

L'ammaloramento delle strutture della fossa interna della città di Milano

Sistemi di rafforzamento statico e risultati

A. GENTILE *

SOMMARIO: Il deflusso di scarichi industriali nelle fognature e nei corsi d'acqua coperti è il fattore determinante della degradazione delle strutture in calcestruzzo semplice e in particolar modo di quello armato. Lo studio illustra il sistema usato per il riempimento, con materiale sciolto compattato artificialmente, dei vani sotterranei di un corso d'acqua milanese, le cui strutture sono state corrose da agenti chimici provenienti da una zona a forte concentrazione industriale, ubicata a nord di Milano. Nei vari capitoli sono illustrati gli aspetti visibili della degradazione del calcestruzzo, ampiamente documentati fotograficamente, alcune ipotesi sui processi chimici verificatisi, le indagini sull'ampiezza e il grado di ammaloramento e il nuovo assetto idrologico conseguente alla chiusura del corso d'acqua, decisa in seguito all'accertamento della pericolosità delle strutture di copertura, incapaci di sopportare ulteriormente l'intenso traffico veicolare. Con particolare riguardo sono trattati la scelta del sistema di rafforzamento delle strutture, un sistema sperimentale, e quello adottato, consistente nell'immissione di materiale inerte nel vano sotterraneo, attraverso fori ricavati nella copertura; infine sono analizzati gli interessanti risultati forniti dalle prove penetrometriche e dalle iniezioni di malta cementizia, eseguite nel corpo del riempimento.

1. Notizie storiche.

La Fossa Interna, o Cerchia dei Navigli, oggi soppressa, fu scavata nel 1155 sotto la direzione di Mastro Guglielmo da Guintellino ed ebbe come originaria destinazione quella di secondo fossato di difesa della città, esterno a quello che già cingeva l'antico centro romano.

Il primo fossato, che ancora oggi, ridimensionato e tombinato, si conserva nel sottosuolo cittadino, con i nomi di Piccolo e Grande Seveso, era inizialmente alimentato dalle acque del Torrente Seveso; poi, in seguito alla intercettazione delle acque del Seveso per l'alimentazione della Fossa Interna, nel fossato romano furono convogliate le acque del Torrente Nirone.

La storia della Fossa è densa di avvenimenti: fu distrutta per due volte da Federico Barbarossa e ricostruita con rinnovata tenacia dai milanesi; nel 1171 venne allargata, approfondita e munita di porte e torri; nel 1497 fu resa navigabile da Leonardo da Vinci su incarico di Ludovico il Moro, mediante restringimento dell'alveo, innalzamento del fondo e alimentazione con il Naviglio della Martesana; divenne vettore di acque irrigue; alimentò bagni pubblici; fu sbarrata per ricavarne forza motrice (« Cioccolato Viola » di via Borgo-

nuovo).

Come canale navigabile servì per il trasporto dei marmi di Candoglia fino in piazza del Duomo: allo scopo venne realizzato e utilizzato il « laghetto dell'ospedale », ubicato sotto l'attuale via Laghetto.

Il percorso della Fossa Interna (fig. 1) non si discosta dall'attuale circonvallazione interna: cioè le vie S. Marco, Fatebenefratelli, Senato, San Damiano, Visconti di Modrone, Francesco Sforza, Santa Sofia e Molino delle Armi; da quest'ultima aveva origine la Roggia Vettabbia, che ancora oggi conserva la sua antichissima funzione di canale irriguo a servizio di un vasto comprensorio, sito a sud-est di Milano.

Delle originarie trentaquattro opere di presa, per derivazione di acque irrigue, fino a qualche anno fa ne esistevano ancora quattro: i cavi Borgognone, Sala (o della Pace) e Bolagnos e la roggia Vettabbia.

La copertura della Fossa Interna venne realizzata negli anni trenta, per ragioni igieniche e viabilistiche, con strutture diverse: travi e solette su due o tre appoggi e solettone pieno (armato con travi in ferro a doppio T) su due appoggi.

La sezione idraulica, pertanto, divenne quanto mai varia; sezione a un canale in via S. Marco e in corrispondenza di alcuni attraversamenti radiali, a due canali in via Fatebenefratelli e a tre canali lungo il rimanente percorso.

* Dott. Ing. Antonio GENTILE, Capo Sezione studi e progettazioni fognature e corsi d'acqua, Ufficio Tecnico del Comune - Milano.

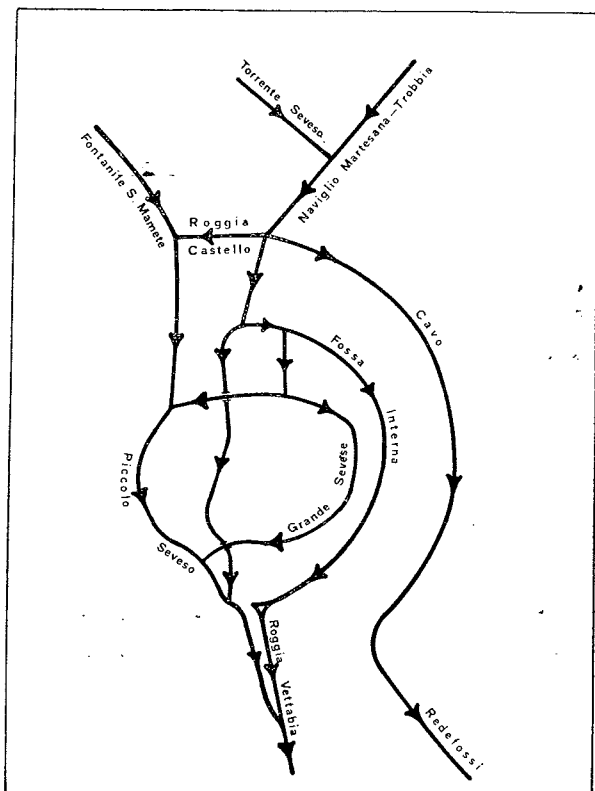


Fig. 1.

2. L'azione aggressiva delle acque.

Le strutture di copertura in c.a., realizzate negli anni trenta, rispondevano alle esigenze dell'epoca: infatti esse erano state dimensionate per un traffico veicolare largamente inferiore a quello attuale, sia per intensità che per entità; le acque che percorrevano la Fossa erano quelle provenienti dal bacino imbrifero del Seveso e quelle derivate dal Fiume Adda (Naviglio Martesana), note, soprattutto quest'ultime, per la loro limpidezza.

A partire dall'ultimo dopoguerra, si iniziò l'incontrollato sviluppo industriale e il conseguente insediamento residenziale in tutta l'area scolante del Seveso e, in minor misura, in quella del Naviglio della Martesana, cui conseguì l'utilizzazione del Seveso come recapito di scarichi industriali e di acque ordinarie e meteoriche, senza che venissero presi i necessari provvedimenti per prevenire l'inquinamento delle acque superficiali e della falda sotterranea e i prevedibili allagamenti degli abitati di San Donato Milanese e San Giuliano Milanese ad opera del Cavo Redefossi, il quale, da tempo immemorabile, non è altro che la continuazione del sistema idraulico Seveso-Martesana.

Alcune analisi delle acque del Torrente Seveso [GAITO, NESPOLI, SCOTTI, 1958] fecero riscontrare

valori molto bassi del pH (valori minimi intorno a 2): in quella occasione furono rilevati, al punto di prelievo di via Ornato, 41 casi di pH inferiore a 4 e 21 casi di pH inferiore a 3.

Un'indagine più recente [DE STEFANI, 1962] ha confermato le rilevazioni di quella precedente e ha indicato nel tratto vallivo del Seveso quello più fortemente contaminato (pH minimo da 2,40 a 3,85).

Il DE STEFANI nel suo interessante studio conclude così: « il Torrente Seveso appare per un lungo tratto caratterizzato da un inquinamento assai elevato, che trova confronto in casi piuttosto limitati della letteratura inerente altre acque correnti d'Italia. Questo giudizio vale soprattutto quando si tenga conto della persistenza con cui il fenomeno si manifesta ».

Una conferma pratica dei risultati delle analisi è fornita dalla completa assenza nel Seveso vallivo di fauna ittica e dall'continue lamentele degli agricoltori del comprensorio di Vettabia per i danni alle colture, letteralmente bruciate dagli scarichi industriali, nonché dalle profonde degradazioni subite dalle strutture in calcestruzzo della Fossa Interna, evidenziate da porosità, rigonfiamenti e sgretolamenti, e dalla ossidazione e dalla corrosione elettrochimica delle armature in ferro (figg. 2 e 3).

Infatti, le sezioni resistenti del calcestruzzo e del ferro d'armatura presentano sensibili riduzioni; in molti casi si nota la rottura dei ferri dell'armatura inferiore delle travi, la completa scomparsa delle staffe e dei ferri di ripartizione delle solette (figg. 4, 5 e 6).

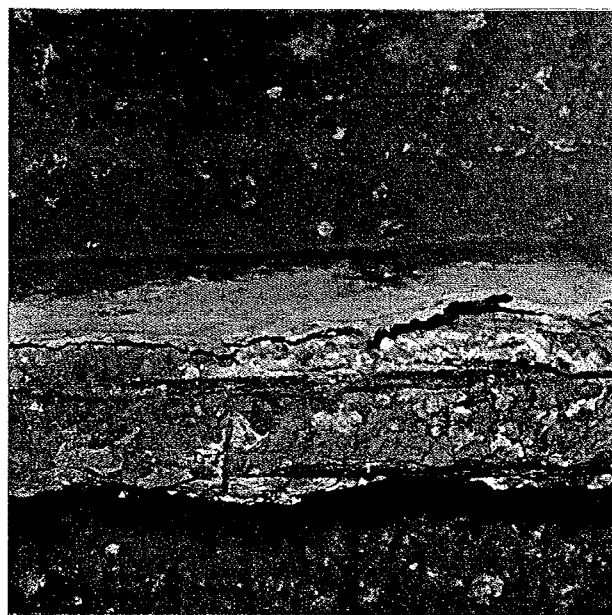


Fig. 2.

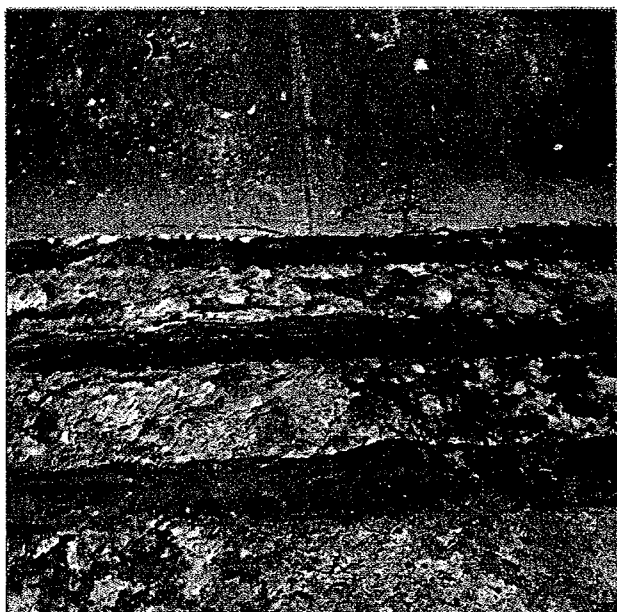


Fig. 3.

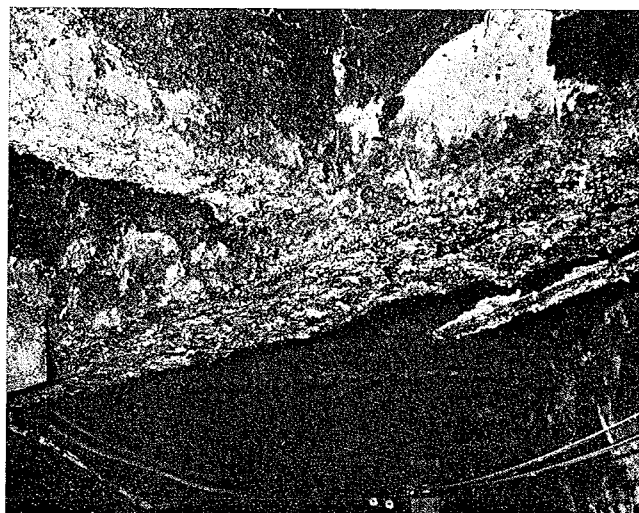


Fig. 5.

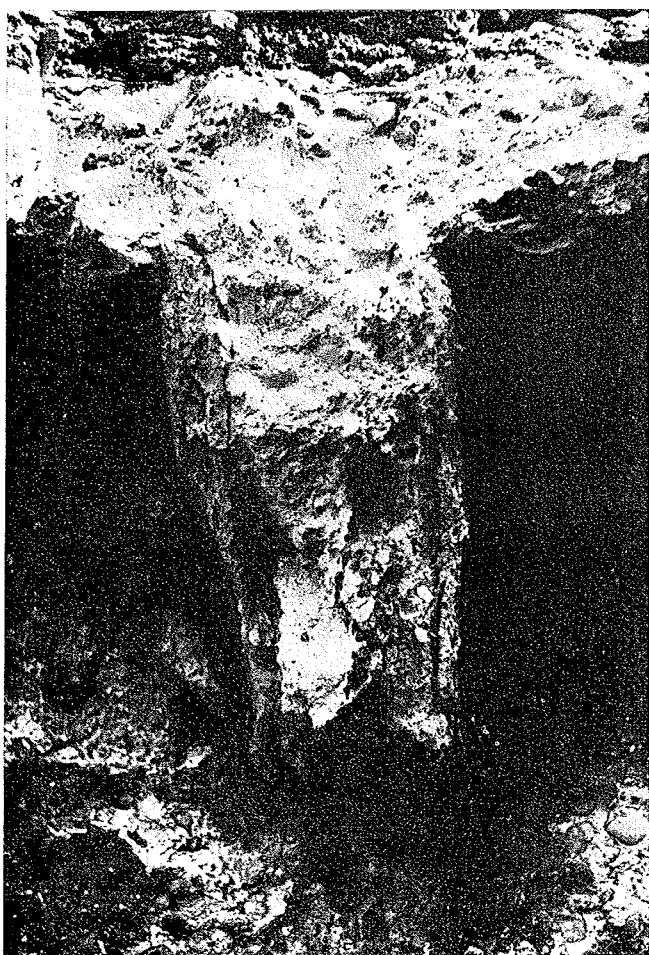


Fig. 4.

La dinamica della degradazione del calcestruzzo può spiegarsi con la formazione di composti facilmente lisciviabili in acqua, che vengono asportati dall'acqua stessa, con conseguente creazione

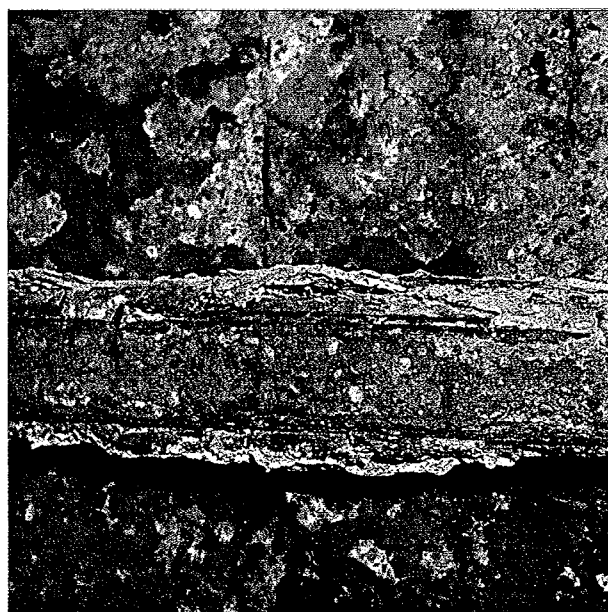


Fig. 6.

di cavità e porosità che aprono la strada all'aggressione di zone sempre più profonde.

Questi fenomeni si manifestano con particolare evidenza e drammaticità in corrispondenza dei salti di fondo delle vecchie conche di navigazione, ove il ribollire delle acque sprigiona notevoli quantità di gas prevalentemente acidi, che si combinano con l'acqua di condensa generando composti a forte concentrazione.

Ad esempio, l'acido solforico (acido non volatile), contenuto nelle acque in debole concentrazione, può subire per azione batteriologica una riduzione e trasformarsi in idrogeno solforato, sostanza gassosa che può liberarsi dall'acqua e raggiungere la copertura, rimanendo assorbito nel-

la stessa; poi intervengono altri batteri, di natura aerobica, che favoriscono la reazione di ossidazione dell'idrogeno solforato, trasformandolo nuovamente in acido solforico a forte concentrazione; pertanto, l'acido solforico contenuto nell'acqua a debole concentrazione può, mediante questa trasformazione, amplificare la sua azione aggressiva sul calcestruzzo e sul ferro.

La calce e la magnesia allo stato libero possono idratarsi lentamente, producendo, anche a distanza di tempo, rigonfiamenti e screpolature, che conferiscono carattere « espansivo » al calcestruzzo, facilitando così lo scoprimiento e l'aggressione del ferro.

La presenza di solfato di calce nel cemento Portland genera, partendo da alluminato tetracalcico, solfoalluminati espansivi, poco resistenti alle acque aggressive, che costituiscono la causa principale accertata della distruzione del calcestruzzo per disgregazione.

L'attacco del ferro è dovuto principalmente al fenomeno di corrosione elettrochimica che s'innescia in presenza d'acqua o d'umidità e dà luogo a depositi di ruggine, che si presentano sotto forma spugnosa e non aderiscono al metallo (fig. 3).

La presenza di elettroliti che imbevono lo strato di ruggine, accelera il processo corrosivo in quanto danno luogo ad azioni secondarie (pile di concentrazione) che esasperano il fenomeno.

La massa spugnosa di ossidi ed il ferro ancora integro vengono aggrediti dalle sostanze acide presenti nell'ambiente e trasformati in sali solubili in acqua, com'è confermato visivamente dai solchi visibili nel calcestruzzo (fig. 6) e da suggestive protuberanze, a forma di stalattiti, di color giallo-arancio.

3. Le indagini sullo stato di ammaloramento delle strutture.

« Lo stato di grave ammaloramento si estende all'intera Fossa Interna senza soluzione di continuità »: questo, in sintesi, il risultato di ispezioni e sondaggi effettuati da squadre di tecnici durante le brevi interruzioni (asciutta primaverile e autunnale) del flusso d'acqua.

Nei tratti più pericolanti vengono eseguite incastellature in legname (sottoponti), periodicamente controllate per la sostituzione delle parti soggette alle escursioni di livello e del legname maggiormente sollecitato; tutto ciò in ambiente reso malsano da ristagni d'acque putride.

Nel 1967, l'Amministrazione comunale milanese insedia una commissione di esperti (specializzati

nel campo statico e idraulico), perché effettuino un'ulteriore accurata ispezione alle strutture ed accerti lo stato e l'estensione del loro ammaloramento, nonché la pericolosità delle stesse, in relazione alle diminuite capacità di resistenza e alle nuove e più gravose condizioni d'esercizio.

Si eseguono, così, sopralluoghi, rilievi, sondaggi, carotaggi, prove sclerometriche e documentazioni fotografiche; poi si procede alle prove di laboratorio su numerosi provini di calcestruzzo, estratti mediante carotaggio, e di ferro, che vengono sottoposti a prove distruttive.

Le visite consentono la localizzazione dei punti più pericolanti, che vengono rinforzati, mentre le prove di laboratorio sui materiali denunciano le diminuite capacità di resistenza del ferro e del calcestruzzo.

Si passa poi al calcolo delle tensioni unitarie nel calcestruzzo, indotte dalle sollecitazioni di taglio e dai momenti positivi e negativi, che risultano largamente superiori a quelli ammissibili, benché nei calcoli non si sia tenuto conto della riduzione delle sezioni, per effetto della degradazione del calcestruzzo, che, fra l'altro, annulla l'aderenza fra ferro e calcestruzzo, impedendo il normale funzionamento resistente della sezione mista.

Alla fine delle indagini, attesa la particolare pericolosità delle strutture e la presenza di profonde lesioni nei muri verticali, indice quest'ultime di notevoli assestamenti delle fondazioni, la commissione dispone l'immediata chiusura al traffico veicolare di quasi tutte le strade soprastanti alla Fossa Interna, proponendo nel contempo il rinforzo delle strutture con sottoponti in legname solo in corrispondenza delle vie di penetrazione radiale e lungo la via Senato.

4. Gli studi idraulici.

Contemporaneamente agli studi sulle residue possibilità statiche delle strutture vengono avviati quelli collegati, dal punto di vista idraulico, con la chiusura della Fossa Interna:

— reperimento di altre fonti per l'alimentazione dei quattro corsi d'acqua ancora derivati;

— ricerca di un sistema idraulico equivalente per scolmare le piene del Cavo Redefossi.

Il primo problema viene risolto alimentando il Cavo Bergognone con acqua derivata dal Cavo Redefossi in piazza Cinque Giornate, il Cavo Sala mediante collegamento con il Bergognone in viale Molise, la Roggia Vettabbia attraverso un collegamento con il Cavo Ticinello in via Col Moschin

e, infine, il Cavo Bolagnos con collegamenti alla Vettabbia.

Recentemente è stato effettuato il collegamento tra il Seveso-Martesana e la Roggia Vettabbia, mediante il Piccolo e Grande Sevese.

Con queste nuove fonti di alimentazione il Bergognone e il Sala conservano le stesse acque inquinate della Fossa Interna, ora dirottate nel Redefossi, mentre la Vettabbia e il Bolagnos, alimentati con acque provenienti dal Ticino, beneficiano di acque qualitativamente migliori, con grande vantaggio per le colture fino a poco tempo fa rovinate dalle acque inquinate del Seveso.

Il secondo problema viene risolto scolmando le acque di piena del Cavo Redefossi⁽¹⁾ con un canale, a sezione interna 2,00 x 2,00 m, completamente tombinato che percorre, convogliando una portata di circa 9 mc/sec, la via S. Marco dentro le strutture della Fossa Interna, occupando solo una parte del vano libero; all'incrocio con la via Fatebenefratelli si biforca originando un primo ramo che recapita le acque del grande Sevese, tramite il Cavo Borgonuovo, e un secondo che affluisce nel Piccolo Sevese, attraverso la canalizzazione di corso Garibaldi (fig. 1).

Il recapito finale di entrambi è costituito dalla Roggia Vettabbia, che riceve per altra via le acque che prima le erano convogliate dalla Fossa Interna.

Viene, inoltre, riattivata la Roggia Castello, da tempo soppressa, capace di una portata di circa 3,800 m³/sec.

In definitiva, la Fossa Interna, capace di scolmare 10,140 mc/sec, viene sostituita da un sistema idraulico, in grado di alleggerire il Cavo Redefossi di circa 12,800 mc/sec e di consentire anche la diversione delle acque di magra, mediante un sistema di paratoie, per lo spurgo e la manutenzione del Cavo Redefossi.

5. La scelta del sistema di rafforzamento statico delle strutture.

Per il rafforzamento statico delle strutture pericolanti della Fossa Interna, scartata l'idea di realizzare subito una linea metropolitana o una sottovia per motivi di disponibilità finanziarie, in relazione ai programmi prioritari dell'Amministrazione comunale, vengono studiate e sottoposte al-

(1) Il Cavo Redefossi ha origine in via Monte Grappa, ove riceve, costituendone la continuazione, le acque del Seveso, del Trobbia e della Martesana [COLUMBO, 1942].

l'esame della Commissione cinque soluzioni principali:

- 1) puntellazione in legname per traffico veicolare leggero;
- 2) puntellazione in legname per traffico veicolare pesante;
- 3) riempimento con materiale sciolto e bloccaggio delle strutture con calcestruzzo magro fluido;
- 4) riempimento con materiale cementato;
- 5) nuova struttura grezza in c.a.

La prima soluzione, consistente nella costruzione di sottoponti in legname (a sostegno delle travi) atti a sopportare il traffico veicolare leggero, pur considerata di rapida esecuzione e di costo relativamente basso (circa 500 milioni), viene scartata perché non risolve il problema igienico (convogliamento degli scarichi di acque ordinarie e meteoriche di parte della cerchia interna ancora immessi nella Fossa), per le sue caratteristiche di provvisorietà, per la continua sorveglianza necessaria per la sostituzione delle parti soggette alle escursioni di livello e di quelle maggiormente sollecitate, per l'elevato costo di manutenzione (circa 40 milioni annui) e, infine, per le precarie condizioni igienico-sanitarie dell'ambiente in cui si sarebbero dovuti svolgere i lavori.

La seconda viene eliminata in quanto assomma ai lati negativi della prima un costo doppio sia per l'esecuzione (circa un miliardo) che per la manutenzione (circa 80 milioni annui).

La terza, consistente nel riempimento del vano con materiale sciolto e nel bloccaggio delle strutture non calcestruzzo, è quella prescelta in quanto, con una spesa presunta di 670 milioni⁽²⁾, non pregiudica l'eventuale riutilizzazione del vano sotterraneo (linea metropolitana, sottovia, parcheggi, ecc.), rappresentando nel contempo una soluzione semipermanente in grado di assicurare la circolazione di mezzi pesanti con spese manutentive di modesta entità (iniezioni cementizie, rappezzi stradali, ecc.).

Tale soluzione, comunque, consente in qualunque momento la cementazione del materiale sciolto, qualora si decida di non riutilizzare il vano, oppure l'esecuzione di iniezioni cementizie per l'ulteriore bloccaggio, nel caso in cui si verificino sensibili assestamenti dello strato di riempimento e ritiro del calcestruzzo fluido.

(2) Spesa ridottasi a consuntivo a L. 370 milioni (per riempimento, fognatura, cunicolo servizi e ripristino stradale).

La quarta, avente caratteristiche di riempimento permanente e sperimentata lungo la via S. Marco e parte della via Fatebenefratelli, pur fornendo sicure garanzie statiche per qualunque carico e pur richiedendo spese di manutenzione nulle, viene scartata in quanto, oltre a richiedere una spesa di circa un miliardo, pregiudicherebbe definitivamente, o perlomeno renderebbe molto onerosa, la riutilizzazione del vano della Fossa.

L'ultima, infine, pur essendo in linea teorica quella ideale, viene scartata in quanto i programmi e le scelte prioritarie dell'Amministrazione comunale, nel settore della rete di trasporto pubblico e privato, non consentono l'immobilizzazione di circa 5 miliardi, necessari per la demolizione delle vecchie e inutilizzabili strutture, per il risanamento del letto di fondazione della platea (terreno melmoso), per la costruzione di due muri portanti (diaframmi in c.a.) e relativa copertura e per la sistemazione del piano stradale; tutto ciò anche senza prendere in esame la possibile eventualità di una decisione avversa all'utilizzazione del vano.

Altro argomento contrario a questa soluzione è la considerazione che il tempo necessario per la definizione dei programmi di utilizzazione del vano grezzo, per la scelta del più idoneo, per la messa a punto del progetto, per il finanziamento delle opere e per la loro approvazione, inciderebbe notevolmente sul calcolo degli interessi passivi sui 5 miliardi, tanto da superare, anche in breve tempo, il costo del riempimento con materiale sciolto e quello della sua rimozione.

In definitiva, il sistema scelto, anche in seguito a un pubblico dibattito in argomento⁽³⁾, consente di evitare affrettate e onerose scelte, pur conservando intatta la possibilità di utilizzare il vano; questo eseguendo opere di costo relativamente basso e di rapida esecuzione (importante questa per la pericolosità delle strutture e per la riattivazione del traffico veicolare) ed eliminando gli inconvenienti igienico-sanitari.

6. Il sistema sperimentale.

Ancora prima che la Commissione decidesse sul sistema di rafforzamento delle strutture, allo scopo di accertare praticamente l'efficacia del riempimento con materiale inerte e cemento, in vista di un più largo impiego lungo l'intera Fossa, venne eseguito un tratto sperimentale lungo la

⁽³⁾ Vedi: Situazione della Fossa Interna dei Navigli. - Atti del Collegio degli Ingegneri di Milano. Gennaio-Febbraio, 1969.

via S. Marco e parte della via Fatebenefratelli (da via S. Marco a via Borgonuovo).

Dapprima fu impiegato un impasto di limo, cemento e acqua (100 kg di cemento e 70 l d'acqua per m³ d'inerte); poi, visti i risultati poco soddisfacenti delle prove di portanza⁽⁴⁾, il limo venne sostituito con la sabbia fine del Ticino, mantenendo però gli stessi dosaggi del cemento e dell'acqua.

Il riempimento venne eseguito su una parte del canale unico di via S. Marco e del 2° canale di via Fatebenefratelli (la parte rimanente era occupata dallo scolmatore di piena) e sull'intero 1° canale di quest'ultima via. Per il trasporto sotterraneo dell'inerte dalla centrale di carico al punto di posa venne impiegata una pompa ad aria compressa (fig. 7), della capacità di 500 litri, funzionante a pressione variabile da 2 a 5

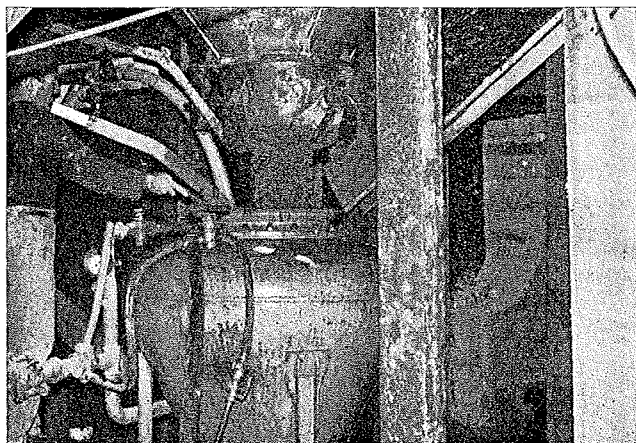


Fig. 7.

atmosfera, a seconda della distanza di trasporto (da 10 a 150 metri).

Questo sistema consentì, finché non venne eseguito il bloccaggio finale, il mantenimento del traffico veicolare nelle vie soprastanti, il trasporto del materiale di riempimento con un operatore e un aiuto (tranne che per la posa della tubazione), con una resa giornaliera di circa 100 m³, pari a circa 12,5 m³/ora e l'esecuzione di un buon costipamento in virtù dell'elevata velocità d'uscita dell'inerte.

Il magistero venne eseguito in tre fasi successive e distinte: con la prima (fig. 8), effettuata con avanzamento monte-valle, venne compattato un primo strato dell'altezza di circa 2 metri sul fondo (figg. 9, 10 e 11), sul quale con operazione

⁽⁴⁾ Vedansi in seguito le prove con piastra eseguite dall'Istituto Sperimentale Stradale del T.C.I.

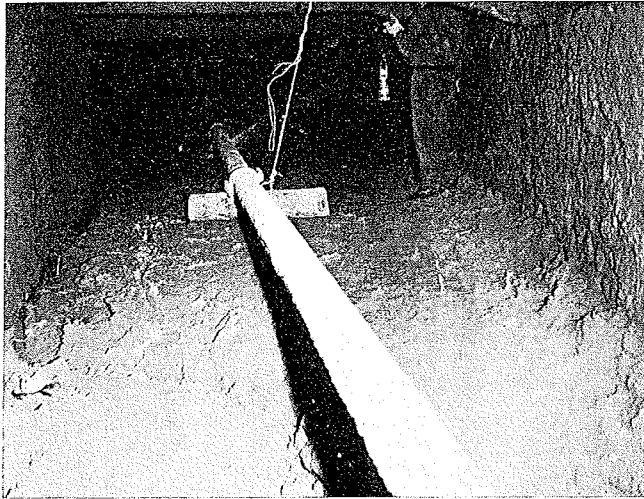


Fig. 8.

di ritorno (valle-monte) ne venne steso un altro (seconda fase) dell'altezza di circa 1,20 metri, fino al parziale riempimento dei vani esistenti tra le travi (figg. 12 e 13).

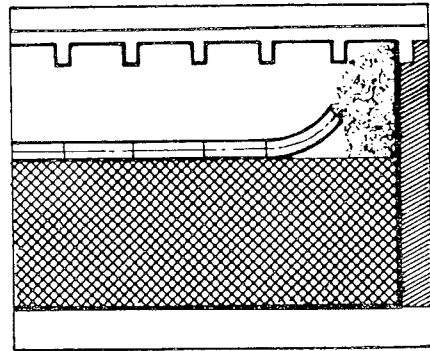


Fig. 12.

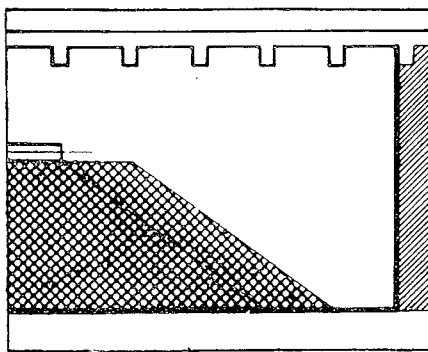


Fig. 9.

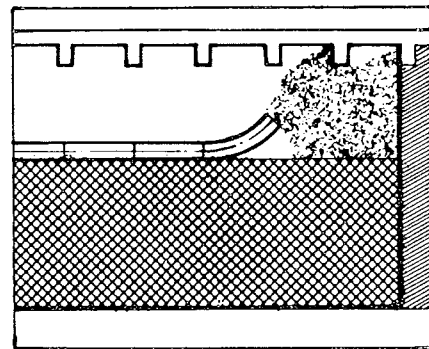


Fig. 13.

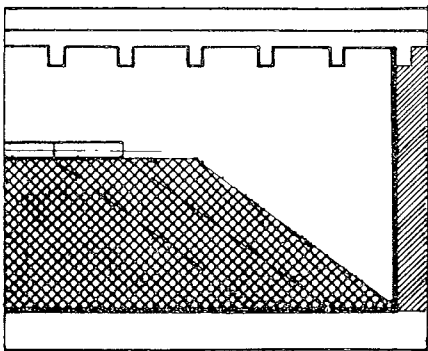


Fig. 10.

Il bloccaggio finale (terza fase) venne eseguito immettendo lo stesso impasto, dosato però a 200 kg di cemento, attraverso fori, del diametro di circa 20 cm, ricavati per rottura del calcestruzzo della soletta di copertura (fig. 14).

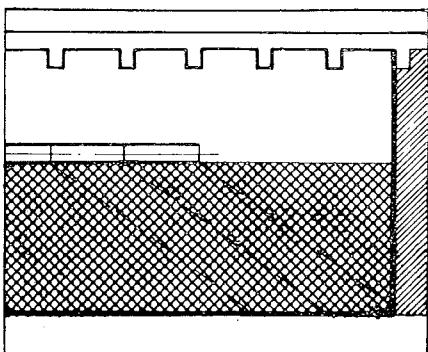


Fig. 11.

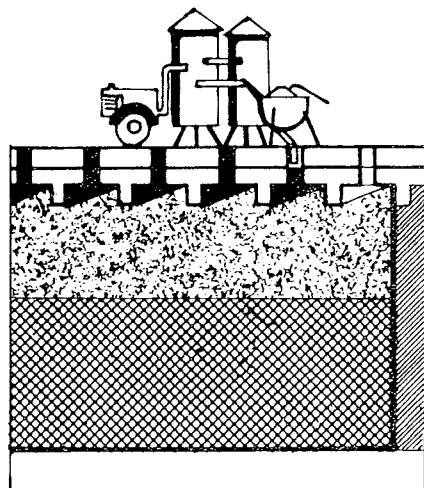


Fig. 14.

Per la sistemazione degli 800 metri del tratto sperimentale, il cui costo netto è stato di circa L. 95.000.000, sono stati eseguiti i seguenti magisteri e forniture principali:

- 800 m di condotto scolmatore;
- 2.750 m³ di calcestruzzo per la costruzione dello scolmatore;
- 6.000 m³ d'inerte (1° e 2° strato);
- 6.000 q di cemento per cementazione (1° e 2° strato);
- 2.700 m³ d'inerte per 3° strato;
- 4.050 q di cemento per cementazione 3° strato.

Durante i lavori, per controllare le caratteristiche del costipamento ottenuto, il primo strato venne sottoposto a prove di portanza secondo le vigenti norme svizzere e quelle proposte dal C.N.R.; per queste prove venne usata, dall'Istituto Sperimentale del T.C.I., una piastra circolare della superficie di 200 cm² caricata fino a 4,5 kg/cm²; la media dei cedimenti sotto carico venne misurata in tre punti equidistanti mediante tre micrometri posti sulla piastra; come contrasto venne utilizzata la trave di copertura.

I risultati delle prove⁽⁵⁾ sono riportati nella tab. 1 e nella figura 15, che seguono:

TABELLA I

Prova	Carico Specifico kg/cm ²	Cedimenti (mm)
1	0,2	0,07
	0,5	0,10
	1,5	1,39
	2,5	4,22
	3,5	8,35
2	0,2	0,04
	0,5	0,05
	1,5	2,25
	2,5	6,73
3	0,2	0,50
	0,5	0,87
	1,5	14,94
4	0,2	0,00
	0,5	0,04
	1,5	0,25
	2,5	0,55
	3,5	0,86
	4,5	1,19

(5) Le prime tre sono state eseguite su impasto di limo, cemento e acqua, mentre la quarta è stata eseguita su impasto di sabbia, cemento e acqua.

PROVA DI PORTATA CON PIASTRA
DI 200 cmq.

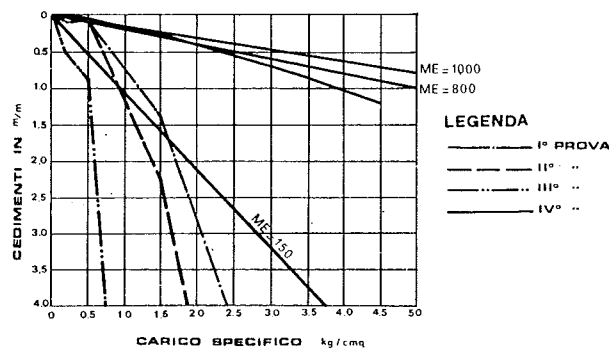


Fig. 15.

Nel diagramma, M_e rappresenta il modulo elastico dato dalla formula $M_e = \frac{\Delta p}{\Delta s} \times d$ (kg/cm²) in cui Δp è la variazione del carico di prova, pari a 1 kg/cm², Δs è la variazione del cedimento (cm) e d il diametro della piastra (cm).

In relazione al valore di M_e i terreni vengono così classificati:

- $M_e < 150$ terreno naturale cattivo;
- $150 < M_e < 800$ terreno naturale di buona qualità;
- $800 < M_e < 1000$ terreno da fondazione;
- $M_e > 1000$ strato di supporto (corrispondente al manto d'usura di massicciate stradali).

Sul diagramma sono stati riportati i valori dei cedimenti in funzione dei carichi di prova ottenendo così quattro spezzate: le prime tre rappresentano il comportamento dello strato contenente limo, mentre la quarta rappresenta il comportamento dello strato contenente sabbia.

La prima spezzata si avvicina alla linea $M_e = 800$ fino a un carico di 0,5 kg/cm², si mantiene tra 150 e 800 da 0,5 a 1,625 kg/cm² e assume valori inferiori a 150 per carichi superiori; la seconda si avvicina a $M_e = 1000$ da 0,5 a 0,925 kg/cm² e assume valori inferiori a 150 per carichi superiori; la terza, ha, invece, un andamento decisamente inferiore a 150 sin dall'inizio della prova.

I risultati di queste tre prime prove classificano il riempimento eseguito con limo, cemento e acqua come terreno di scarsa portanza e quindi poco adatto all'impiego⁽⁶⁾.

(6) Il tratto di fossa riempito con l'impasto contenente limo è di breve lunghezza in quanto l'esito negativo delle prove di portanza consigliò, durante i lavori, la sostituzione del limo con la sabbia.

La quarta spezzata, eseguita su strato di sabbia, cemento e acqua, si avvicina a $M_v = 1000$ fino ad un carico di $1,5 \text{ kg/cm}^2$, si mantiene tra 800 e 1000 da $1,5$ a $2,1 \text{ kg/cm}^2$ e assume valori di poco inferiori a 800, ma comunque superiori a 150, da $2,1$ a $4,5 \text{ kg/cm}^2$, mettendo in rilievo la buona riuscita del costipamento, cosa fra l'altro confermata dai risultati delle prove penetrometriche (7).

7. Il riempimento con materiale sciolto.

Terminato il tratto sperimentale e acquisiti i relativi dati tecnici ed economici, rimaneva da sistemare la restante parte della Fossa Interna, lunga circa 3 km e tombinata prevalentemente, esclusi il tratto di via Fatebenefratelli e gli attraversamenti radiali, con struttura a tre canali.

L'impasto impiegato per il tratto sperimentale, pur avendo fornito buoni risultati, per quanto attiene il riempimento e la previsione dei relativi cedimenti, mal si adattava all'estensione della sua utilizzazione nella residua parte della Fossa, in quanto l'alto costo dell'impasto cementato e della sua posa in opera (costo netto di circa 2.500 lire al m^3) inciderebbe sensibilmente sul costo totale delle opere di rafforzamento statico.

Si trattava, quindi, di ricercare un materiale meno costoso (8), che fosse di facile e rapida applicazione e che desse ampie garanzie sul completo riempimento del vano: esso venne individuato nella mista di sabbia e ghiaia, proveniente dal sottosuolo milanese, da impiegare senza alcuna aggiunta di legante.

Si delineò così la soluzione del problema con il riempimento del 1° e 2° canale con mista e con la costruzione, nel 3° canale, di un collettore di fognatura con sovrastante cunicolo, per raccogliere, nel primo, gli scarichi delle acque ordinarie e meteoriche provenienti dagli stabili fronteggianti la cerchia interna (lato centro città) e per alloggiare, nel secondo, parte dei servizi del sottosuolo (quelli meno ingombranti), evitando così le continue manomissioni del marciapiede.

L'esecuzione del magistero venne condotta gettando la mista nel vano, attraverso fori ricavati nella struttura di copertura, e costipando successivamente, un primo strato mediante una ruspa da 45 quintali, previa bagnatura dello stesso.

L'altezza di questo strato venne tenuta di mi-

sura tale da lasciare uno spazio di circa 1,70 m tra l'intradosso delle travi e il piano di scorrimento della ruspa, in modo da consentire il passaggio di quest'ultima (fig. 16).



Fig. 16.

Su questo primo strato venne immessa un'ulteriore massa di mista, fino al raggiungimento del piano stradale, che poi con abbondante bagnatura e impiego di vibratore da diga (9), avente raggio d'azione di due metri, si abbassava fino a 10-20 cm. sotto l'intradosso delle travi, costituendo il secondo strato (fig. 17).



Fig. 17.

Effettuata questa operazione e dopo un periodo di circa 15 giorni, per consentire ulteriori assestamenti e l'allontanamento dell'acqua attraverso tubazioni di drenaggio poste sul fondo, venne

(9) Vibratore Vibrair P140 con le seguenti caratteristiche principali: diametro ago: 140 mm; lunghezza ago: 550 mm; peso totale: 31,5 kg; frequenza vibrazioni: 9700 al l' (bassa frequenza); forza centrifuga: 3.200 kg; zona d'influenza: 2 m; rendimento orario: 42 m^3 .

(7) Vedasi prova penetrometrica n. 6 al cap. 8.

(8) Costo netto di circa 1100 lire al m^3 per fornitura e posa in opera.

riempito lo spazio sotto le travi e quello tra le travi con calcestruzzo fluido, dosato a kg 200 di cemento, opportunamente vibrato.

Le figure 18 e 19 indicano le posizioni dei tre strati e quella del condotto di fognatura con sovrastante cunicolo servizi.

8. Indagini e prove.

La riuscita dell'operazione di bloccaggio delle strutture pericolanti dipendeva dalla densità che si sarebbe ottenuta negli strati d'inerte e dalla completa chiusura dello spazio esistente tra l'i-

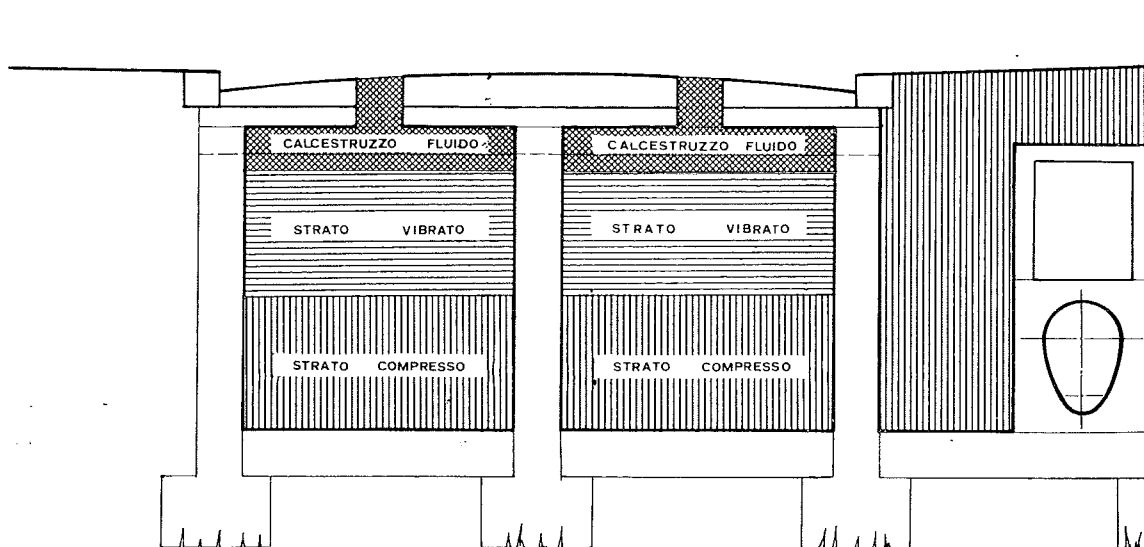


Fig. 18.

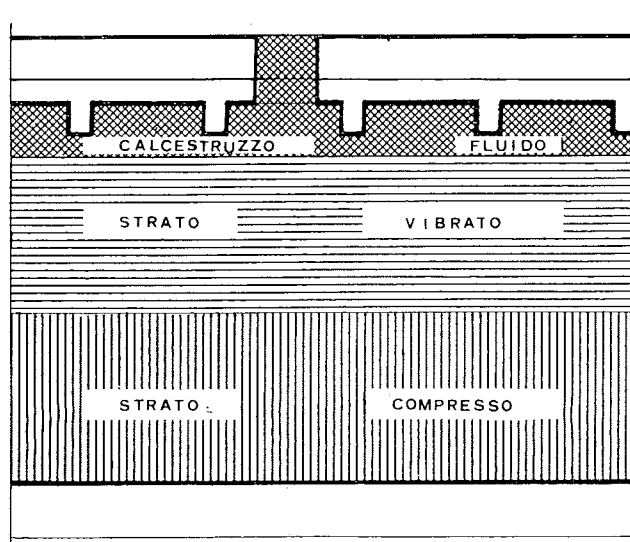


Fig. 19.

Per l'esecuzione del riempimento e dei lavori di fognatura, il cui costo complessivo netto è risultato pari a L. 370.000.000, sono stati eseguiti i seguenti magisteri e forniture principali:

- 2.400 m di condotto a sezione interna 0,80 x 1,20 m;
- 2.200 m di cunicolo servizi;
- 7.600 m³ di calcestruzzo per condotto di fognatura e cunicolo servizi;
- 86.000 m³ di mista (1° e 2° strato);
- 11.500 m³ di calcestruzzo a 200 kg per il 3° strato;
- 5.200 m³ di demolizione di calcestruzzo.

nerte (2° strato) e la copertura in c.a.; operazione, quest'ultima, che presenta notevoli difficoltà esecutive anche nel rivestimento di gallerie, quando si deve ottenere il contatto completo tra arco portante e terreno.

Una prima prova empirica sull'inerte stabilizzato venne effettuata, in corso d'opera, scavando due buche con pareti verticali, a circa un mese dal riempimento, e osservando il comportamento degli strati a mano a mano che gli stessi perdevano l'umidità per evaporazione.

Nelle figure 20 e 21, scattate a distanza di 15 giorni, si notano le pareti pressoché verticali, la distribuzione degli strati (dall'alto verso il basso: tappeto d'usura, sottofondo in calcestruzzo, mista di sabbia e ghiaia, struttura in c.a., calcestruzzo



Fig. 20.

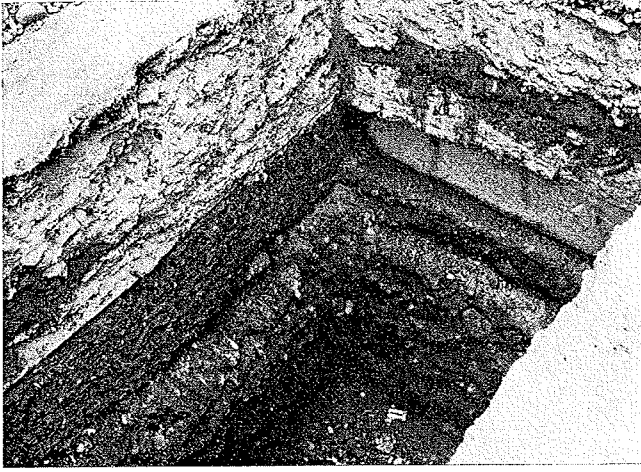


Fig. 21

di bloccaggio e inerte) e il perfetto riempimento dello spazio tra inerte e struttura in c.a., quest'ultimo ancora più evidente nella figura 22.

Nel giugno del 1971, a circa 2 anni dall'ultimazione dei lavori, allo scopo di controllare eventuali assestamenti del materiale e l'indice dei vuoti, vennero eseguite una serie di prove penetrometriche e di iniezioni con miscele cementizie nel corpo del riempimento, con le modalità esecutive qui di seguito descritte:

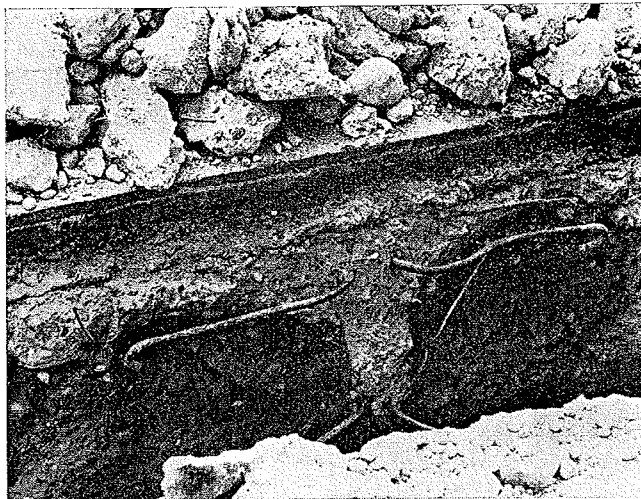


Fig. 22

metriche e di iniezioni con miscele cementizie nel corpo del riempimento, con le modalità esecutive qui di seguito descritte:

— *prove penetrometriche*

Sono state eseguite in sei punti, a distanze reciproche di circa 500 metri, con penetrometro dinamico standard con cono diam. 2" e mazza di 72,6 kg, in caduta libera da un'altezza di 75 cm; per un controllo più accurato dei vari strati, si è misurata la resistenza alla penetrazione, espres-

sa in colpi/piede di affondamento, per spessori di circa 10 cm.

Le prove sono state spinte al disotto del riempimento e del fondo della Fossa, fino all'incontro con il terreno consistente.

— *iniezioni cementizie*

Sono state eseguite nelle immediate vicinanze delle prove penetrometriche con miscela di sabbia fine e cemento, nel rapporto 2 a 1, pompata attraverso un tubo-forma, infisso fino al piano inferiore della sezione di prova e poi ritirato fino a quello superiore della sezione stessa.

Per ogni prova, allo scopo di evitare la decompressione del terreno, sono stati impiegati più tubi-forma (uno per ogni strato di prova), isolati dalla copertura stradale mediante un secondo tubo con guarnizione di tenuta. Durante le prove, condotte alla pressione massima di 2-2,5 atmosfere, si è cercato di far coincidere le sezioni di iniezione con lo spessore degli strati compresso e vibrato.

Qui di seguito sono stati esaminati, in sintesi, i risultati delle prove penetrometriche e di iniezione; per i dati numerici di dettaglio si rimanda alla figura 23.

— *via S. Sofia*

La prova penetrometrica fornisce valori bassi da 1,00 a 1,90 metri dal piano stradale (strato vibrato) e da 3,10 a 3,57 metri (parte inferiore dello strato compresso); la resistenza è discreta negli strati intermedi, cui corrisponde un basso assorbimento di miscela e di iniezione.

— *via F. Sforza*

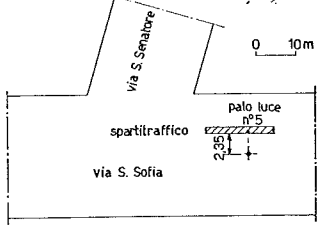
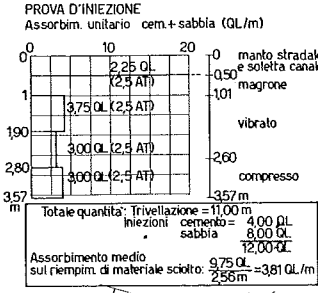
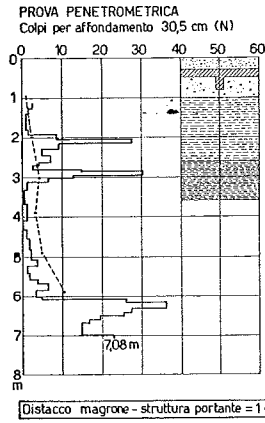
Ottima resistenza alla penetrazione in tutti gli strati del riempimento, con una zona di minore ma sempre buona resistenza (10 colpi/piede) nella parte bassa dello strato vibrato. Gli assorbimenti sono quasi nulli, salvo che al contatto tra il riempimento in calcestruzzo fluido e la copertura preesistente.

— *via Visconti di Modrone*

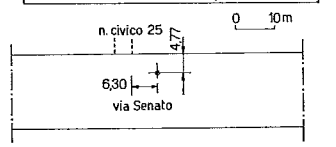
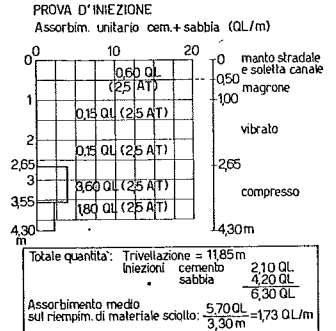
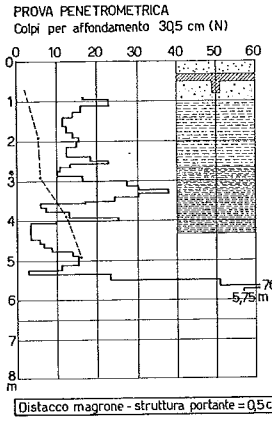
Resistenza alla penetrazione di 4 colpi/piede da 1,60 a 2,15 metri dal piano stradale, cioè nella parte mediana dello strato vibrato; nelle zone rimanenti la resistenza è più elevata.

Gli assorbimenti di miscela cementizia sono bassi su tutta l'altezza del riempimento.

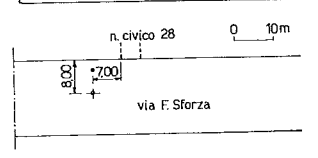
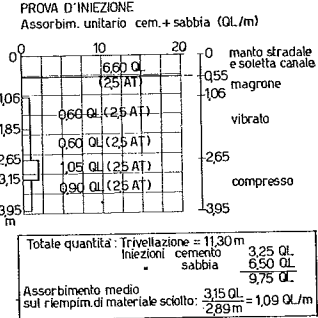
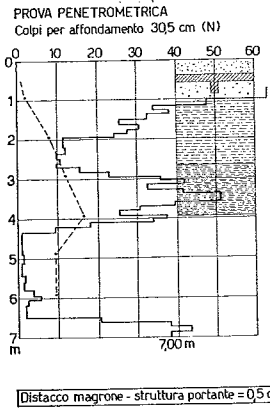
Prova n.1 - 2° canale



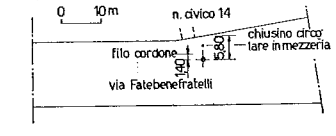
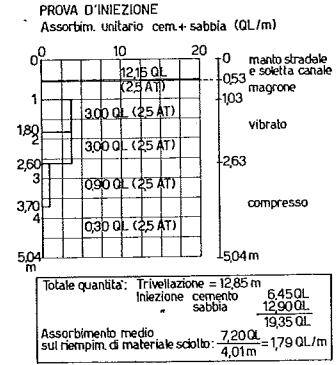
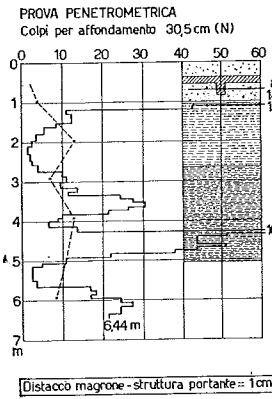
Prova n.4 - 2° canale



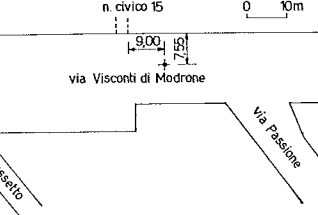
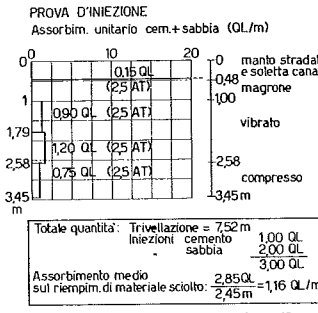
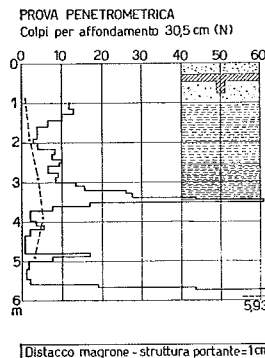
Prova n.2 - 1° canale



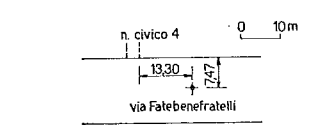
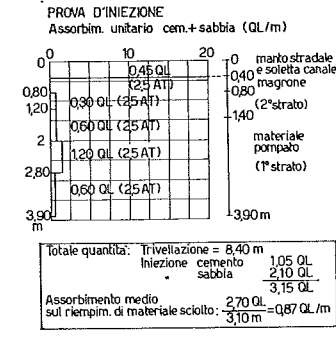
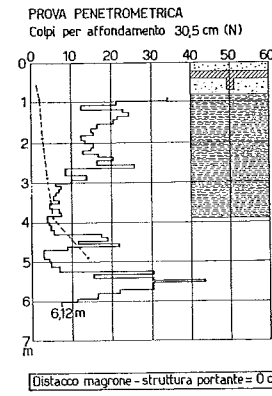
Prova n.5 - 2° canale



Prova n.3 - 1° canale



Prova n.6 - 1° canale



- STRATO VIBRATO
- STRATO COMPRESSO
- MASSICIATA STRADALE
- STRUTTURA ESISTENTE
- MAGRONE DI CALCESTRUZZO FLUIDO

Fig. 23

— via Senato

Buona resistenza alla penetrazione su tutta l'altezza del riempimento; gli assorbimenti di miscela cementizia, quasi nulli fino a 2,10 metri di profondità, assumono un valore massimo di 4,5 quintali per metro di foro nella parte bassa, dove vi è un piccolo strato di resistenza alla penetrazione di 6 colpi/piede.

— via Fatebenefratelli n. 14

Buona resistenza alla penetrazione nello strato compresso; bassa resistenza fra 1,75 e 2,70 metri nella parte bassa dello strato vibrato, cui corrisponde un aumento dell'assorbimento di malta cementizia; assorbimento alto (12,15 quintali) al contatto soletta-riempimento.

— via Fatebenefratelli n. 4 (tratto sperimentale riempito con sabbia, cemento ed acqua).

La resistenza alla penetrazione è buona nello strato superficiale e discreta in quello a contatto con il fondo della Fossa Assorbimenti bassi su tutta l'altezza.

Pertanto, si può affermare che, ad eccezione di via S. Sofia, il riempimento è stato eseguito con buoni risultati e in particolare:

— che lo strato compresso sottostante è, generalmente, più resistente di quello vibrato sovrastante (tab. 2);

— che la parte superiore dello strato vibrato è in condizioni migliori, per quanto riguarda la resistenza alla penetrazione, della parte più bassa, sia per effetto della vibrazione eseguita più da

vicino che per probabile parziale impregnazione di boiaccia di cemento proveniente dal calcestruzzo fluido sovrastante (3° strato);

— che le quantità di malta assorbita, in genere, sono più alte negli strati di bassa resistenza alla penetrazione, per cui si può ritenere che in questi l'intasamento dei vuoti non sia completo; viceversa le alte resistenze riscontrate in altri strati non dovrebbero essere dovute solamente all'attraversamento di strati di granulometria grossolana, ma indicare un'alta densità del riempimento;

— che tra il calcestruzzo fluido del 3° strato e la copertura preesistente esistono piccole soluzioni di continuità, che vanno da un minimo di pochi millimetri a un massimo di 1 cm.; si può ritenere che a provocare questi piccoli distacchi abbiano concorso il ritiro del calcestruzzo fluido di bloccaggio e l'assestamento del terreno esistente immediatamente al disotto della platea della Fossa; a proposito di quest'ultimo, di cui nel corso delle prove non si è esaminata la natura, occorre precisare che la sua resistenza alla penetrazione ha dato valori estremamente bassi, valori tipici di riporti e depositi recenti che potrebbero condurre ad ulteriori assestamenti nel tempo. È bene precisare, però, che l'altezza dello strato poco resistente, esistente al disotto della Fossa, varia da 2,40 a 0,50 metri, procedendo da valle verso monte, segno di depositi di origine fluviale più consistenti verso valle per rallentamento del flusso d'acqua;

— che in taluni punti della platea della Fossa esistono soluzioni di continuità.

TABELLA 2

ZONA	STRATO COMPRESSO			STRATO VIBRATO			ASSORBIMENTO	
	Resistenza colpi/piede	Media	Assorbimento Ql./ m.	Resistenza colpi/piede	Media	Assorbimento Ql./ m.	Medio riempimento sciolto Ql./ m.	Contatto magrone copertura Ql.
1_VIA S. SOFIA	1 ÷ 30,5	6	3,3 ÷ 3,9	1,5 ÷ 28	6	3,3 ÷ 4,2	3,81	2,25
2_VIA F. SFORZA	10 ÷ 51	32	1,1 ÷ 2,1	10 ÷ 47,5	27	0,75	1,09	6,60
3_VIA Visconti Di Modrone	6,5 ÷ 43,5	17	0,87	3 ÷ 13	8	1,1 ÷ 1,5	1,16	0,15
4_VIA SENATO	3,5 ÷ 37,5	17	2,4 ÷ 4	11,5 ÷ 23	15	0,2	1,79	0,60
5_VIA FATEBENEFRAPELLI	4 ÷ 102	25	0,2 ÷ 0,8	1,5 ÷ 42,5	11	3,75	1,79	12,15
6_VIA FATEBENEFRAPELLI	4 ÷ 26 ⁽¹¹⁾	12 ⁽¹¹⁾	0,5 ÷ 1,5 ⁽¹¹⁾	12,5 ÷ 34 ⁽¹²⁾	23 ⁽¹²⁾	0,7 ⁽¹²⁾	0,87	0,45

(11) e (12) Valori relativi, rispettivamente, al primo e secondo strato compattati con pompa.

Concludendo, alla luce dei dati forniti dalle prove, si può affermare che il riempimento della Fossa Interna, eseguito con il metodo descritto, risolve, generalmente e con sufficiente margine di sicurezza, il problema del rafforzamento statico delle strutture pericolanti; nei prossimi anni si potrebbero verificare ulteriori piccoli assestamenti della massa di riempimento, che potrebbero richiedere un organico intervento con iniezioni di malta cementizia, mentre non si possono esclu-

dere assestamenti più rilevanti nei punti in cui esistono soluzioni di continuità della platea in calcestruzzo della Fossa Interna.

BIBLIOGRAFIA

- COLUMBO A. (1942): *Il cavo Redefossi e la sua sistemazione a scaricatore delle piene*. Rivista del Comune, Milano, Agosto.
DE STEFANI G. (1966): *Acqua Industriale*, n. 44.
GAITO G., NESPOLI F., SCOTTI C. (1958): *Le acque superficiali a Milano*. Quaderni della Città di Milano.

S U M M A R Y

The reinforcement of Milan waterways coverages

The investigations relative to the damages occurred in the covering structures of some waterways (Navigli) in Milan, consequent to the heavy traffic and to the water

pollution, are described.

The various aspects of structures degradation, the reinforcement systems adopted and the results of control tests carried out at the end of works are widely explained.