

PROVE SPERIMENTALI SU TRE LIVELLI ZENITALI

COMUNICAZIONE PRESENTATA AL XVI CONVEGNO SIFET
FIUGGI 29 SETTEMBRE - 4 OTTOBRE 1971

Carlo Monti

1. *Premessa*

Per misurare spostamenti relativi fra punti posti sulla stessa verticale in grossi manufatti edili, si ricorre generalmente al collaudato uso di fili a piombo dritti o rovesci.

Questa tecnica, tuttora validissima, comporta però, in certe situazioni, numerose difficoltà, che possono essere così riassunte:

- necessità di lasciare in loco, cioè vincolata alla struttura, la piastra d'attacco superiore del filo a piombo, il filo e la piastra d'attacco del coordinatometro;
 - necessità, in molti casi, di attrezzature e di piccoli manufatti (non sempre di semplice fattura) per poter posare lo smorzatore e il secchio che lo contiene su un piano, all'altezza necessaria;
 - presenza di vento o di correnti d'aria che turbano la posizione di equilibrio del filo; questa difficoltà è trascurabile, anzi praticamente inesistente all'interno di grandi strutture, ma considerevole a cielo aperto. In quest'ultimo caso infatti è quasi sempre necessario intubare il filo lungo tutta la sua lunghezza per annullare l'effetto del vento;
 - difficoltà, quando il filo è di notevole lunghezza, di realizzare fili a piombo che abbiano una condizione di equilibrio stabile. Si ottiene ciò aumentando il peso all'estremità inferiore del filo con le conseguenti complicazioni che ne derivano (fili di maggior diametro, smorzatori più grandi ed ingombranti, mensola d'attacco quindi più lunga e più robusta ecc.).
- Le numerose ricerche fatte con i fili a piombo indicano chiaramente la possibilità e i limiti del sistema.

Il livello zenitale (o nadirale o con entrambe le visuali) sembra risolvere brillantemente le difficoltà principali che limitano l'uso del filo a piombo e, in particolare modo, non richiede attrezzature fisse di grossa mole, non risente dell'azione del vento (almeno entro certi limiti), è di facile uso e di precisione generalmente sufficiente agli scopi per cui è impiegato.

Per valutare appunto la precisione ottenibile con questi strumenti in funzione della distanza del punto collimato, si è proceduto ad una serie di misure, a distanza mano a mano crescente, con tre livelli zenitali di caratteristiche diverse.

2. Descrizione degli strumenti

2.1. LIVELLO KERN OL ZENITALE

Questo strumento è composto da due cannocchiali rigidamente collegati fra loro, uno con visuale zenitale, l'altro nadirale. L'obiettivo del cannocchiale ha un'apertura di mm 30 ed un ingrandimento di 22,5 x. La livella, a coincidenza, ha una sensibilità di 10" per mm. Il livello impiegato non ha la costituzione originaria, ma è stato modificato presso l'officina dell'Istituto di Geodesia, Topografia e Fotogrammetria del Politecnico di Milano per consentirne un impiego più funzionale.

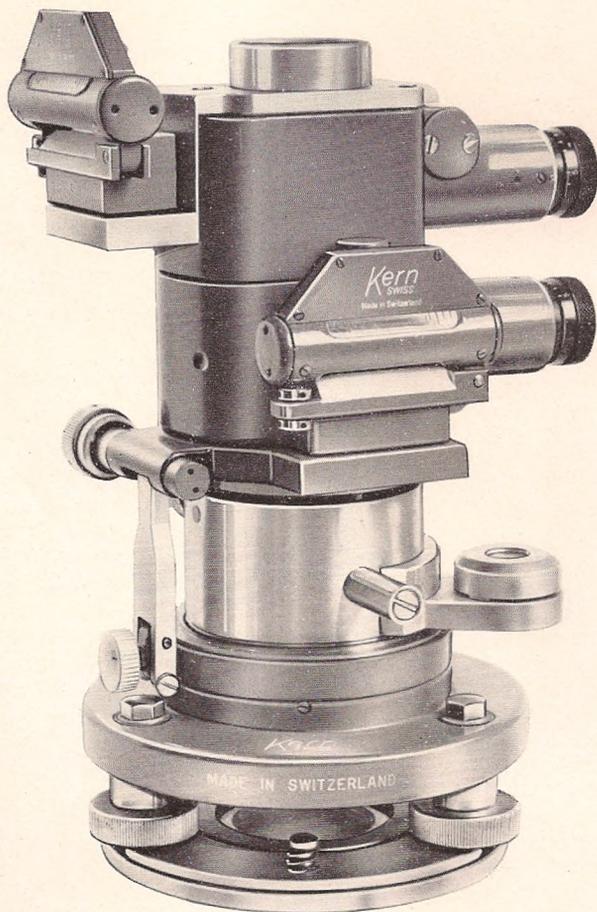


fig. 2.1.1

Le modifiche consistono nell'aver aggiunto una livella dello stesso tipo di quella montata in serie, in direzione normale all'asse dei due cannocchiali e nell'aver introdotto un sistema a vite di elevazione per centrare tale livella.

La figura 2.1.1 riproduce lo strumento modificato (*).

Lo scopo da raggiungere con l'introduzione della nuova livella è quello di consentire all'operatore di eseguire comodamente le letture coniugate anche quando lo strumento viene usato per misurare gli spostamenti trasversali di una parete. Su tale parete o superficie verticale in genere viene posto un supporto per scala graduata e lo strumento viene posizionato su una piastra fissata alla parete con centramento forzato. L'operatore è costretto perciò ad eseguire due letture coniugate, una in posizione comoda, l'altra con la testa sopra la piastra, tra lo strumento e la parete, in posizione assai scomoda perchè, il più delle volte, ragioni di ingombro non consentono piastre e supporti delle scale graduate troppo lunghi. La soluzione adottata consente le letture coniugate in posizione parallela, assai vicina alla parete stessa, ma sempre assai comoda. Non è da dimenticare inoltre che il centramento della livella a coincidenza mediante vite di elevazione è assai più agevole che operando sulle viti di base.

2.2. LIVELLO OTTICA DI JENA PZL

Il livello PZL è caratterizzato da un cannocchiale di 31,5 ingrandimenti ed un'apertura di 40 mm. E' un autolivello con sistema compensatore pendolare a gravità, che stabilizza automaticamente la linea di mira. E' dotato di piombino ottico per centramento su un punto a terra, di una livella sferica e di una torica con sensibilità rispettivamente di 8' e di 30" per 2 mm, quest'ultima per la messa in verticale del piano di oscillazione del pendolo a gravità. Questo lavora in un campo di oscillazione di $\pm 10^\circ$ ed è smorzato ad aria.

Il principio generico della compensazione dell'inclinazione è illustrato nella fig. 2.2.1: quando il livello è inclinato, rispetto alla verticale, di un angolo β (ammesso che β sia un angolo piccolo), risulta, in assenza di correzione della linea di mira, un errore di misura sulla scala $q = h \cdot \beta$.

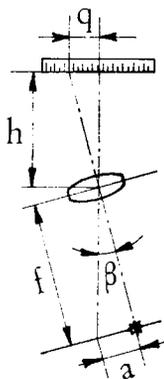


fig. 2.2.1

Si può ottenere una indicazione corretta spostando il fascio luminoso convergente di una quantità $a = \beta \cdot f$. Per ottenere ciò si impiega un prisma ad angolo retto sospeso ad una lamina di lunghezza $f/2$. La fig. 2.2.2 rap-

(*) Per ciò che concerne le modifiche apportate e le loro caratteristiche nei dettagli, si rimanda alla memoria di Bonino-Cuniatti « Modifiche apportate al livello zenitale Kern per migliorarne l'uso nella determinazione di variazioni di posizione di punti posti sulla stessa verticale, Bollettino SIFET n. 3, 31 ottobre 1970.

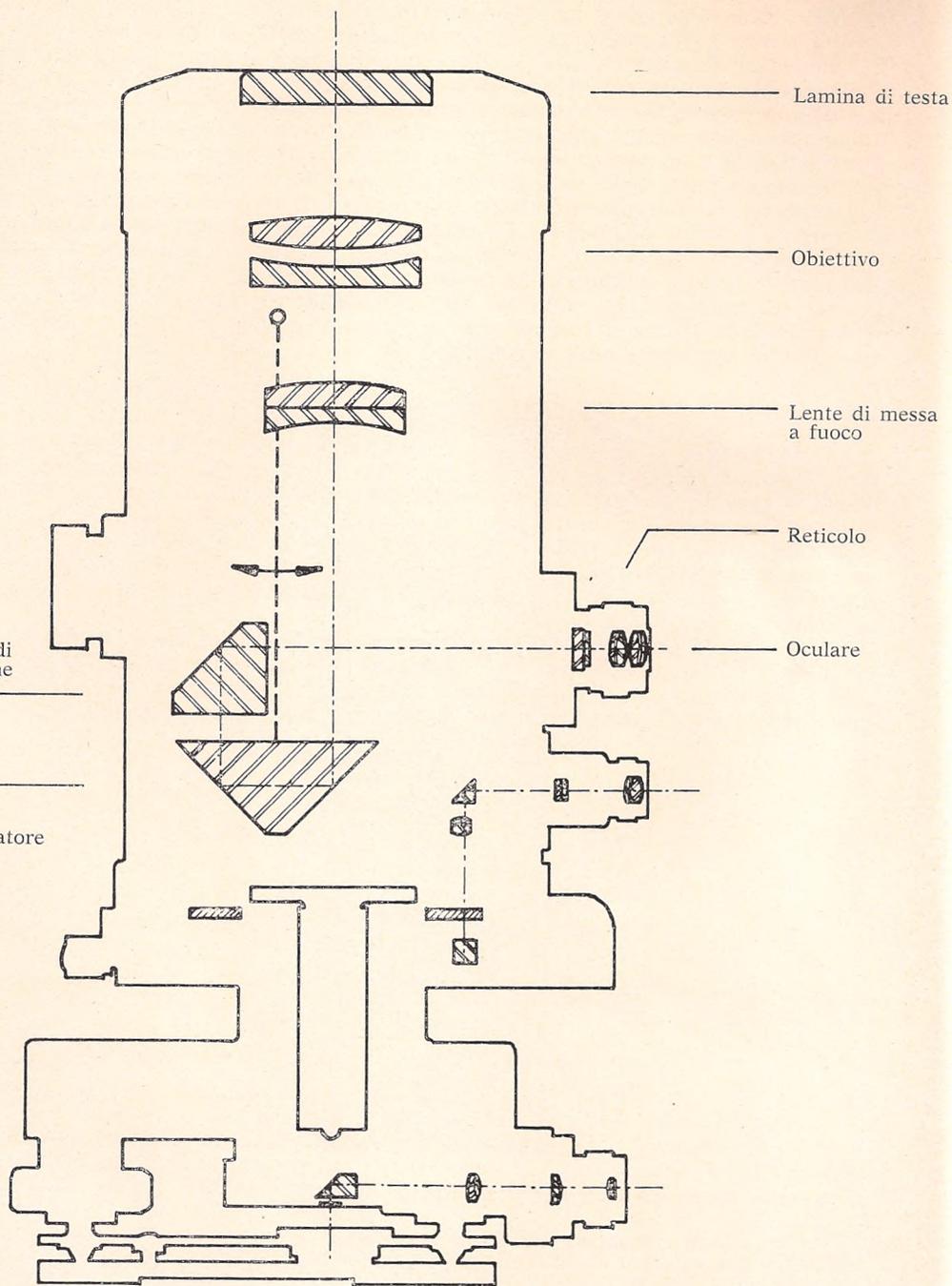


fig. 2.2.2

presenta lo schema interno del livello. Per uno spostamento di $a/2$ nella direzione dell'ipotenusa del prisma sospeso, il raggio di uscita subisce una deviazione pari ad a (fig. 2.2.3). Essendo il prisma sospeso ad una lamina di lunghezza $f/2$, inclinando lo strumento di β il prisma si sposta di $f/2 \cdot \beta = a/2$. Il raggio uscente dal prisma, quindi la linea di mira, si sposta di a , ottenendo in tal modo sul reticolo l'immagine del punto posto sopra la verticale.

Operativamente con questo strumento è necessario fare la lettura nel piano che contiene il supporto della scala graduata fissata alla parete. Nascono quindi le stesse difficoltà, facendo letture coniugate, per cui si è ritenuto opportuno modificare il Kern. La figura 2.2.4 mostra lo strumento nel suo insieme.

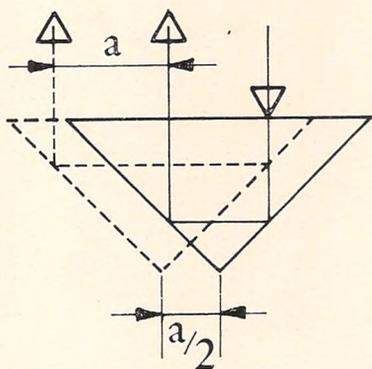


fig. 2.2.3

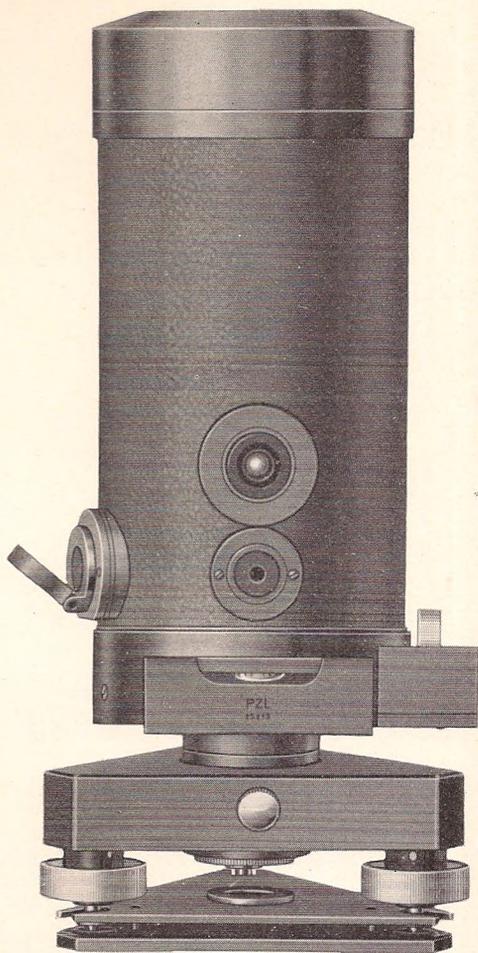


fig. 2.2.4

2.3. LIVELLO ZENITALE CZ 71 SALMOIRAGHI

Il livello zenitale Salmoiraghi, esemplare unico costruito dalla Salmoiraghi su richiesta ed in base ai suggerimenti dell'Istituto di Geodesia, To-

pografia e Fotogrammetria del Politecnico di Milano, conserva, in linea di massima, le caratteristiche dell'autolivello di precisione modello 5190: apertura dell'obiettivo 45 mm, livella sferica con sensibilità $10''/2$ mm. Il cannocchiale ha però 40 ingrandimenti anzichè 30 come il livello 5190 ed ha reticolo a croce semplice senza il tratto a "V".

Il dispositivo pendolare di compensazione è realizzato appendendo il reticolo a tre fili (**) (fig. 2.3.1).

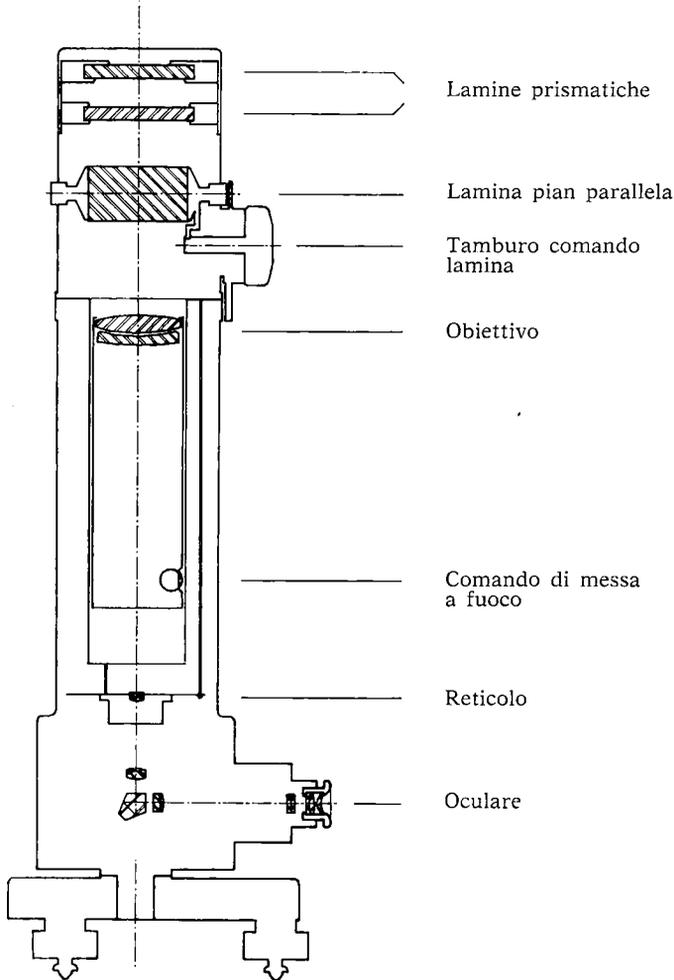


fig. 2.3.1

(**) Per il tipo di sospensione elastica si rimanda alla pubblicazione di C. Mazzon « Alcune questioni riguardanti i livelli autolivellanti », Rivista del Catasto e dei SS.TT.EE., nuova serie, anno XII, n. 1, 1957, e a quella di R. Bruscazioni « Problemi tecnici incontrati nella progettazione degli strumenti autolivellanti », Atti della Fondazione G. Ronchi, Anno XIV, n. 5, Sett.-Ott. 1959, pagg. 440-469.

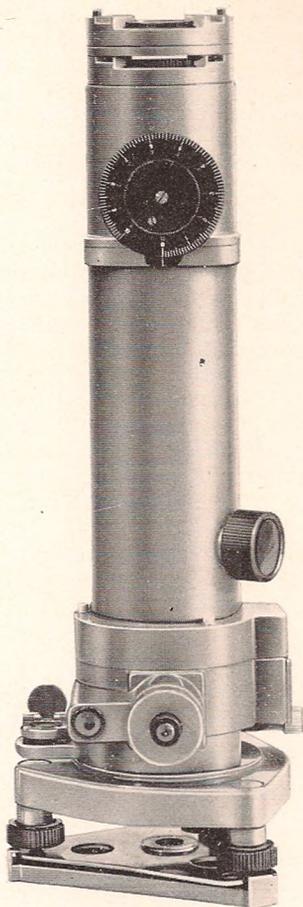


fig. 2.3.2

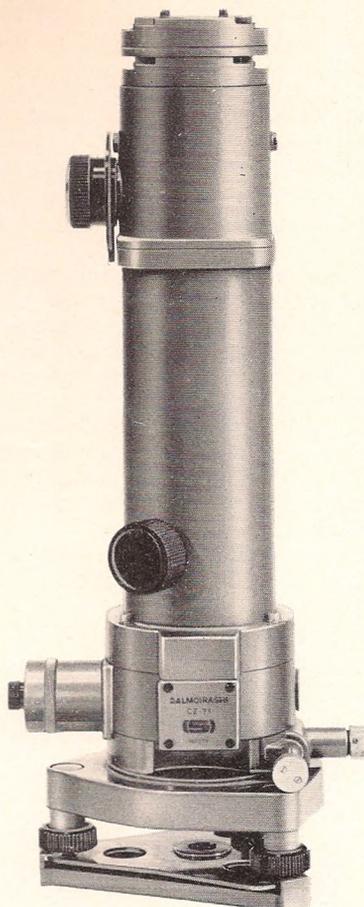


fig. 2.3.3

Il compensatore entra in funzione quando la verticalità dello strumento è contenuta entro $5'$. Ciò si ottiene facilmente centrando la livella sferica. Un riferimento fisso entro cui deve posizionarsi il reticolo mobile permette di vedere quando il compensatore è in azione. Lo smorzamento è ottenuto a cuscino d'aria. Questo livello non è dotato di piombino ottico, essendo previsto il suo impiego esclusivamente in posizione fissa; è dotato invece di lastra pianoparallela manovrata attraverso un tamburo graduato che sposta la visuale facendo un'escursione completa sulla scala di 10 mm. Si ottiene così la lettura diretta di 0,1 mm. Il tamburo è diviso in 100 tratti numerati da 0 a 100 e da 100 a 0, cioè in corrispondenza di ogni tratto si trova scritto in bianco un numero ed in rosso il complemento a 100 di questo numero. Secondo che la scala graduata fissata alla parete è a destra o a sinistra dell'osservatore, alla lettura intera fatta sulla graduazione bisogna aggiungere o l'uno o l'altro dei due numeri. Le osservazioni alla scala graduata avvengono normalmente a questa, quindi l'operatore è parallelo alla parete cui è fissato

il supporto della scala. Lo strumento porta infine nella parte superiore due lamine prismatiche a spigolo incrociato per la rettifica dell'asse di collimazione.

Anche il CZ 71 è, come gli altri due livelli, dotato di una vite di piccoli spostamenti azimutali per poter porre un filo del reticolo parallelo ai tratti della graduazione. Le figure 2.3.2 e 2.3.3 mostrano lo strumento nel suo complesso: è visibile in particolare la doppia graduazione del tamburo.

3. *Strumentazione impiegata, accessori e luogo delle misure*

Sono state costruite allo scopo, presso l'officina dell'Istituto, alcune scale con graduazioni differenti. Le scale, a loro volta, vengono montate su supporti costituiti da un profilato a C molto rigido, sul quale viene, di volta in volta, messa la scala con la graduazione prescelta. Il profilato a C termina con un blocco magnetico munito di due spine sporgenti che vanno ad inserirsi in due fori corrispondenti, praticati in una piastra d'acciaio che viene fissata alla parete. Alcune delle differenti scale graduate sono disegnate su di un cartoncino bianco e quindi incollate su lastre di alluminio. Nella fig. 3.1 sono rappresentate le quattro graduazioni impiegate.

La scala A con graduazione millimetrica è tracciata direttamente sul profilato del supporto.

La scala B è a doppi tratti con interasse di 1 cm, con spessore di ogni tratto di 1 mm e con larghezza del tratto bianco di 1 mm.

La scala C ha graduazione a tratti alternativamente bianchi e neri, ciascuno con lo spessore di 0,5 cm.

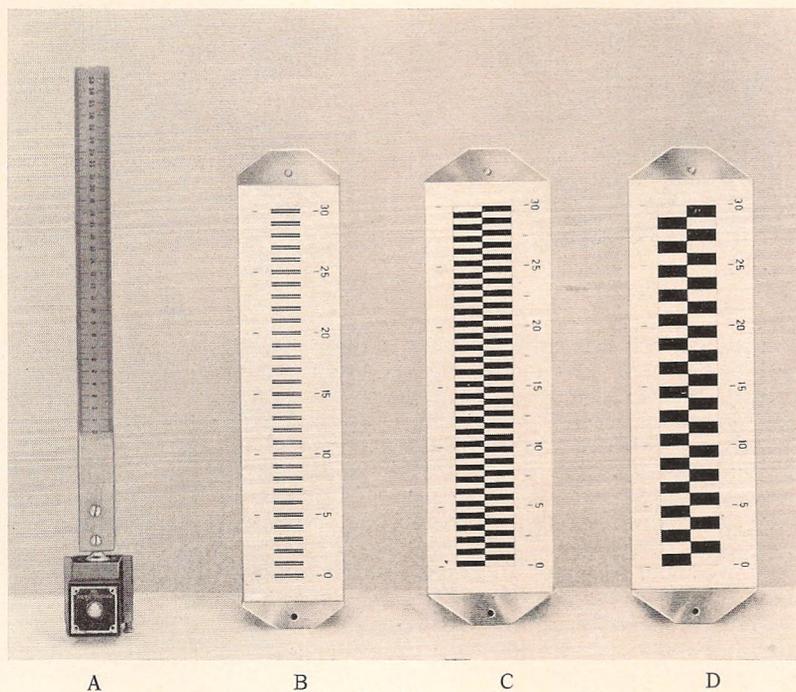


fig. 3.1

La scala D è analoga alla precedente, ma con tratti dello spessore di 1 cm.

Per ottenere gli spostamenti della struttura è necessario che le scale graduate siano eseguite con precisione. Poichè però lo scopo della ricerca è quello di trovare l'entità di alcuni errori strumentali e non gli spostamenti reali, è stato sufficiente ricorrere a graduazioni disegnate con cura su cartoncino, che offrivano la possibilità di realizzare e provare la graduazione più adatta alla condizione di impiego. Infatti gli e.q.m. di cui si dirà in seguito, escluso quanto alla lettera f , non dipendono dalla precisione metrica della scala graduata.

Il programma della ricerca esigea che si potesse disporre di una costruzione sufficientemente alta, con accesso a diverse altezze per poter variare progressivamente le distanze di lettura; possibilmente era preferibile operare al coperto. La soluzione del problema è stata resa possibile grazie alla R.A.S. (Riunione Adriatica di Sicurtà), che ha consentito l'uso di un cavedio interno alla Torre Velasca, sita nel centro di Milano. La Torre è percorsa in tutta la sua altezza da questo cavedio, cui si può accedere da ogni piano. Si è fatto stazione alla base del cavedio, cioè al primo piano sotterraneo, dove è stata fissata alla parete una opportuna mensola portastrumenti. Questa, costituita da una L di acciaio ad ali simmetriche, ognuna di 1x20x40 cm, fissata alla parete in c.a. con viti ad espansione, presenta due fori, uno più esterno per l'attacco del CZ 71 e del PZL, l'altro più interno per l'attacco del Kern (in quanto tali strumenti hanno viti di fissaggio diverse),

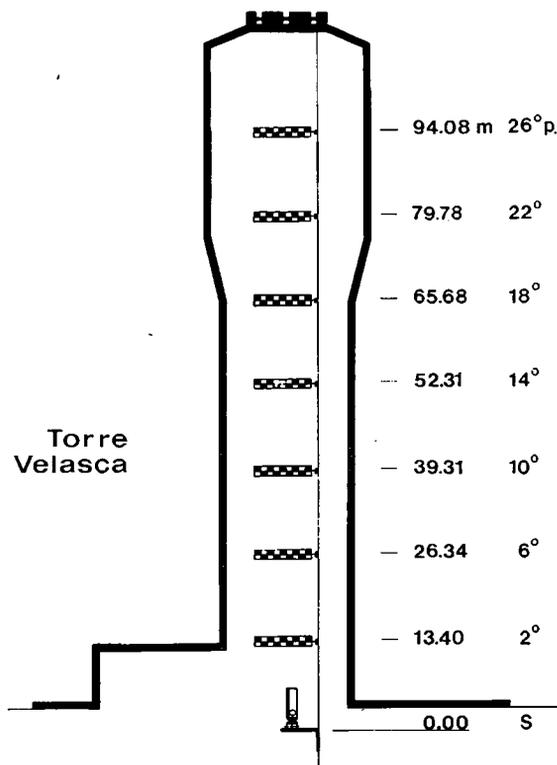


fig. 3.2

asolati in direzioni parallele alla parete. Lo scopo di questi fori speciali verrà chiarito in seguito. E' stato deciso di eseguire le letture sulla scala graduata ogni quattro piani a partire dal 2°. La fig. 3.2 schematizza la posizione degli strumenti e delle scale graduate all'interno della Torre. La distanza della piastra dalla scala graduata figura nella seguente tabella:

Piani	1° sott.	2°	6°	10°	14°	18°	22°	26°
Distanze	0.00	13.40	26.34	39.31	52.31	65.68	79.78	94.08

Per l'illuminazione delle scale graduate si è impiegata una lampada da 150 W, schermata lateralmente, montata sopra un trespolo regolabile in altezza, collocato molto vicino alla scala stessa.

4. Operazioni eseguite con i tre strumenti

Procediamo ad un'analisi generale degli scopi che si volevano raggiungere con le misure intraprese. Determinazione:

a. Dell'errore quadratico medio complessivo di lettura a stima o a coincidenza della posizione del reticolo sulla graduazione e di centramento e compensazione degli organi con cui si realizza la visuale verticale al crescere della distanza.

Con il Kern e lo Jena, messo in stazione lo strumento, allineato il reticolo ai tratti della graduazione con la vite dei piccoli movimenti azimutali, veniva eseguita la lettura a stima della decima parte dell'intervallo della scala. Inoltre, per vedere la sensibilità dell'apparato che realizza la verticale, con il Kern è stata ripetuta ad ogni lettura la coincidenza della bolla, con lo Jena, muovendo una vite di base, la stabilizzazione del sistema pendolare. Con il Salmoiraghi, dotato invece di lamina piano-parallela, una volta allineato il reticolo, veniva eseguita la coincidenza del filo con i tratti della graduazione. Muovendo poi la lamina piano-parallela si ripeteva la stima e al tempo stesso la stabilizzazione del sistema pendolare, messo in vibrazione dal comando della lamina.

b. Dell'errore quadratico medio di misura della posizione dei due punti posti sulla stessa verticale, in funzione della distanza; poichè per eseguire le misure occorre fare la media delle due letture eseguite con il livello nelle due posizioni coniugate, cioè ruotate di π , alla formazione di questo errore contribuiscono, oltre alle precedenti cause, anche il non perfetto allineamento del reticolo con la graduazione nelle due posizioni coniugate.

c. Dell'influenza della posizione dell'asse dello strumento, quindi del reticolo, rispetto alla graduazione della scala; se cioè il centro del reticolo cade al centro della graduazione oppure è spostato lateralmente verso destra o verso sinistra.

d. Dell'influenza del tipo di graduazione sulla precisione delle letture.

e. Dell'errore di messa in stazione; considerando che lo strumento deve essere tolto e rimesso sulla piastra quando lo si impiega per la determinazione periodica di spostamenti relativi, se esistono giochi meccanici negli organi di fissaggio, questi influiscono sulla misura e si tratta perciò di determinarne l'entità.

f. Degli errori di graduazione dell'organo di lettura della lamina piano-parallela (per il solo strumento Salmoiraghi).

Prima di procedere all'analisi di ogni singolo punto, conviene anteporre e chiarire il significato di quanto menzionato in c, essendo necessaria premessa a tutto il resto.

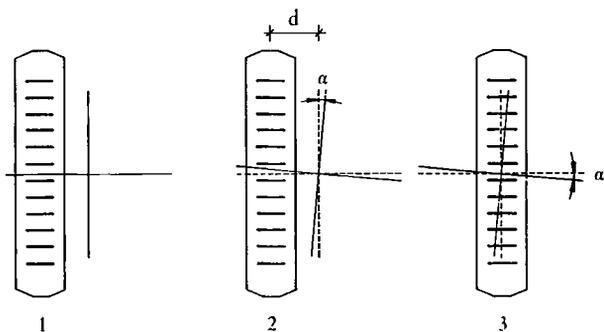


fig. 4.1

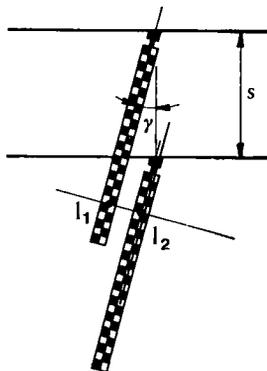


fig. 4.2

Nel paragrafo 3 era stato detto che la piastra porta-strumenti presenta due fori per l'attacco delle viti di fissaggio degli strumenti, ciascuno dei quali asolato nella direzione normale al supporto della scala graduata, quindi paralleli alla parete. A causa delle difficoltà insite nella sistemazione delle scale graduate sulla verticale dello strumento, può verificarsi durante il puntamento alla stadia uno dei casi illustrati nella fig. 4.1.

In questa ricerca ci si preoccupa solo del parallelismo fra reticolo e graduazione e non di quello fra direzione dello spostamento misurato ed asse della graduazione. Anche quest'ultimo parallelismo è necessario per una corretta determinazione dello spostamento, tuttavia la sua influenza è sempre molto limitata a causa del fatto che gli spostamenti misurati sono sempre di piccola entità. In fig. 4.2 è illustrata l'influenza del non parallelismo fra direzione dello spostamento S ed asse della graduazione; dalla figura risulta che se l_1 ed l_2 sono le letture sulla graduazione il cui asse è inclinato di γ rispetto alla direzione dello spostamento si ha:

$$S = (l_1 - l_2) / \cos \gamma$$

Valori di γ anche di qualche grado non provocano sensibili variazioni nella misura di S , quando $l_1 - l_2$ è contenuto entro qualche mm.

Ben diverso è il comportamento dell'errore dovuto al non parallelismo fra tratto della graduazione e reticolo strumentale. Infatti, con riferimento alla fig. 4.1, le condizioni 1 e 2, analoghe per avere entrambe il centro del reticolo esterno alla graduazione, differiscono soltanto per l'inclinazione α che il filo del reticolo può avere nei confronti della graduazione. In questo caso l'errore di cui è passibile la lettura è

$$l = d \tan \alpha$$

ove d è la distanza fra centro del reticolo ed asse della graduazione.

Nel caso 3, centro del reticolo al centro della graduazione, cioè quando $d = 0$, il non parallelismo fra fili del reticolo e tratti, anche se presente, non determina errori sensibili nelle letture.

Poichè esiste una obiettiva difficoltà, spesso riscontrata, per posizioni del reticolo assai eccentriche, di disporre parallelamente il filo e i tratti della graduazione (quindi di annullare α), si è voluto controllare sperimentalmente, eseguendo letture ripetute in tre posizioni strumentali differenti, l'influenza che la posizione di questo ha sull'e.q.m. delle misure. Le tre posizioni sono centro del reticolo a destra (D), al centro (C) e a sinistra (S) della graduazione della stadia.

TAB. 4.1 (UNITA' DI MISURA DEGLI E.Q.M. 10^{-2} mm)

KERN OL				OTTICA di JENA				SALMOIRAGHI CZ 71										
Distanza [m]	Piano	Stadia	POSIZIONE			Distanza [m]	Piano	Stadia	POSIZIONE			Media quadr. e.q.m.						
			1	2	3				1	2	3							
13.40	2°	A	17.7	25.4	20.4	13.40	2°	A	4.8	5.2	7.0	13.40	2°	B	3.5	3.5	3.9	3.6
13.40	2°	C	0	0	21.1	26.34	6°	A	14.9	10.5	18.3	26.34	6°	B	4.8	4.1	5.2	4.7
26.34	6°	C	33.7	21.1	21.1	26.34	6°	C	12.1	13.2	7.9	26.31	10°	B	9.8	15.8	8.4	11.8
39.31	10°	C	33.7	36.9	28.4	39.31	10°	C	13.2	10.5	12.9	39.31	10°	C	8.4	11.7	11.6	10.7
52.31	14°	C	48.3	40.8	51.6	52.31	14°	C	16.9	10.5	12.9	52.31	14°	C	12.6	12.5	10.7	12.0
65.68	18°	C	33.7	48.6	42.5	65.68	18°	C	28.4	43.8	37.4	65.68	18°	C	12.9	11.2	20.9	15.6
79.78	22°	C	66.5	47.4	63.2	79.78	22°	C	55.0	65.8	51.6	79.78	22°	C	25.4	20.7	29.2	25.3
79.78	22°	D	73.8	63.2	78.9	79.78	22°	D	42.2	73.8	63.2	94.08	26°	C	30.3	28.8	29.3	29.5
94.08	26°	D	133.7	108.0	73.8	94.08	26°	D	51.6	31.6	47.1	94.08	26°	C				
94.08	26°	C	105.5	47.4	62.4	94.08	26°	C	42.5	94.4	59.9	94.08	26°	C				

a. Errore di stima e coincidenza

La ricerca è stata compiuta con strumento e operatore sempre nella stessa posizione e le letture sono state dieci per ognuna delle tre posizioni strumentali sulla piastra (D, C, S), per un totale di 30 letture per piano. Con il Kern ogni lettura a stima avveniva dopo aver spostato e ricentrato la livella a coincidenza; con lo Jena, dopo aver mosso la vite di base, posta nella direzione del movimento pendolare del compensatore; col Salmoiraghi ruotando la lamina piano-parallela e ripetendo la coincidenza. Queste prove sono state effettuate a partire dal piano più vicino fino al più lontano. La tabella 4.1 contiene i valori numerici degli e.q.m. ottenuti per ciascuno strumento. Nella prima e seconda colonna sono indicati la distanza ed il piano su cui è stata sistemata la scala graduata; ad uno stesso piano sono state spesso eseguite misure con scale graduate diversamente; la terza colonna indica il tipo di graduazione impiegato; la quarta, quinta e sesta contengono le stime degli e.q.m. da cui è affetta una generica lettura alla scala in ciascuna delle tre posizioni del reticolo rispetto alla graduazione. Lo schema si riproduce per gli altri due strumenti.

Un'analisi della possibile correlazione esistente fra e.q.m. di misura in una delle tre posizioni del reticolo, rispetto alla scala, e la posizione stessa è stata fatta attraverso il calcolo dell'indice del Pearson, che ha dato come risultato un valore praticamente nullo. E' stato quindi possibile mediare i tre e.q.m. ad ogni piano, ottenendo i valori che compaiono nella colonna 7, mediante i quali è stato tracciato il grafico riportato nella tavola 4.1. Questo grafico descrive l'andamento degli errori medi al crescere della distanza ed al variare del tipo di graduazione. La scala A è stata usata al secondo piano per il Kern e al secondo e al sesto piano per lo Jena; mentre con il Kern, pur essendo modesta la distanza, i risultati ottenuti non sono stati molto soddisfacenti, per la difficoltà di stimare le frazioni di millimetro causa lo spessore del filo del reticolo, con lo Jena, dotato di un reticolo assai sottile e con più ingrandimenti, questa stima è risultata agevole. La scala C, impiegata fin dal secondo piano per il Kern, dal sesto per lo Jena e dal decimo per il Salmoiraghi, ha potuto essere utilizzata fino alla massima distanza, dimostrandosi la più idonea per la visibilità dei tratti e per la stima delle frazioni di intervallo. La scala B usata per il Salmoiraghi fino al decimo piano, ha dovuto poi essere sostituita perchè la larghezza del reticolo, nei confronti dell'intervallo del doppio tratto, rendeva problematica la stima

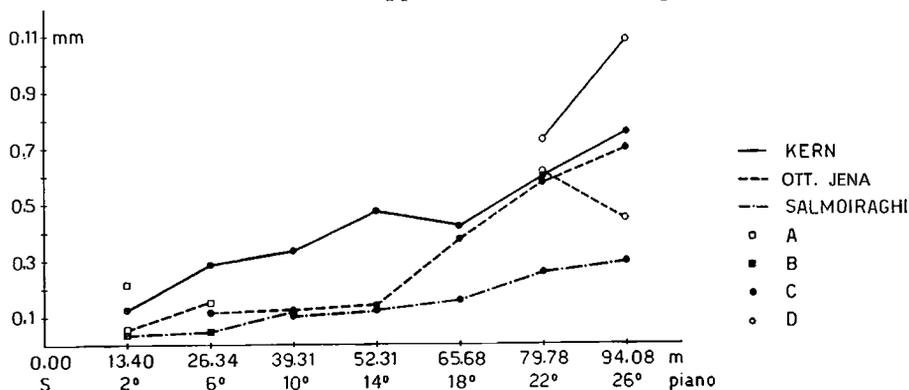


Tavola 4.1