

REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO DI LIVELLAZIONE IDROSTATICA DI PRECISIONE

Comunicazione presentata al XIV Convegno Nazionale della SIFET

*R. Galetto**

1. Premessa

Nel Duomo di Milano vengono attualmente eseguite delle operazioni di misura, che hanno lo scopo di tenere sotto controllo le deformazioni della struttura; esse si articolano in:

- a) misure dei cedimenti relativi dei pilastri, eseguite col metodo della livellazione geometrica di precisione;
- b) misure delle variazioni di inclinazione dei pilastri, eseguite per mezzo di fili a piombo;
- c) misure delle variazioni di distanza di alcuni pilastri, eseguite mediante nastri in acciaio.

Le misure suddette vengono eseguite ogni tre mesi e questa periodicità è più che sufficiente a fornire un quadro generale delle deformazioni della struttura.

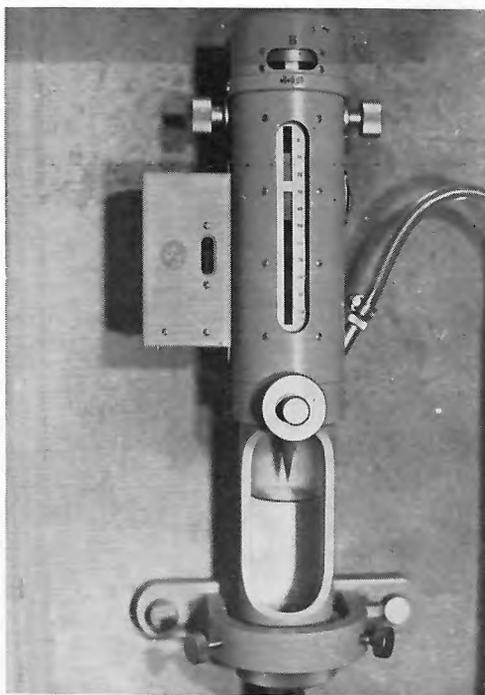
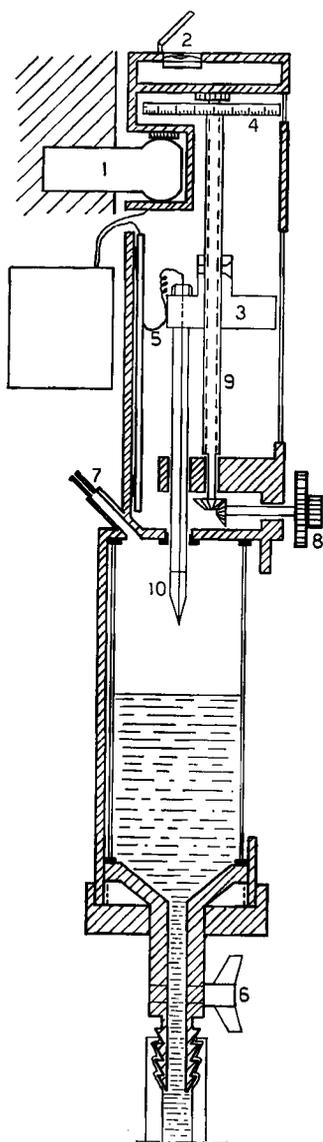


Fig. 1 a

Recentemente però si sono resi necessari degli interventi di un certo rilievo in una zona ristretta del Duomo, individuata dall'incrocio del transetto con la navata centrale; in tale occasione si è sentita la necessità di controllare con maggiore assiduità le deformazioni e, in particolar modo, i cedimenti dei pilastri che si trovano nella zona interessata ai lavori. Fu pertanto presa in considerazione l'eventualità di realizzare un impianto di livellazione idrostatica di precisione,

* Istituto di Geodesia, Topografia e Fotogrammetria « G. Cassinis » del Politecnico di Milano.

basata sul principio dei vasi comunicanti, che consentisse di esercitare questo controllo della struttura in maniera praticamente continua da personale non necessariamente esperto in operazioni topografiche di alta precisione e senza interferire con gli eventuali lavori di restauro.



LEGENDA

1. Caposaldo
2. Livella sferica
3. Indice della graduazione verticale
4. Graduazione sul tamburo rotante delle frazioni di millimetro
5. Contatto strisciante
6. Rubinetto di chiusura dello scarico di fondo
7. Ugello per eguagliare la pressione barometrica in più strumenti
8. Bottone la cui rotazione si trasmette alla vite 9, che provoca la traslazione dell'asta 10 e dell'indice 3 ad essa connesso e la rotazione del tamburo

Fig. 1 b

Precedette la messa in opera dell'impianto di livellazione definitivo quella di un impianto sperimentale, pure eseguito nel Duomo di Milano, realizzato allo scopo di accertare la validità del metodo in questa applicazione; in particolare, per determinare le eventuali cause di errore e i metodi per eliminarle [1].

2. Lo strumento di misura

L'impianto di livellazione idrostatica del Duomo di Milano si basa sull'uso dello strumento VEB - Heldeburg Meisser; esso è costituito da un corpo cilindrico (vedi figg. 1a e 1b), che contiene nella sua parte superiore gli organi meccanici di misura, nella parte inferiore un bicchiere di vetro nel quale è contenuto il liquido, e da un circuito elettronico contenuto in una scatoletta esterna. Un'apertura sul fondo permette di mettere in comunicazione tra loro più strumenti mediante una tubatura. Per eseguire la misura del livello del pelo libero dell'acqua contenuta nel bicchiere occorre ruotare il bottone che si trova nella parte anteriore dello strumento; tale rotazione provoca l'abbassamento di un'asticciola verticale la cui punta, venendo a contatto con la superficie del liquido chiude un circuito elettrico e provoca una variazione di intensità in una spia luminosa. La lettura viene fatta su una graduazione verticale in millimetri e su una graduazione orizzontale su tamburo rotante che permette di leggere, con l'approssimazione di 0,01 mm, le frazioni di millimetro della precedente.

Un apposito ugello, situato sul tetto del bicchiere, permette di mettere in comunicazione con una seconda tubatura lo spazio vuoto al di sopra della superficie del liquido in più strumenti, in modo da eguagliare la pressione barometrica sui peli liberi.

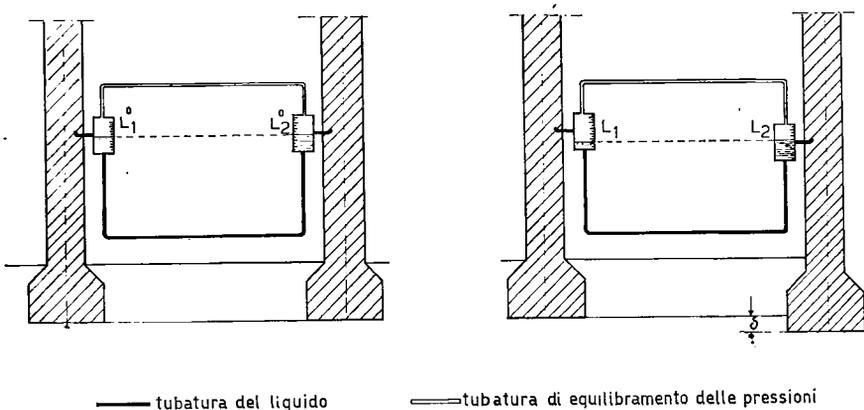


FIG. 2

Inoltre, mediante un rubinetto posto all'estremità inferiore, è possibile interrompere la continuità tra il liquido contenuto nel bicchiere e quello contenuto nella tubatura.

Con questo strumento è possibile realizzare un impianto di livellazione idrostatica, il cui schema è il seguente (vedi figg. 2 e 2a):

- volendo determinare le variazioni di quota di due pilastri A e B, si fissano su di essi due strumenti;
- si mettono in comunicazione gli strumenti con una tubatura contenente acqua e con una seconda tubatura si equilibrano le pressioni sui due peli liberi;
- si effettuano le letture L_1^0 e L_2^0 al tempo t_0 ;
- se la temperatura del liquido non è cambiata nell'intervallo $t-t_0$, oppure se la variazione è stata uguale nei due tratti verticali della tubatura [1], la variazione relativa di quota avvenuta tra l'istante t_0 e un istante generico t , è data da:

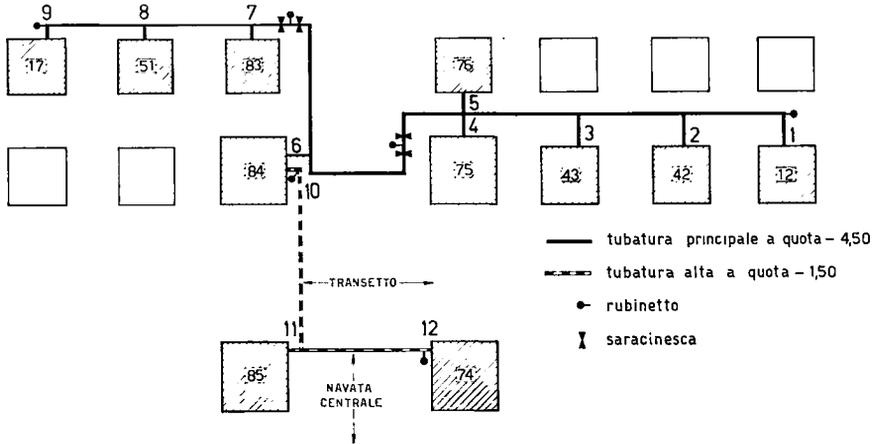
$$\delta = (L_1 - L_2) - (L_1^0 - L_2^0)$$

essendo L_1 e L_2 le letture effettuate al tempo t . Poiché tale ipotesi non è gene-

ralmente verificata, è necessario ricorrere a una correzione delle letture, come viene nel seguito illustrato.

3. Descrizione dell'impianto

L'impianto consiste in una tubatura principale, lunga circa 160 m, che corre orizzontalmente al livello pavimento di uno scantinato sottostante al pavimento del Duomo (vedi fig. 3); da essa, in prossimità di ogni pilastro interessato, si diparte un ramo verticale che mette in comunicazione la tubatura principale e



PLANIMETRIA DELL'IMPIANTO DI LIVELLAZIONE IDROSTATICA

Fig. 3

lo strumento collegato al pilastro stesso. Poiché tutti gli strumenti sono fissati alla stessa quota i rami verticali di connessione hanno tutti la medesima altezza, pari a 1 m.

Lo schema ora descritto vale per tutti gli strumenti che compongono l'impianto, ad eccezione di quelli contrassegnati con i numeri 11 e 12. Per questi infatti la quota del punto di attacco sui rispettivi pilastri non poteva essere inferiore a 3 m rispetto alla tubatura principale. E' stata pertanto costruita una seconda tubatura, anch'essa orizzontale, ad una quota di m 3,5 rispetto a quella principale; essa mette in connessione i due strumenti 11 e 12 con un terzo strumento, il 10, che si trova sul medesimo pilastro dello strumento 6, ad una quota di circa 2 m ad esso superiore.

Supponendo che le variazioni della distanza dei punti di attacco degli strumenti 6 e 10, che sono fissati sul medesimo pilastro 84, siano trascurabili, è possibile riferire le variazioni di quota dei pilastri 85 e 74 ad un altro pilastro generico inserito nella livellazione. La variazione di quota dei pilastri 85 e 74 rispetto ad esso sarà infatti data dalla variazione rispetto al pilastro 84, sommata a quella del pilastro 84 rispetto a quello di riferimento.

Un elemento di differenza tra lo schema della tubatura alta e quello della tubatura principale è costituito dal fatto che nella prima non vi sono rami verticali di connessione degli strumenti, poiché essa corre all'altezza dei bicchieri posti sugli strumenti stessi ed è ad essi collegata da tratti a sifone.

Questo fa sì che non sia necessario misurare la temperatura nei tratti di raccordo tra tubatura e strumento [1].

Lo schema della livellazione, nel suo sviluppo plano-altimetrico, è riportato in fig. 4.

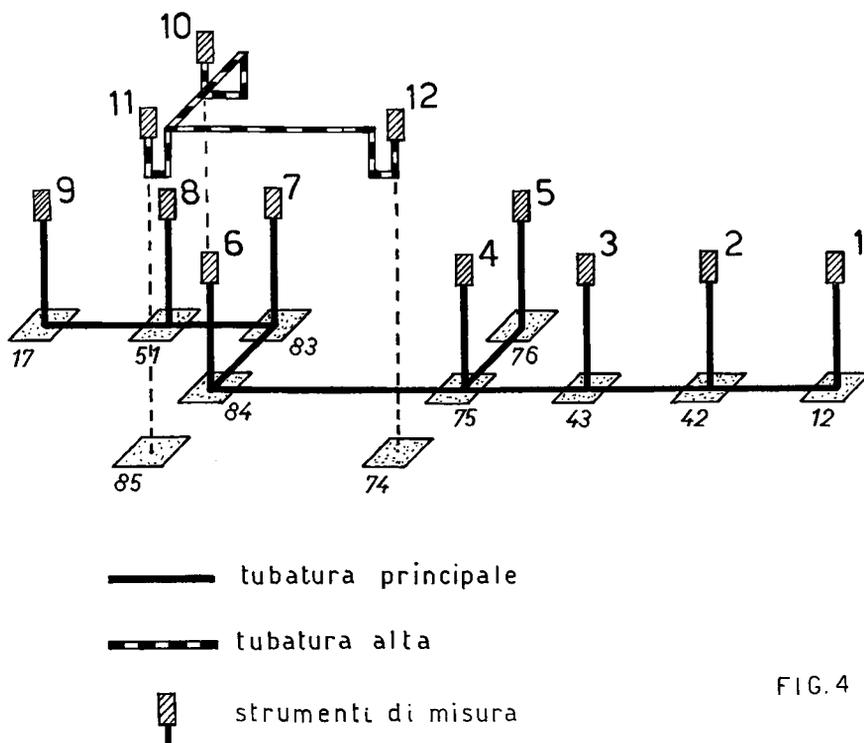


FIG. 4

Sia la tubatura principale che quella alta, come pure tutti i rami verticali di connessione, sono costituiti da tubi di rame crudo del diametro interno di mm 20 e dello spessore di 1 mm. La scelta del rame come materiale di costruzione dell'impianto è stata dettata dal fatto che esso doveva:

- essere rigido, poiché si era constatato, in fase di sperimentazione, che delle deformazioni plastiche del tubo disturbavano le operazioni di misura;
- non alterarsi a contatto con l'acqua;
- non essere deteriorabile per effetto di eventuali correnti elettriche vaganti.

Ai due estremi di ogni tubatura si trova un rubinetto di scarico; inoltre nella tubatura principale si hanno due rubinetti intermedi; immediatamente prima e dopo ciascuno di essi è sistemata una saracinesca; in tal modo è possibile separare in tre tronchi indipendenti la tubatura principale. I vari spezzoni di tubo che compongono la tubatura sono stati congiunti in opera con manicotti appositi e saldati con una lega di stagno. L'impianto è stato collaudato per una pressione massima di 5 atm.

In ogni ramo verticale di connessione della tubatura principale è stato inserito un termometro con graduazione al decimo di grado; in tal modo è possibile misurare il valore della temperatura nel punto medio di ogni ramo verticale.

Parallelamente a ciascuna delle due tubature in rame corrono due tubature in polivinile, che mettono in comunicazione lo spazio sovrastante il pelo libero del liquido in vari strumenti; si è così reso uniforme il valore della pressione statica in tutti gli strumenti, indipendentemente da eventuali alterazioni

4. Riempimento delle tubature

Le tubature sono state riempite con acqua normale, precedentemente disareata mediante bollitura; l'acqua doveva infatti essere conduttiva per il funzionamento della parte elettronica degli strumenti, quindi non distillata; ma doveva essere al contempo priva di aria, onde prevenire formazione di bolle per liberazione spontanea.

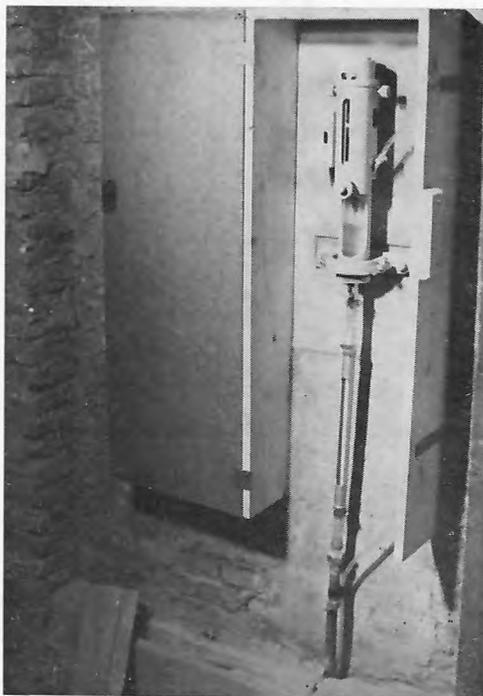


Fig. 5

Il riempimento è avvenuto immettendo da un'estremità delle tubature l'acqua che veniva fatta cadere da un'altezza di circa 4 m rispetto al rubinetto di immissione; si è lasciato defluire l'acqua all'estremità opposta delle tubature, fintanto che il suo flusso è risultato regolare.

Dopo aver riempito le tubature è stata eseguita una prima prova per accertare l'eventuale presenza di bolle d'aria all'interno delle tubature; essa era basata sulla scarsa comprimibilità dell'acqua. Sono stati chiusi ermeticamente, dato che non erano ancora stati montati gli strumenti, tutti gli sbocchi dei rami verticali di connessione e così pure uno dei rubinetti terminali; all'altro rubinetto terminale è stato applicato un breve tratto di tubo di polietilene molto rigido, nel quale era possibile inserire uno stantuffo; in assenza di bolle d'aria all'interno della tubatura non era possibile far scorrere lo stantuffo all'interno del tubo.

La seconda prova, eseguita ad impianto ultimato, era basata sul seguente fenomeno accertato in fase di sperimentazione: determinata la misura del dislivello tra due strumenti, si metteva in oscillazione il liquido provocando artificialmente una brusca variazione di pressione in uno strumento; ripetendo la misura del dislivello ad oscillazione esaurita, si trovava che il valore del dislivello era cambiato se nella tubatura erano presenti delle bolle d'aria che ostruivano l'intera sezione del tubo.

Entrambe le prove hanno portato alla conclusione che non vi erano bolle d'aria nelle tubature.

5. Determinazione delle variazioni relative di quota

Lo schema delle misure delle variazioni relative di quota dei pilastri interessati dall'impianto di livellazione, prevede che le variazioni siano determinate assumendo come punto di riferimento il caposaldo sul quale è fissato lo strumento n. 1 che si trova sul pilastro 12 (vedi fig. 4).

Avendo reso uniforme la pressione barometrica in tutti gli strumenti mediante l'apposita tubatura, la quota del pelo libero dell'acqua in ciascuno strumento rispetto ad un piano orizzontale all'istante iniziale t^0 è funzione solo della distribuzione della temperatura nel liquido [1]; le variazioni relative del livello dell'acqua in uno strumento rispetto ad un altro, nel tempo, sono invece funzioni unicamente delle variazioni di temperatura nei soli rami verticali e degli eventuali cedimenti dei pilastri a cui sono vincolati.

Una variazione ΔT della temperatura in un generico ramo verticale provoca una variazione della quota del pelo libero del liquido contenuto nello strumento ad esso connesso pari a

$$\Delta h = \Delta T \cdot h \cdot \alpha$$

essendo h l'altezza del ramo verticale ed α il valore medio del coefficiente di dilatazione cubico dell'acqua tra gli estremi T^0 e T dell'intervallo ΔT .

Supponiamo di aver eseguito le letture $L^0_1, L^0_2, \dots, L^0_n$ del livello del liquido nei nove strumenti dell'impianto principale al tempo t^0 e le letture L_1, L_2, \dots, L_n al tempo t ; siano inoltre T^0_1, \dots, T^0_n le temperature medie nei rami verticali di connessione al tempo t^0 e T_1, \dots, T_n quelle al tempo t ; la variazione relativa di quota δ_j di un generico pilastro j rispetto al pilastro 12 preso come riferimento vale (*):

$$\delta_j = [L_1 + \alpha_1 h_1 (T_1 - T^0_1) - L_j - \alpha_j h_j (T_j - T^0_j)] - [L_{12} - L^0_{12}] \quad 1)$$

In pratica, poiché l'altezza di tutti i rami verticali è uguale e pari ad 1 m, la 1) diventa:

$$\delta_j = [L_1 + \alpha_1 (T_1 - T^0_1) - L_j - \alpha_j (T_j - T^0_j)] - [L_{12} - L^0_{12}] \quad 2)$$

Le variazioni di quota del pilastro 85 rispetto al pilastro 12 saranno date invece dalla relazione:

$$\delta_{85} = [L_{12} - L_{10}] - [L^0_{12} - L^0_{10}] + \delta_{34} \quad 3)$$

e analogamente per il pilastro 74; per gli strumenti n. 10, n. 11 e n. 12 non è infatti necessario apportare la correzione dovuta alle variazioni di temperatura, in quanto che, come è stato detto, essi sono raccordati alla tubatura non da un semplice ramo verticale, ma da un raccordo a sifone, che agisce da compensatore di tali variazioni [1].

6. Esecuzione delle misure

L'esecuzione delle misure deve avvenire in modo tale che la lettura al livello

(*) Nella 1) e seguenti l'indice associato ai cedimenti δ corrisponde alla numerazione dei pilastri, quello associato alle letture L corrisponde alla numerazione degli strumenti.

dell'acqua nei vari strumenti risulti la stessa che si otterrebbe se esse venissero fatte simultaneamente. L'operazione di lettura ai dodici strumenti richiede sempre una mezz'ora circa. La modalità seguita è perciò la seguente:

- a) si chiudono dapprima tutti i rubinetti che separano l'acqua contenuta negli strumenti da quella contenuta nelle tubature; questa operazione avviene nel giro di due minuti circa;
- b) immediatamente dopo l'operazione suddetta si eseguono le letture della temperatura nei rami verticali dei vari termometri; anche questa operazione richiede pochi minuti.

A questo punto si è praticamente cristallizzata la situazione a un certo istante e si ha la possibilità di eseguire le letture agli strumenti con tutta la calma che l'operazione richiede.

Nonostante l'apparente complessità dei dati che si devono registrare, i calcoli che devono essere eseguiti per determinare i cedimenti sono estremamente semplici. Le letture eseguite vengono infatti riportate su un apposito modulo (fig. 6) e corrette in modo che corrispondano a quelle che si sarebbero eseguite se in tutti i rami verticali la temperatura fosse pari a 4°C. Una apposita tabella (vedi tabella allegata) consente di determinare immediatamente, in funzione della temperatura letta allo strumento, la correzione da apportare alla lettura. Ottenute le letture corrette si calcolano facilmente le variazioni di quota dei pilastri, come indicato nel modulo stesso.

7. Conclusione

Con l'impianto di livellazione idrostatica realizzato nel Duomo di Milano si sono raggiunti in modo più che soddisfacente gli scopi che ci si era prefissi; le operazioni di misura relative all'intera livellazione possono essere infatti eseguite, come si è detto, in meno di un'ora dal personale stesso della Fabbrica del Duomo; inoltre vengono eseguite nello scantinato del Duomo (*) e quindi non solo non interferiscono con eventuali lavori di restauro eseguiti all'interno, ma possono svolgersi indipendentemente dalla presenza di folla o dallo svolgersi di funzioni; situazione questa che rende a volte più impegnativa, se non impossibile, la normale livellazione geometrica.

Un cenno infine va fatto per ricordare che le difficoltà di ordine pratico incontrate nel realizzare l'impianto sono state non indifferenti; maggiore tra tutte quella derivante dalla necessità di far seguire alla tubatura principale un andamento orizzontale lungo tutto il percorso.

A questo proposito, prima di chiudere questa nota, sento il dovere di ringraziare l'ing. Carlo Ferrari da Passano, Architetto della Fabbrica del Duomo, per la preziosa collaborazione offerta nell'esecuzione dei lavori necessari alla realizzazione dell'impianto e per i suggerimenti di valide soluzioni atte a superare tutte le difficoltà che l'ambiente, non proprio ideale per un'applicazione del genere, ha presentato.

(*) E' opportuno sottolineare che nello scantinato non sarebbe possibile determinare i cedimenti dei pilastri mediante la livellazione geometrica, poiché la visuale è possibile solo tra alcuni di essi.

BIBLIOGRAFIA

[1] R. Galetto, C. Mazzon - La livellazione idrostatica applicata ai controlli delle deformazioni di grandi strutture. (Bollettino SIFET 1970).