ MPa.

Leggermente inferiori sono risultate le resistenze ottenute da provini cilindrici carotati diretta-

mente, a causa, verosimilmente, oltre che della forma, anche del probabile disturbo arrecato in fase di carotaggio. Convertendo i valori di resistenza cilindrica in cubica si ottiene $\sigma_{rc} \geq 19.6$ MPa, con media pari a $\sigma_{rc} = 16.7$ MPa su un totale di sei provini testati. Il modulo elastico, sempre superiore a 6000 MPa, ha raggiunto un valore massimo di 16835 MPa. La resistenza a trazione è risultata sempre compresa tra 0.6 e 1.7 MPa.

Il calcolo strutturale delle opere di contenimento degli scavi è stato effettuato con il Metodo degli Elementi Finiti (F.E.M.), utilizzando un modello piano in campo elasto-plastico non lineare (DRUCKER-PRAGER), relativamente ai terreni ed al jet-grouting, che ha consentito di analizzare, in dettaglio, in tutte le fasi costruttive, il comportamento tenso-deformativo in ogni punto delle strutture, nonché le interazioni con i terreni circostanti, riproducendo, nel modo più coerente, la reale progressione delle operazioni di scavo, le fasi costruttive e le caratteristiche meccaniche dei materiali.

Al terreno naturale è stata attribuita coesione nulla ed angolo di attrito $\phi = 30^\circ$, nello strato superficiale di spessore 5 m, e $\phi = 35^\circ$, a profondità superiori. Il modulo elastico è stato assunto aumentare parabolicamente con la profondità z , in accordo alla seguente legge:

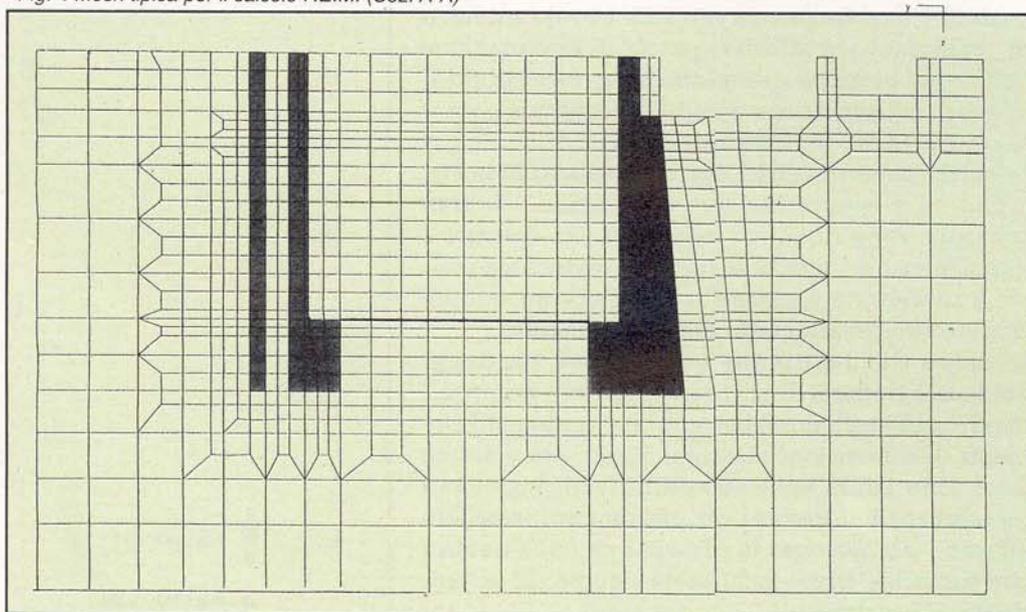
$$E = 2000 p_a \left(\frac{0,5 \cdot \gamma \cdot z}{p_a} \right)^{0,5}$$

p_a = pressione atmosferica di riferimento

γ = peso di volume del terreno

Il terreno trattato con jet-grouting è stato assunto avere modulo elastico $E = 5000$ MPa e resistenza a trazione 0.3 MPa. Le dimensioni del modello F.E.M., costituito da una mesh di 1141 nodi, (v. Fig. 4) suddivisi in 30 gruppi di elementi, sono state rapportate alle dimensioni delle strutture ed alla profondità di scavo, precludendo il manifestarsi di significativi gradienti di deformazione in prossimità del contor-

Fig. 4 Mesh tipica per il calcolo F.E.M. (Sez. A-A)



no vincolato del modello stesso. Trattandosi di un modello in campo non lineare, è stato necessario ricreare lo stato tensionale iniziale (geostatico) e quello esistente al momento del consolidamento.

Fig. 5 Planimetria, con ubicazione opere di contenimento in jet-grouting

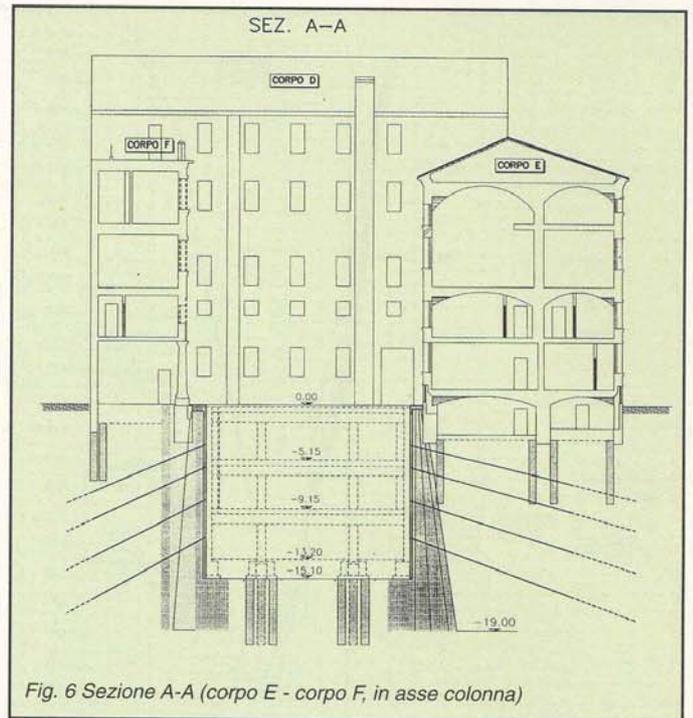
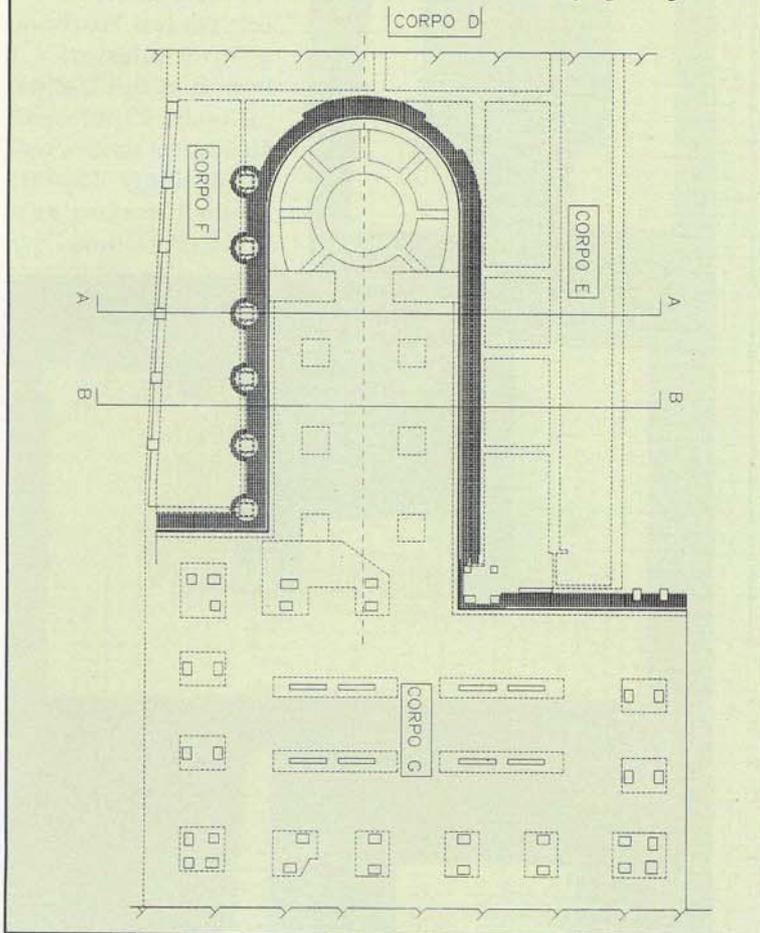


Fig. 6 Sezione A-A (corpo E - corpo F, in asse colonna)

disposte con interasse longitudinale $i = 0.50$ m, su tre allineamenti di cui quello lato scavo, verticale e quelli interni, inclinati, rispettivamente di 4° e 8° rispetto alla verticale (V. Figg. 5 +7); l'allineamento più interno funge anche da parziale sostegno alla fondazione dell'edificio.

La testa delle colonne è stata inglobata in una trave di collegamento longitudinale in calcestruzzo armato. Al fine di contenere le deformazioni entro strette tolleranze e non superare la tensione ammissibile del terreno consolidato con jet-grouting, è risultata necessaria l'adozione di tiranti distribuiti su quattro ordini, attestati alle quote -3.80 , -5.70 , -8.30 e -11.30 m (vedi figg. 6 e 7).

Gli interventi esecutivi in corrispondenza del cortile sono stati simulati in sette fasi (times) successive:

- Time 1:** geostatico,
- Time 2:** scavo e fondazione degli edifici esistenti, compresa l'applicazione dei relativi carichi;
- Time 3:** esecuzione del trattamento jet-grouting;
- Time 4:** scavo fino a quota -6.30 m ed esecuzione tirantatura;
- Time 5:** scavo fino a quota -9.30 m, esecuzione del relativo rivestimento e tirantatura;
- Time 6:** scavo fino a quota -12.40 m, esecuzione del relativo rivestimento e tirantatura;
- Time 7:** completamento scavo (fino a quota -15.10 m) e relativo rivestimento;
- Time 7st:** valutazione del comportamento dell'opera nelle condizioni di cui alla time 7, ma in assenza di tirantatura.

I risultati di una serie di calcoli iterativi effettuati con il suddetto metodo hanno consentito di ottimizzare la geometria e la tipologia delle opere di contenimento degli scavi. In accostamento alla facciata del corpo E, idonea è risultata una paratia tirantata, costituita da colonne jet-grouting di diametro nominale $\phi 600$ mm, estendentisi fino a quota -19.0 m,

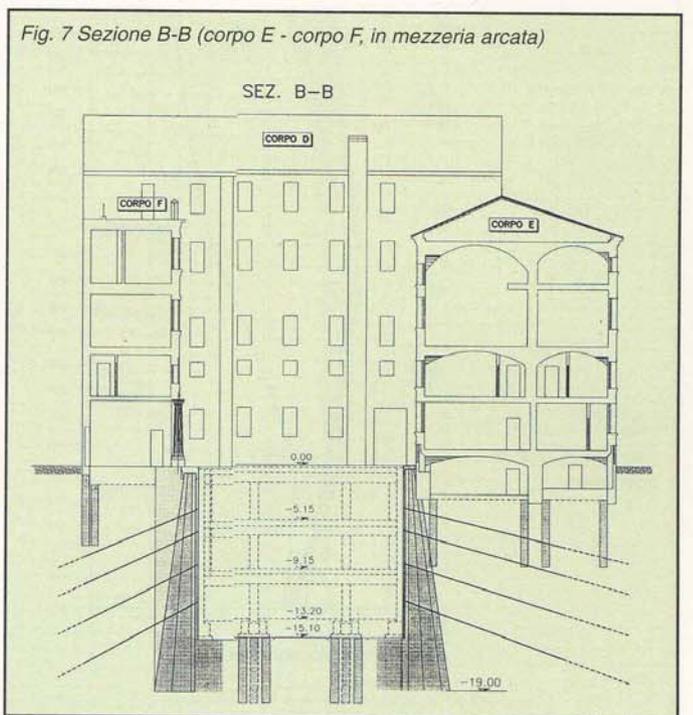


Fig. 7 Sezione B-B (corpo E - corpo F, in mezzera arcata)

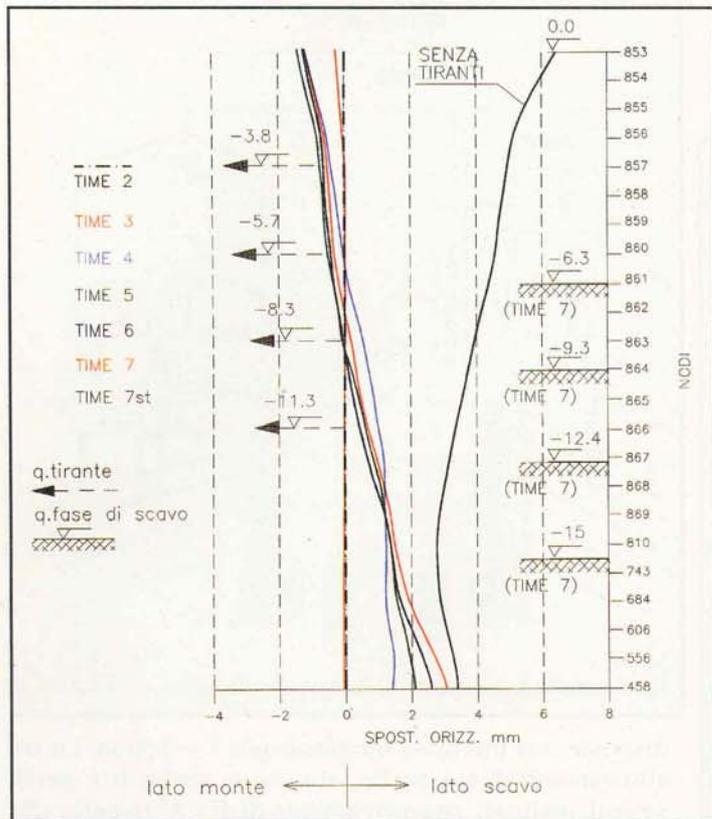
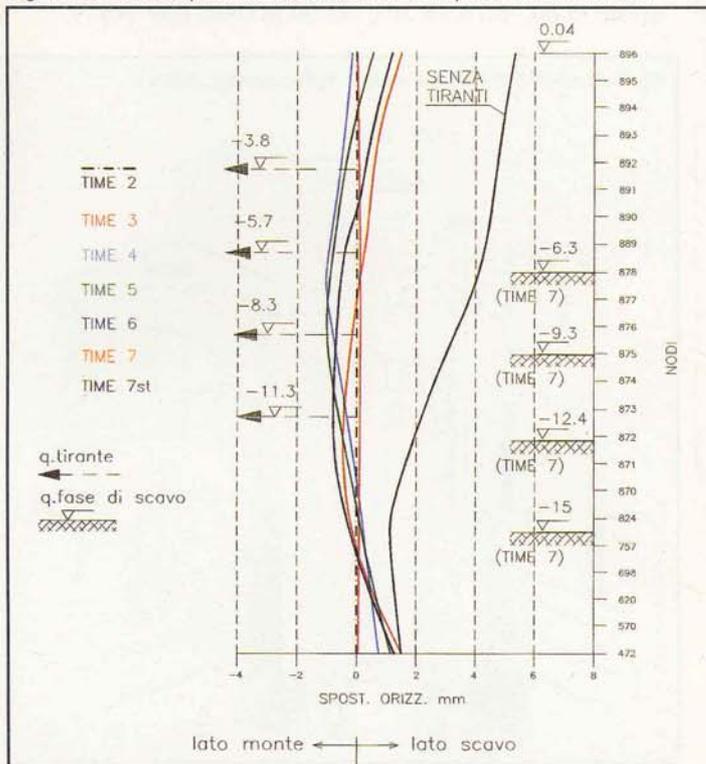


Fig. 9 Deformata opera di contenimento lato corpo E

In fig. 8 sono rappresentati gli sforzi principali relativi alla Time 7. Gli ancoraggi dei due ordini superiori, spazati 1.5 m orizzontalmente, esercitano un tiro unitario di 23 t, mentre quelli inferiori, con tiro 27.0 t, sono disposti ad interasse 1.0 m.

I suddetti tiranti, aventi funzione temporanea, sono inclinati sull'orizzontale con angolature via via crescenti a par-

Fig. 10 Deformata opera di contenimento lato corpo F, in asse colonne



tire dall'ordine superiore.

L'esame di Fig. 9 mostra come, adottando la tirantatura di cui sopra, le deformazioni orizzontali risultano sempre inferiori a 2 mm. È stata esaminata anche l'ipotesi di struttura a sbalzo, senza ancoraggi, considerando lo scavo a quota -15.00 m (time 7 st):

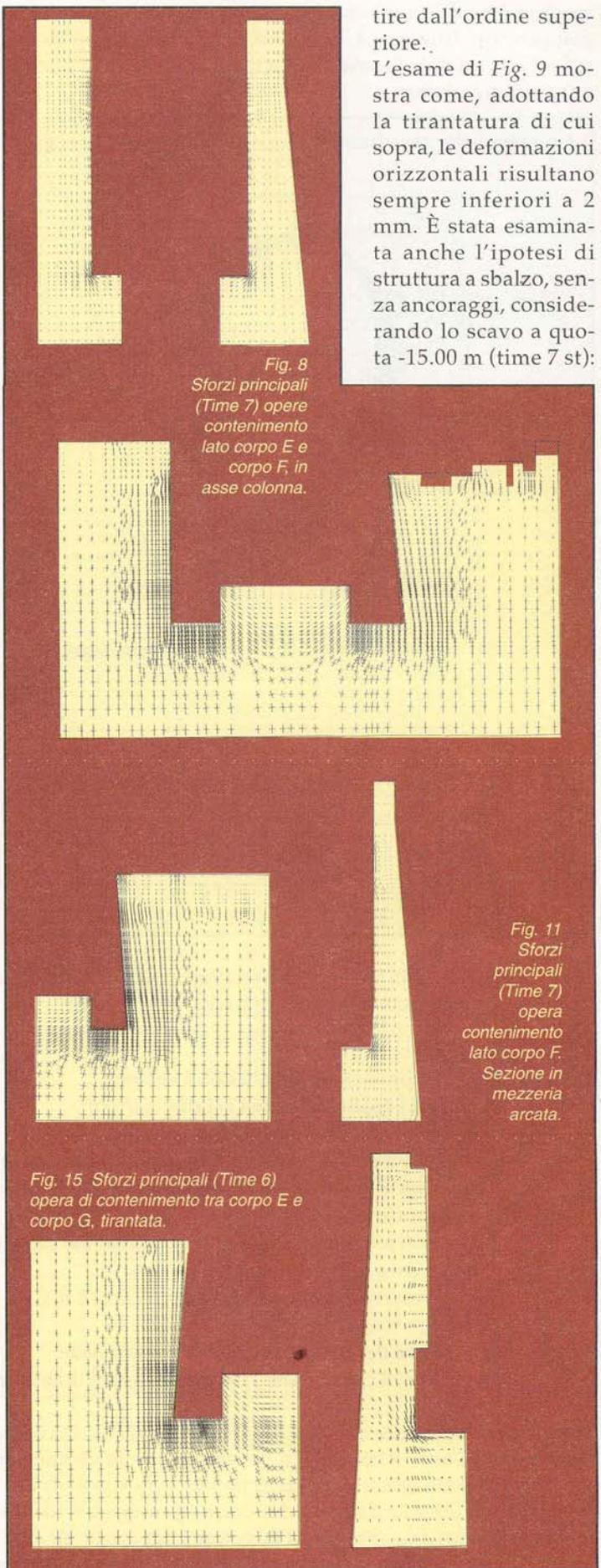


Fig. 8 Sforzi principali (Time 7) opere contenimento lato corpo E e corpo F, in asse colonna.

Fig. 11 Sforzi principali (Time 7) opera contenimento lato corpo F. Sezione in mezzera arcata.

Fig. 15 Sforzi principali (Time 6) opera di contenimento tra corpo E e corpo G, tirantata.

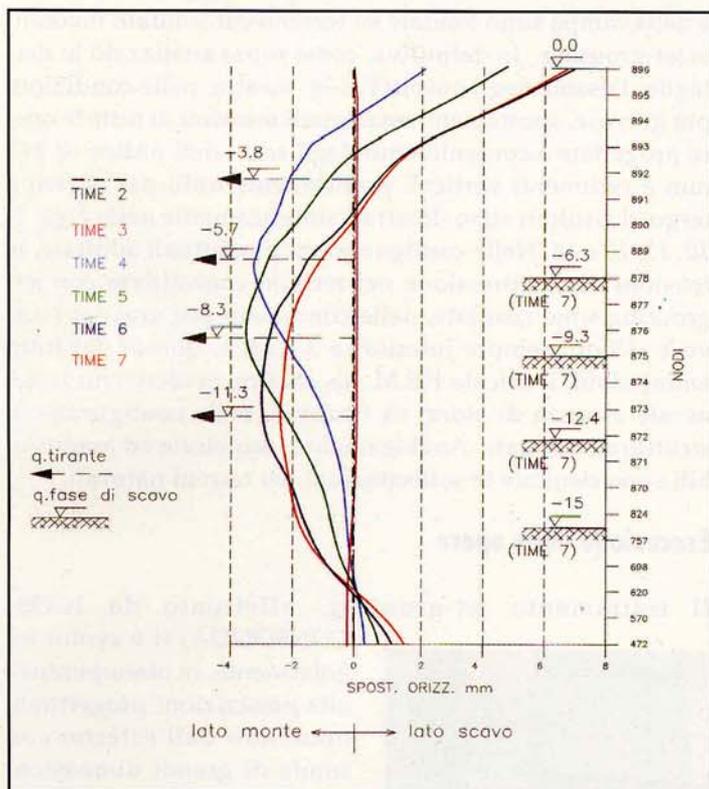
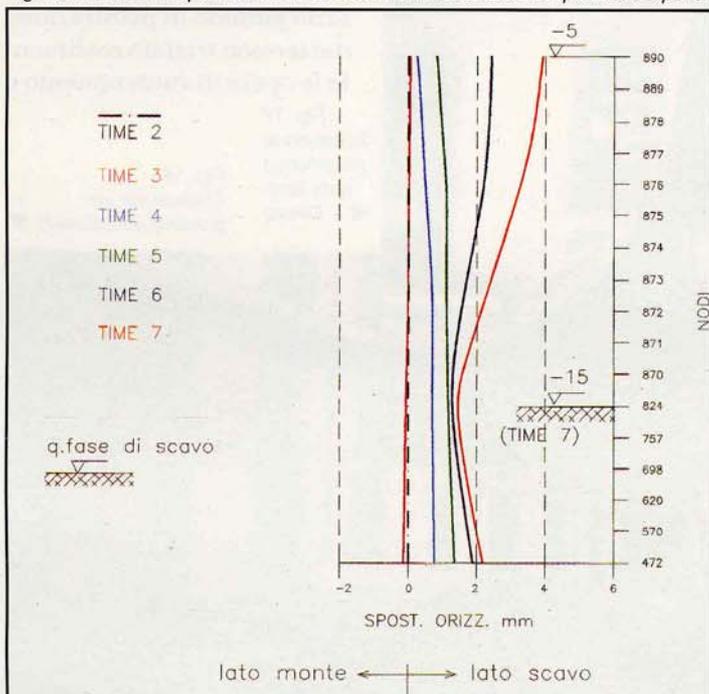


Fig. 12
Deformata opera di contenimento lato corpo F - Sezione in mezzeria arcata.

in questo caso, le deformazioni orizzontali in testa risulterebbero, superiori a 6 mm, quindi eccessive per la salvaguardia degli edifici posti in fregio.

In corrispondenza della facciata del Corpo F è stato messo a punto un intervento costituito da strutture a pozzo che, inglobando i singoli plinti delle colonne, trasferiscano, in profondità, le sollecitazioni da essi esercitate (v. Figg. 5 e 6). Nelle tratte mediane, comprese tra colonne contigue, e sul lato Nord del Corpo F, prospiciente la facciata del Cor-

Fig. 13 Deformata opera di contenimento non tirantata tra corpo E e corpo G



po G, è risultata necessaria una struttura di ritenuta costituita da due allineamenti di colonne jet-grouting ϕ 600, mm accostate e compenstrate, con interasse longitudinale $i = 0.50$ mm, attestate a quota -19.0 m (v. Figg. 5 e 7). Le colonne dell'allineamento di monte sono disposte con inclinazione 4° rispetto alla verticale, mentre verticali sono quelle lato scavo. Tutte le colonne sono collegate in testa da una robusta trave longitudinale in calcestruzzo armato. Apposite verifiche F.E.M. delle due sezioni tipiche hanno mostrato, anche in questi casi, la necessità di tirantare l'opera con quattro ordini di ancoraggi, disposti alle stesse quote di quelli previsti in corrispondenza del Corpo E (v. Figg. 6 e 7) ed esercitanti un tiro di 30 t. Come illustrato sulle Figg. 10 e 12, con la suddetta tirantatura le deformazioni orizzontali risultano sempre molto contenute (2+3 mm), tenendo in debita considerazione la continuità longitudinale della struttura, assicurata dalla presenza della trave di testata in c.a., e la conseguente congruenza degli spostamenti. Nell'ipotesi di assenza di ancoraggi (time 7 st) sono, invece, stati registrati spostamenti eccessivi (v. Fig. 10), perfino in corrispondenza della massiccia struttura a pozzo. La Fig. 11 mostra gli sforzi principali in corrispondenza della sezione mediana.

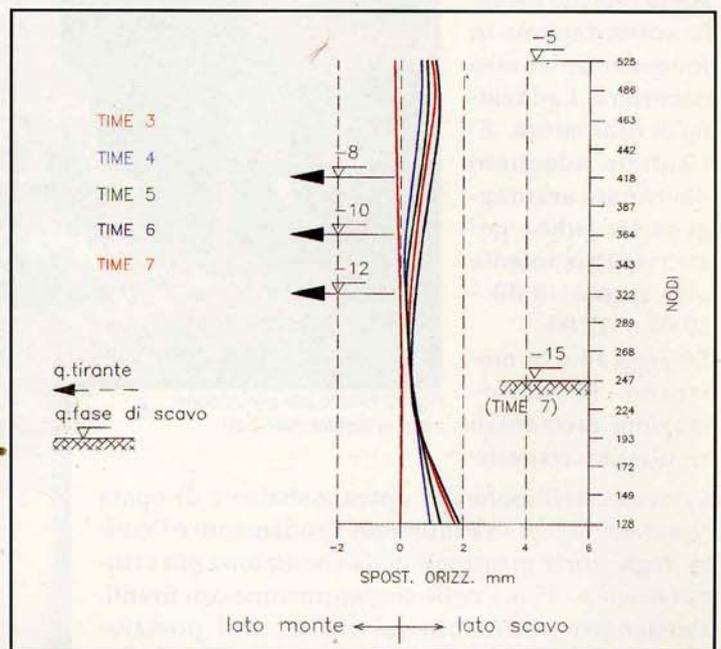


Fig. 14 Deformata opera di contenimento tirantata tra corpo E e corpo G

Sul lato del cortile prospiciente il Corpo D, la parete dello scavo deve assumere forma semicilindrica a direttrice circolare di raggio $R_1 = 8.49$ m, onde accogliere la rampa di accesso all'autorimessa. L'opera di contenimento è costituita da due allineamenti (v. Fig. 5), disposti lungo circonferenze concentriche, di colonne jet-grouting, $\phi = 600$ mm, $L = 19.00$ m, accostate e compenstrate, verticali lato scavo ed inclinate di 4° , all'interno. Nella zona mediana è stato previsto un terzo allineamento di rinforzo, inclinato di 8° verso l'interno, con funzione anche di sostegno della fondazione dell'edificio. Tutte le colonne sono inglobate in una trave di testata in c.a., continua lungo tutto il perimetro dello scavo. Grazie allo sviluppo dell'effetto-arco non è risultato necessario tirantare l'opera.

Al limite tra il Corpo E ed il Corpo G, lato ovest, la presenza del piano interrato del Corpo E e di opere di sottofondazione precedentemente eseguite, nell'ambito dei lavori di ristrutturazione del Corpo G, richiedevano una struttura di contenimento di altezza dell'ordine di 10.0 m, decisamente inferiore, quindi, a quella descritta nelle pagine precedenti. Analisi con il Metodo degli Elementi Finiti, articolate su 7 times, hanno indicato come ottimale l'adozione di un'opera di sostegno costituita da colonne jet-grouting ϕ 600 mm, accostate e compenstrate, disposte su due allineamenti paralleli: verticale quello lato scavo ed inclinato di 4° rispetto alla verticale quello a monte. In sommità, è prevista una trave di collegamento in c.a.. Nell'ipotesi di un'opera a sbalzo, l'analisi ha evidenziato il manifestarsi, anche se in zone di limitata estensione, a livello fondo scavo, di sforzi di trazione, nel jet-grouting, relativamente elevati, con conseguente superamento della resistenza ultima. I suddetti fenomeni e la necessità di contenere le deformazioni orizzontali entro limiti ristretti, a salvaguardia dell'integrità dell'adiacente Corpo E, il cui muro di spina esercita elevate sollecitazioni in fondazione, ha reso necessaria l'adozione di tirantatura. È risultato adeguato distribuire ancoraggi su tre ordini, posti rispettivamente alle quote -8.00 - 10.00 e -12.00.

Le Figg. 13 e 14 mostrano le deformazioni orizzontali risultanti, rispettivamente, nell'ipotesi di opera a sbalzo e di opera tirantata; in Fig. 15 è illustrato l'andamento e l'entità degli sforzi principali nella condizione più critica (scavo a -15 m), nella configurazione con tiranti. Particolare attenzione ha richiesto il posizionamento, sia longitudinale che verticale, dei suddetti tiranti, onde evitare interferenze con la tirantatura dell'adiacente opera, prevista in fregio alla facciata del Corpo E. Al piede delle paratie in jet-grouting, a contenimento degli scavi, il progetto prevede l'esecuzione di una doppia fila di colonne jet-grouting, disposte con interasse 1.0 m, estese da fondo scavo a quota -19.00 m. Quest'intervento, effettuato prima degli scavi, ha il duplice scopo di consolidare la fondazione dei muri perimetrali di rivestimento in c.a. (su cui insisteranno i solai dell'autorimessa) e di formare un valido contrasto orizzontale al piede dell'opera di sostegno. Le altre strutture d'appoggio dei solai dell'autorimessa

e della rampa sono fondate su terreno consolidato mediante jet-grouting. In definitiva, come sopra analizzato in dettaglio, l'esame degli output F.E.M. mostra, nelle condizioni più gravose, spostamenti orizzontali massimi di tutte le opere progettate a contenimento degli scavi dell'ordine di 2+3 mm e cedimenti verticali praticamente nulli nei terreni a tergo. I risultati sono illustrati sinteticamente nelle Figg. 9, 10, 12, 13 e 14. Nelle configurazioni progettuali adottate, le tensioni di compressione nel terreno consolidato con jet-grouting sono risultate, nelle condizioni più gravose (scavo a -15 m), sempre inferiori a 3.3 MPa, quindi del tutto ammissibili; il calcolo F.E.M. ha, inoltre, evidenziato la generale assenza di sforzi di trazione, nelle configurazioni strutturali adottate. Analogamente, contenute ed ammissibili sono risultate le sollecitazioni nei terreni naturali.

Esecuzione delle opere

Il trattamento jet-grouting, effettuato da ICOS-CONSONDA, si è svolto regolarmente, in ottemperanza alle prescrizioni progettuali, operando dall'esterno con sonde di grandi dimensioni (Figg. 16 e 17), in corrispondenza del cortile. Sonde di dimensioni più contenute sono state usate per l'esecuzione della paratia tra i Corpi E e G (Fig. 19). Gli interventi di sottofondazione hanno, invece, richiesto attrezzature particolari, in grado di operare all'interno di ambienti di altezza dell'ordine di due metri. Dopo il necessario periodo di maturazione del terreno trattato costituente le opere di contenimento e

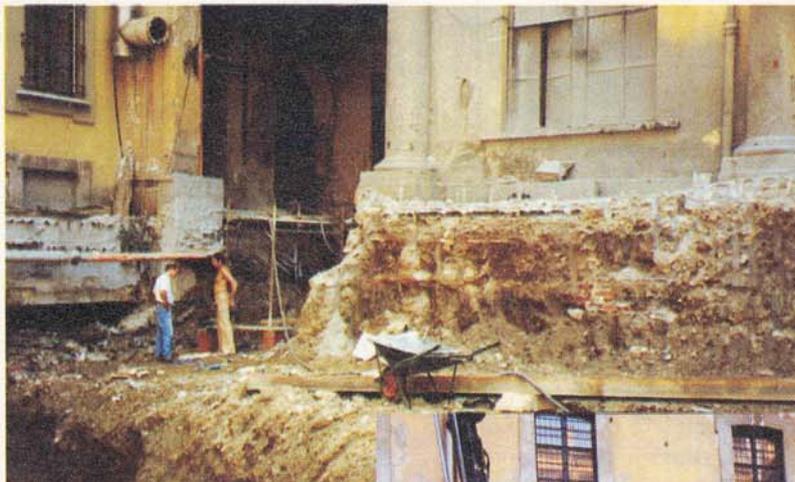


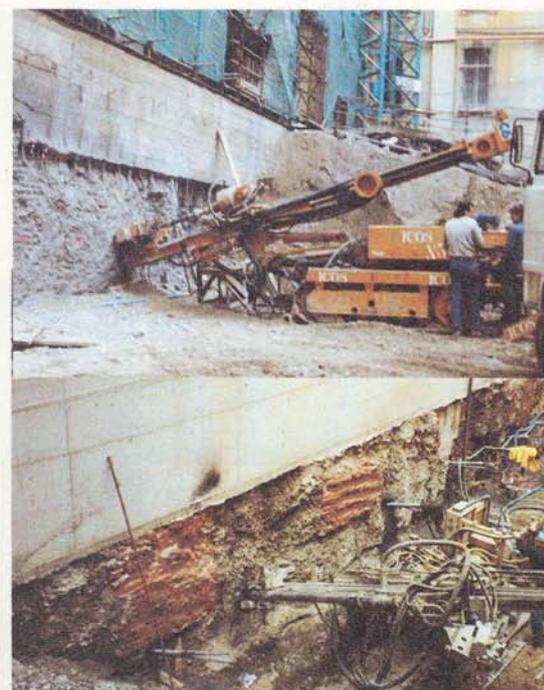
Fig. 18 Scavo per esecuzione trave di testata (lato Est) ▲



Fig. 17
Esecuzione
jet-grouting
(lato Sud-
Ovest) ◀

Fig. 16
Esecuzione jet-
grouting (lato Ovest) ▼

la realizzazione della trave di testata in c.a. (Fig. 18), si è proceduto all'esecuzione degli scavi in corrispondenza del cortile e, contemporaneamente, sotto il Corpo G, procedendo per ribassi successivi di altezza dell'ordine di 3 m. La parete esposta dopo ogni fase di scavo veniva rivestita, previa regolarizzazione, con rete elettrosaldata e spritz-beton (Figg. 20, 22, 28 e 29). Le suddette operazioni mostravano l'otti-



gioni operative, la parete è rimasta esposta, in questa condizione (Fig. 32), per circa un anno.

Il rivestimento definitivo in c.a., costituente la parete della rampa di accesso è stato realizzato a partire dal basso.

Fig. 20 Perforazione tiranti I ordine (lato Est)

Il comportamento delle opere di contenimento degli scavi e di sottofondazione, nonché quello dei fabbricati, è stato tenuto sotto controllo durante tutte le fasi operative mediante frequenti rilevazioni inclinometriche, entro appositi tubi infissi nell'ammasso con-

Fig. 21 Scavo a - 4.5 m, ▲ installazione tiranti I ordine (lato Ovest)

Fig. 19 Esecuzione jet-grouting sotto corpo G (paratia tra corpo E e corpo G)

Figg. 22-23 Operazioni di scavo a -6 m, circa (lato Nord-Ovest)



solidato, e con livellazioni topografiche di precisione, su mire fisse applicate sulle facciate perimetrali al cortile. Le suddette rilevazioni hanno innanzitutto permesso di verificare che l'esecuzione dei trattamenti jet-grouting, con

ma riuscita volumetrica del trattamento (Figg. 21, 25, 28 e 30) e la sua elevata resistenza meccanica. Venivano susseguentemente perforati i fori per i dispositivi di ancoraggio (Figg. 20, 21, e 24), quindi, inseriti e cementati i tiranti, costituiti da barre Dywidag ϕ 26.5 mm; successivamente, veniva gettato il rivestimento definitivo in c.a. e, dopo maturazione, venivano tesati i tiranti.

La parete Sud dello scavo, di forma cilindrica, prospiciente il corpo D e non tirantata, è stata rivestita fino alla sua base con rete elettrosaldata e spritz-beton (Figg. 29 e 32). Per ra-



Fig. 29 Jet-grouting esposto in corrispondenza della parete Sud dello scavo.

pressioni di mandata dell'ordine di 40 MPa non ha provocato alcun fenomeno di cedimento e/o di sollevamento del terreno, nè degli edifici. Durante le successive fasi di scavo, le misure inclinometriche hanno mostrato deformazioni orizzontali massime, delle opere di sostegno, dello stesso ordine di quelle previste in progetto. In Fig. 33 è riportato il risultato di letture inclinometriche tipiche, relative alle fasi finali di scavo.

Al di sotto del Corpo G, precedentemente ristrutturato, si è proceduto allo scavo per



Fig. 25 ▲
Scavo a ~ -6.5 m
(lato Est);
installazione
tiranti II ordine

Fig. 24
Perforazione
tiranti
(lato Nord-Est) ▶



Figg. 26-27 Scavo a - 12 m, circa (lato Nord Est) ▲▶



Fig. 34 Operazioni di scavo sotto il corpo G.

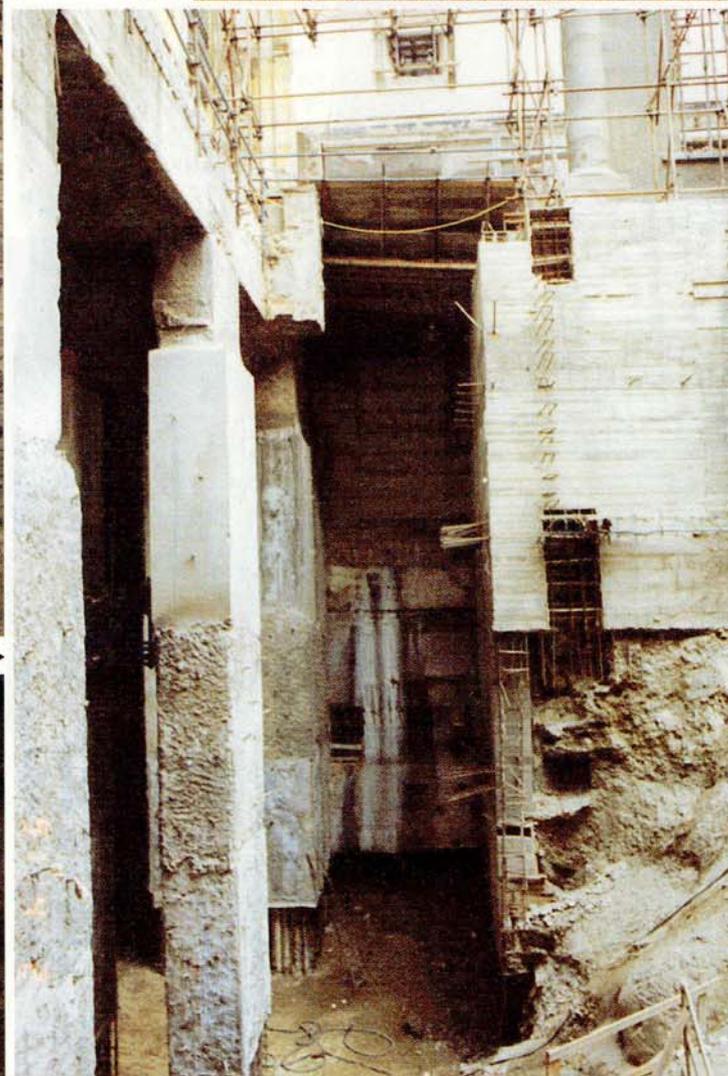




Fig. 29 Scavo a -12 m, circa (lato Sud) ▲



Fig. 30

Scavo a -12 m (foto Sud): terreno consolidato (particolare)

Fig. 31 Scavo a -13 m circa, (lato Est) ▼



Fig. 32

Scavo a -15.0 m (lato Sud)

DIAGRAMMI INCLINOMETRICI TIPICI

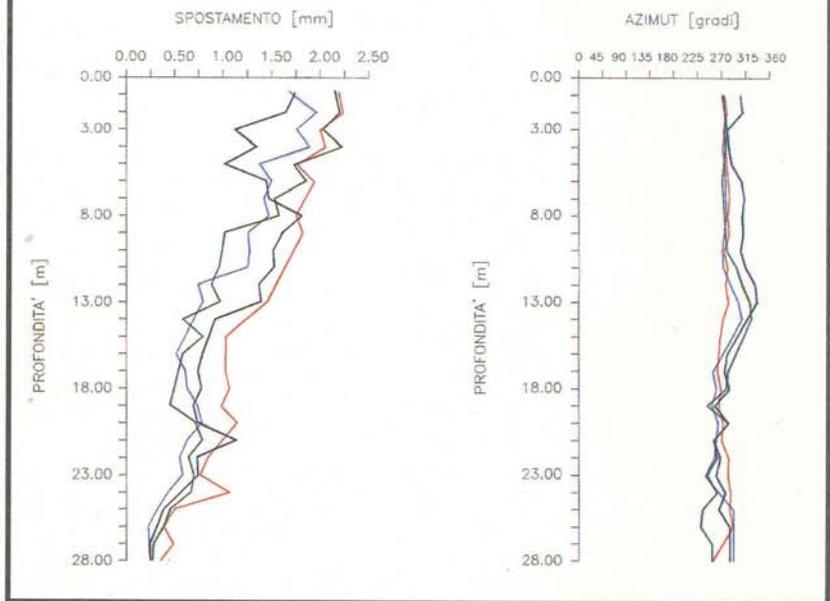


Fig. 33 Diagrammi inclinometrici tipici

fasi successive ed al contemporaneo rivestimento in c.a., previa accurata ripulitura e sabbatura, dei fasci di micropali su cui l'edificio stesso è fondato (Fig. 34), provvedendo, inoltre, ad ancorare con tiranti le paratie laterali esistenti. I solai dell'autorimessa sono stati fondati su terreno consolidato mediante jet-grouting. I lavori di costruzione si sono svolti regolarmente e senza intralci, secondo i programmi prestabiliti, grazie anche alla perizia ed all'organizzazione dell'Impresa generale, 2 ERRE s.c.r.l., esecutrice dei lavori, ed all'efficienza dell'Impresa specializzata (ICOS-CONSONDA).

BIBLIOGRAFIA

- Lunardi P. - Nouvelle Méthode de construction des écrans d'étanchéité dans les barrages en remblai, XIV International Congress on Large Dams, Rio de Janeiro, 1982.
- Louis C., Lunardi P. - Consolidation des sols par la technique de jet-grouting. - Etat des connaissances et expériences. Colloque International "Renforcement en place des sols et des roches", Paris, 1984.
- Tornaghi R. - Trattamento colonnare dei terreni mediante gettiniezione (jet-grouting), XVII Convegno di Geotecnica, Taormina, Aprile 1989.
- Golinelli G., Lunardi P., Perelli Cippo A. - La prima applicazione del jet-grouting in orizzontale come precontenimento dello scavo di gallerie in terreni incoerenti, International Conference on "Soil and Rock Improvement in Underground Works", Milano, 1991.
- Lunardi P. - L'impiego del jet-grouting per l'attacco di gallerie in terreni soffici, International Conference on "Soil and Rock Improvement in Underground Works", Milano, 1991.
- Sanella A. - Jet-grouting: aspetti operativi generali; utilizzo in galleria e considerazioni sull'impiego di boiacche con sabbia, International Conference on "Soil and Rock Improvement in Underground Works", Milano, 1991.
- Lunardi P. - Il consolidamento del terreno mediante jet-grouting. Quarry and Construction, Marzo 1992.
- Pagni Frette M. - Le opere di protezione degli scavi per risolvere i problemi di fondazione in zone urbane. Costruzioni, Settembre 1992.
- Lunardi P., Arrigoni E. - Fondazioni di un viadotto stradale su terreni altamente compressibili. Fondazioni del viadotto. Quarry and Construction, Ottobre 1995.