

# PROBLEMI TECNICI INCONTRATI NELLA PROGETTAZIONE DEGLI STRUMENTI AUTOLIVELLANTI

Dr. Ing. RAFFAELLO BRUSCAGLIONI

*Comunicazione presentata al IX Convegno Nazionale della S.I.F.E.T.  
Cagliari - maggio 1964*

## 1. Introduzione

Quando mi è stato chiesto di preparare una breve esposizione, per questo Convegno, riguardante i problemi incontrati nella progettazione e costruzione dei livelli automatici, io a tutta prima ritenni il mio compito di nessuna difficoltà, poiché i livelli automatici Salmoiraghi sono basati su un principio estremamente semplice: il pendolo. Nessun problema concettualmente astruso né di difficile soluzione si era presentato nella realizzazione di questi strumenti, partendo da un semplice schema base tutti i problemi costruttivi hanno avuto una sequenza altrettanto semplice e logica.

Sarebbe stato per me un vero piacere dimostrare come la soluzione completa di tutti i vari problemi costruttivi non fu altro che una serie di quasi ovvie conseguenze. In tal modo sarebbe stato molto più facile per gli ascoltatori comprendere a fondo l'essenza di ciascun problema.

Tuttavia, quando mi accinsi a consultare i documenti dell'archivio dell'Ufficio Ricerche della Salmoiraghi per estrarre i più interessanti soggetti, mi accorsi che il lavoro che mi ero proposto risultava quasi impossibile a realizzarsi in accordo col mio iniziale programma. Avevo infatti in mano la documentazione descrittiva di un paziente lavoro, che era stato compiuto in non meno di due anni, attorno ad uno stesso tema centrale con una sequenza di successivi studi parziali, che era impossibile esporre nella loro successione logica entro un ragionevole termine di tempo e senza abusare della vostra pazienza.

Ho dovuto, perciò, rinunciare al mio primo programma di dare piena dimostrazione della grande semplicità e chiarezza di tutta la progettazione degli autolivelli Salmoiraghi ed ho dovuto limitarmi a presentare solo alcuni esempi isolati dei problemi che, nella loro essenza e nella tecnica della loro soluzione, possono avere qualche particolare interesse per voi.

La presentazione di questi problemi così distaccati l'uno dall'altro, avrà lo svantaggio di rendere la loro comprensione un poco più difficile, ciò che io cercherò di evitare il più possibile.

Gli autolivelli costruiti dalla Salmoiraghi sono di due differenti classi:

- a) di alta precisione,
- b) di media precisione.

I dispositivi di indice automatico e di livella ottica dei teodoliti mod. 4149 e 4200 sono direttamente derivati da questi autolivelli.

In questa nostra esposizione avremo appena il tempo necessario per parlare

del tipo di livello di alta precisione, che ovviamente presenta i piú interessanti problemi soprattutto dal punto di vista dei tecnici che utilizzano gli strumenti in argomento. Il tipo di media precisione ed i dispositivi d'indice automatico, sono stati dedotti dai livelli di alta precisione attraverso una serie di semplificazioni. Tuttavia qualche problema particolarmente difficile è stato originato dalle seguenti considerazioni:

- a) ridurre i costi di fabbricazione al minimo possibile onde permettere l'uso del livello automatico anche nelle applicazioni piú modeste;
- b) miniaturizzare i vari componenti per consentire al dispositivo pendolare — una caratteristica del sistema di livellazione automatica Salmoiraghi — di prendere posto entro il ristretto spazio disponibile delle spalle dei teodoliti 4149 e 4200, onde costituire i dispositivi di livella sferica ottica e di indice automatico.

## 2. Principio fondamentale

Il principio fondamentale del dispositivo autolivellante Salmoiraghi è quello del pendolo ottico, ed è chiaramente indicato nel dispositivo sperimentale di fig. 1 (che illustriamo al solo scopo di rendere piú comprensibile la nostra esposizione).

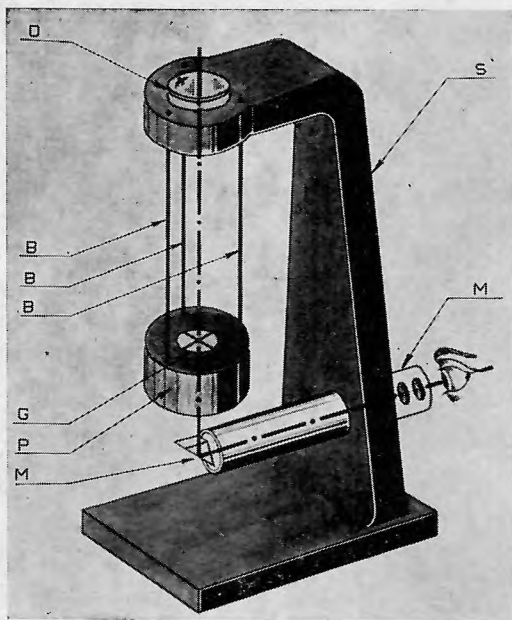


Fig. 1

Un corpo pendolare P è sospeso al corpo di uno stativo S sperimentale attraverso una sospensione pendolare che nel suo aspetto finale è stata realizzata con tre barrette elastiche B.

Il reticolo G è rigidamente fissato al corpo pendolare P, mentre l'obiettivo O è fissato rigidamente allo stativo S. La distanza fra l'obiettivo O ed il reti-

colo G è tale che il suo fuoco posteriore cada sul piano di G. Un microscopio di osservazione M permette di vedere simultaneamente il reticolo G e l'immagine degli oggetti all'infinito fornita dall'obbiettivo O. Il centro ottico di O e il reticolo G individuano una direzione quasi verticale.

Può essere facilmente dimostrato matematicamente che:

1 - Se le barrette di sospensione sono perfettamente fissate alle loro estremità, il corpo pendolare si sposta come se fosse sospeso a barrette sfericamente incernierate ai due estremi ed il suo movimento rispetto allo stativo — quando lo stativo è inclinato per spostamento dalla direzione verticale — è per piccoli angoli proporzionale alla inclinazione dello stativo stesso. L'effetto di giunzione rigida delle barrette è quella di virtualmente ridurre la lunghezza delle barrette medesime di una quantità  $\Delta 1$  che può essere matematicamente calcolata sulle basi delle note leggi dell'elasticità. Questa quantità, nel caso di una sospensione a 3 barrette, è espressa da:

$$\Delta 1 = 3,48 \frac{E J}{P}$$

dove:

E è il modulo di elasticità delle barrette di sospensione

J è il momento di inerzia trasversale delle barrette stesse

P è il peso del corpo pendolare sospeso.

Comportandosi geometricamente in maniera identica delle barrette incernierate, le barrette fissate hanno il vantaggio di eliminare praticamente e totalmente l'attrito delle cerniere.

2 - Facili sviluppi matematici in base a considerazioni di ottica geometrica dimostrano che se la lunghezza virtuale di queste barrette B è eguale alla lunghezza focale dell'obbiettivo O, la direzione quasi verticale dell'asse di puntamento O-G rimane costante nello spazio quando la inclinazione dello stativo S varia; il punto all'infinito collimato vicino allo Zenith attraverso il sistema sperimentale di fig. 1, rimane costante quando varia la inclinazione dello stativo.

3 - Considerazioni di ottica geometrica non ovvie, ma matematicamente molto semplici, ed analoghe a quelle conosciute per il problema dell'anallattismo dei cannocchiali tacheometrici, dimostra che per non grandi inclinazioni dello stativo, il punto collimato rimane costante se le inclinazioni dello stativo stesso avvengono attorno al *fuoco anteriore* dell'obbiettivo. Questo accade anche se l'oggetto collimato è molto vicino e se quindi risulta necessario — per poter osservare simultaneamente a fuoco il reticolo e gli oggetti esterni — regolare la distanza fra obbiettivo e reticolo in modo da essere molto più grande della lunghezza focale dell'obbiettivo. Cosa importantissima è che, in queste condizioni, la lunghezza delle barrette di sospensione deve rimanere esattamente quella necessaria per la collimazione all'infinito. Quindi, non è necessario variare la lunghezza delle barrette anche se varia la distanza degli oggetti da collimare; la stabilità della linea di mira è quindi assicurata per qualsiasi distanza degli oggetti da collimare.

Noi utilizzeremo in seguito questa importante conclusione quando illustreremo

come lo strumento, che per ora è solo un indicatore di direzioni zenitali o quasi zenitali automaticamente stabilizzate, diventa un livello automatico.

4 - Per rendere orizzontale la linea di mira quasi verticale del dispositivo di fig. 1, è sufficiente avere un sistema di specchi che la devieranno esattamente di  $90^\circ$ . Il fatto che non sia sufficiente un solo specchio, ma che ne occorrono due ( $R_1$  ed  $R_2$ ) come mostra la fig. 2, è cosa particolarmente favorevole.

Semplici considerazioni di ottica geometrica mostrano che con una doppia riflessione noi possiamo evitare l'inversione dell'immagine sul reticolo G e possiamo mantenere concorde il movimento ottico dell'immagine e il movimento meccanico del reticolo, anche se varia l'inclinazione di tutto lo stativo. Si ottiene così una linea di mira costantemente stabilizzata nella direzione orizzontale o quasi orizzontale, in una relazione angolare fissa ( $90^\circ$ ) rispetto alla linea stabilizzata verticale. Si noti il fatto che la richiesta di due superfici riflettenti anziché di una, rende il problema della stabilità meccanica dello strumento molto più facile. Le due super-

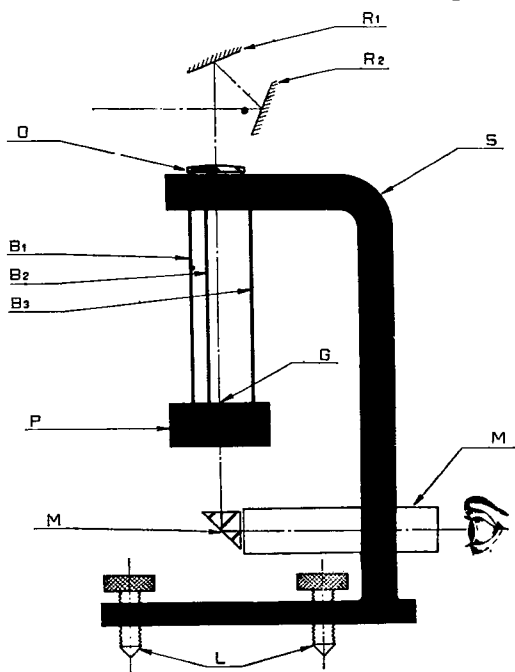


Fig. 2

fici riflettenti possono infatti essere facilmente combinate in un prisma pentagonale od in un dispositivo simile alle scatole di testa dei telemetri, per cui la più importante caratteristica ottica è quella di dare una costante deviazione della linea di mira, anche se per qualsiasi effetto termico o meccanico si possono verificare movimenti relativi fra scatola di testa, supporto del sistema riflettente ed il resto dello strumento. Vedremo in seguito come questa proprietà è particolarmente importante.

Il dispositivo della fig. 2, identico a quello della fig. 1 con l'aggiunta di due

specchi ( $R_1$  ed  $R_2$ ) costituisce già nel suo insieme la parte essenziale di un livello automatico. Per questa ragione nella fig. 2 sono state indicate in L le viti di livellamento grossolano dello stativo S. Possiamo ora già renderci conto che manovrando le viti di livellamento L, il reticolo G si muove nel campo del microscopio M per effetto dei movimenti pendolari; inoltre l'immagine degli oggetti esterni si muove di una eguale quantità e in pratica la direzione collimata rimane costante, realizzando così il livellamento automatico.

A questo punto è opportuno esaminare i problemi relativi al progetto fondamentale, cioè i problemi relativi alle caratteristiche tecniche che abbiamo assunto come dato di partenza.

I concetti base del progetto fondamentale furono i seguenti:

a) Avendo appreso dai dati sperimentali ottenuti con dispositivi simili a quelli illustrati in fig. 1 e 2 che l'assenza di attriti e di inerzia del compensatore a pedolo era praticamente completa, è stato possibile studiare l'applicazione del pendolo a sospensione elastica ai livelli di più alta precisione.

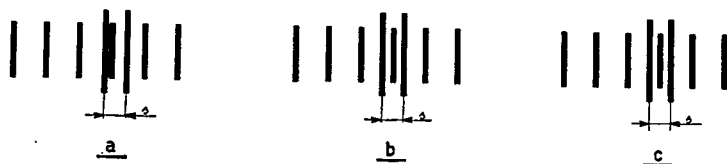
b) I livelli della più alta precisione possibile sono quelli che richiedono da parte degli utilizzatori la più grande abilità e pazienza per essere « messi in bolla » e poi « tenuti in bolla ». Per questi livelli, più che per i livelli di media e bassa precisione, la stabilizzazione automatica della linea di mira risulta più importante e vantaggiosa. Nelle operazioni di livellazione della più alta precisione, è necessario mantenere il posizionamento della linea di mira sicuramente e costantemente entro circa  $1/5$  di un secondo sessagesimale (in pratica entro un milionesimo di radiante); non è necessario che tale posizionamento sia esattamente orizzontale, ma è necessario che la sua inclinazione rimanga costante durante l'uso dello strumento entro la precisione indicata di  $1/5$  di secondo.

Una più alta precisione nel posizionamento della linea di mira non è tecnicamente richiesta per le inevitabili cause perturbatrici esterne allo strumento.

### 3. Collimazione per bisezione

Stabilite così le prestazioni che lo strumento deve fornire, esaminiamo ora le caratteristiche ottiche necessarie:

— per misure di alta precisione è evidentemente logico pensare a mire ed a reticoli che consentano la collimazione per bisezione.



Nella fig. 3 b) il tratto in collimazione è spostato dalla posizione di collimazione esatta di  $1/80$  di s. Lo spostamento risulta evidentemente percepibile da parte di un occhio normale che osservi la figura ad una distanza di 250 s, corrispondente ad un errore angolare di  $10''$ .

Per richiamare brevemente il principio della collimazione per bisezione, abbiamo indicato in fig. 3, tre condizioni di collimazione per bisezione:

- a) con tratti di riferimento fortemente scentrati;
- b) con tratti di riferimento leggermente scentrati;
- c) con tratti di riferimento esattamente centrati;

— per determinare la precisione ottenibile colla collimazione per bisezione, presso la Salmoiraghi sono stati effettuati studi e prove sperimentali molto accurati, che abbiamo documentato parzialmente in una apposita monografia.

Prendiamo occasione per segnalare che sarebbe veramente auspicabile che qualche istituto tecnico scientifico effettuasse uno studio sistematico della precisione ottenibile in funzione della luminanza del campo di osservazione, delle dimensioni geometriche, grossezza, lunghezza, distanza dei tratti della mira e del reticolo.

Noi pensiamo che lo schema delle procedure sperimentali, la natura dei dispositivi, e le attrezzature necessarie, sarebbero molto semplici, mentre i risultati potrebbero essere notevoli.

Alla Salmoiraghi sono stati condotti studi e prove riguardanti in particolare il puntamento degli strumenti topografici; tali studi, pur non avendo il carattere generale ed universale che avrebbero potuto avere se fossero stati condotti presso Istituti scientifici, hanno permesso di stabilire che un occhio normale, con anteposto un cannocchiale di puntamento, raggiunge il piú alto potere di puntamento per bisezione con una pupilla di diametro eguale a circa un millimetro (da mm.  $1,50 \div 0,8$  circa, a seconda della luminosità del campo oggetto collimato), e in tali condizioni il potere di puntamento è certamente migliore di 5 secondi sessagesimali come errore quadratico medio, e migliore di 10 secondi come massimo probabile scarto.

Credo ora utile fare una piccola parentesi su una caratteristica poco nota nel campo di collimazione per bisezione: la precisazione ottenibile con la bisezione non cresce affatto, come può sembrare avvenga nella collimazione per coincidenza, assottigliando i tratti della scala e del reticolo; anzi, al di sotto di determinati valori (che da esperienze effettuate alla Salmoiraghi appaiono aggirarsi attorno ad un valore di ben 90 secondi apparenti), la precisazione della collimazione decresce. L'intervallo tra i due tratti del reticolo sarebbe poi eguale a circa 2-3 volte lo spessore del singolo tratto. In complesso, quindi, i tratti appaiono molto grandi all'occhio dell'osservatore che, pur ragiungendo grandi finezze di collimazione, si trova a completo suo agio mentre lavora. Questa condizione e la notevole quantità di energia luminosa disponibile per la formazione della immagine di tratti così grossi, costituiscono il motivo fondamentale della possibilità di ottenere le precisioni praticamente riscontrate con il metodo della bisezione.

In pratica, tenendo conto che le stadiе possono essere di diversa fabbricazione e quindi avere tratti di divisione piú o meno spessi, e soprattutto tenendo conto che le distanze fra mira e strumento ottico possono variare fortemente, il reticolo dell'autolivello è stato equipaggiato con 2 tratti adatti alla bisezione; tali tratti non sono paralleli, ma leggermente inclinati fra loro onde meglio adattarsi ai vari spessori apparenti delle mire.

Prove pratiche eseguite con l'autolivello 5190 hanno confermato che l'errore di collimazione medio — di un milionesimo — era ancora ottenibile con un reticolo modificato come detto sopra.

#### 4. Il Proporzionamento del cannocchiale

Da quanto si è detto, il proporzionamento del cannocchiale risulta completamente determinato. Siccome è richiesto un potere di collimazione di 1/5 di secondo ed essendo 5 secondi il potere di collimazione dell'occhio, è necessario un cannocchiale di 25 X. Se a questo ingrandimento deve corrispondere una pupilla di 1 mm, risulterebbe sufficiente un diametro di obbiettivo di mm 25.

In pratica, in primo luogo per tener conto che in alcuni casi la luminosità del campo oggetto può essere scarsa, ed inoltre per dare un certo margine di sicurezza agli osservatori con occhio sub-normale, l'autolivello 5190 di precisione Salmoiraghi è stato equipaggiato con un cannocchiale di 30 X, che consente precisioni di puntamento migliori di 1/6 di secondo e un diametro di obbiettivo di 45 mm, che offre una luminosità apparente superiore corrispondente ad una pupilla di uscita di 1,5 mm, maggiore di quella indicata come compromesso ottimo.

Si noti però che se in questo modo si facilita l'impiego in condizioni di luce meno favorevoli, risulta pregiudizievole nei riguardi delle persone con difetti visivi (astigmatismi più o meno complessi); e in tali casi è più adatto uno strumento a pupilla di uscita ridotta.

Un ingrandiment più forte, o un maggiore diametro dell'obbiettivo, potrebbero essere inutili o perfino dannosi, per il minor campo-oggetto che si avrebbe aumentando il numero degli ingrandimenti; un maggior  $\varnothing$  dell'obbiettivo — a parità di ingrandimento — porterebbe a una più larga pupilla di uscita dello strumento, quindi a una maggiore influenza dannosa sulle eventuali irregolarità dell'occhio dell'osservatore.

Definite così le caratteristiche ottico-geometriche dello strumento, vediamo ora di definire le particolarità del sistema di compensazione pendolare.

#### 5. La compensazione automatica

La immobilità della linea di mira viene ottenuta annullando i movimenti relativi fra immagine e reticolo al variare della inclinazione di tutto lo strumento; tale condizione è pienamente ottenuta se la lunghezza focale dell'obbiettivo è esattamente eguale alla lunghezza virtuale del pendolo di compensazione. Semplici calcoli dimostrano che un errore, per esempio dell'1% della lunghezza di compensazione, provoca un errore nella compensazione dell'1%; se quindi si desidera mantenere l'errore di compensazione più basso (potremo porre la metà) del potere di collimazione  $\Sigma$ , entro un campo di inclinazione dello stativo di  $n$  secondi per parte, dovremo realizzare la sospensione pendolare con un errore  $\Delta L$  massimo ammissibile nella sua lunghezza virtuale

$$\frac{\Delta L}{L} \leq \frac{\Sigma}{Z n}$$

Se quindi noi vogliamo che la compensazione avvenga con errori trascurabili: entro un piú grande campo di inclinazioni dello stativo ( $n$  grande) dovremo imporre

$$\text{un piú piccolo } \frac{\Delta L}{L}.$$

In pratica è sufficiente che il campo di inclinazione, entro il quale una compensazione automatica praticamente perfetta è richiesta all'autolivello, sia dell'ordine dei 50 secondi per parte. Infatti tale valore fa sí che il livello di alta precisione possa essere maneggiato facilmente come nel caso di un grossolano cannocchiale di puntamento. Se noi consideriamo  $\Sigma$  il valore dichiarato del potere di puntamento, cioè  $\Sigma = 1.10^{-6}$ , dalla formula indicata ora si ottiene che il valore del

$$\frac{\Delta L}{L} \text{ ammissibile è } 2/1000.$$

Il problema di assicurare con questa precisione la lunghezza della sospensione pendolare è di facile soluzione se si considera che la lunghezza delle barrette di sospensione nell'autolivello 5190 Salmoiraghi è di circa 200 mm, e che l'errore ammissibile  $\Delta L$  in piú ed in meno è dell'ordine di 0,4 mm. Questa tolleranza è evidentemente molto larga e semplifica sostanzialmente tutti i problemi dovuti alle difficoltà della preliminarizzare messa a punto durante la costruzione, e alle derive termiche e meccaniche a cui la sospensione elastica può essere soggetta durante l'uso.

Si noti che il limite di inclinazione dello stativo  $S$  da noi fissato in 50 secondi per parte non implica che la corsa del corpo pendolare  $P$  debba in pratica essere limitata a tale valore. In realtà può essere ammessa una corsa molto piú grande del pendolo  $P$ . L'osservatore che guarda attraverso il microscopio  $M$  avverte questa ampiezza di movimenti attraverso lo spostamento e la posizione dell'immagine del reticolo  $G$  entro il campo del microscopio  $M$ . Guardando attraverso  $M$ , dalla posizione di  $G$ , nel campo, l'osservatore con una semplice occhiata, può valutare la posizione dello stativo  $S$  rispetto alla sua posizione normale e potrà facilmente correggere questa posizione manovrando le tre viti livellanti  $L$  dello stativo.

L'osservazione della posizione del reticolo  $G$  in relazione al campo del microscopio costituisce un dispositivo di livella ottica che si comporta come una livella circolare che consente la completa rettifica dell'asse verticale dello strumento con una sola operazione.

Se sul campo del microscopio è inciso un adatto reticolo di riferimento, la centratura dei due reticoli, uno rispetto all'altro, ottenuta per mezzo della manovra delle viti calanti, consentirebbe la rettifica dell'asse verticale dello stativo con precisione notevole, e almeno pari a quella ottenibile con le piú sensibili livelle toriche. Questa caratteristica distingue l'autolivello 5190 Salmoiraghi da tutti gli altri ed è semplicemente una conseguenza dello schema fondamentale; inoltre, risulta per l'operatore una preziosa e ben evidente indicazione dell'assetto dell'autolivello, e costituisce il principio di funzionamento delle livelle sferiche ottiche di precisione dei teodoliti 4149 e 4200.



La fig. 4 illustra l'aspetto del campo di osservazione dell'autolivello 5190 quando l'asse dello strumento è inclinato di circa 25". Si vedono bene due reticoli diversi, non centrati l'uno rispetto all'altro per effetto dell'inclinazione residua dell'asse meccanico.

Automatic Level 5190

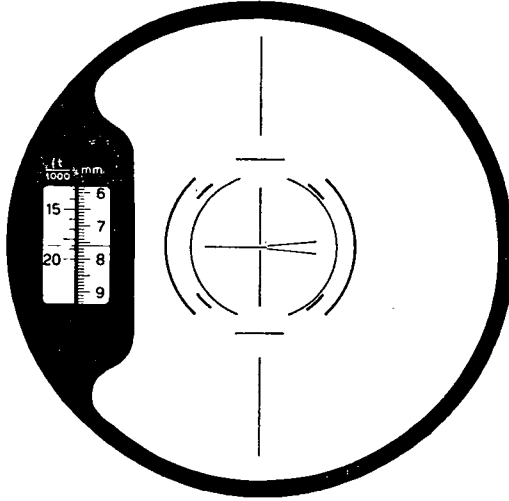
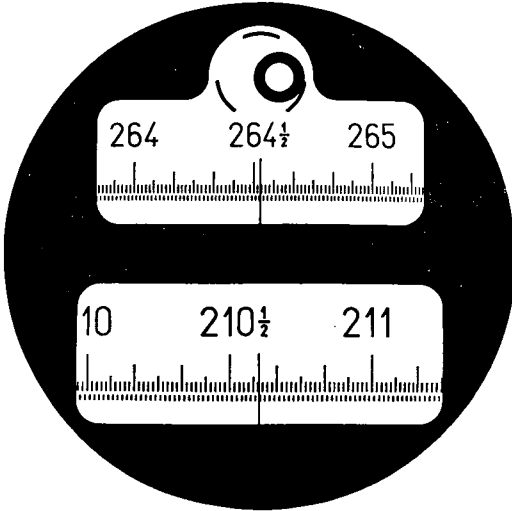


Fig. 4

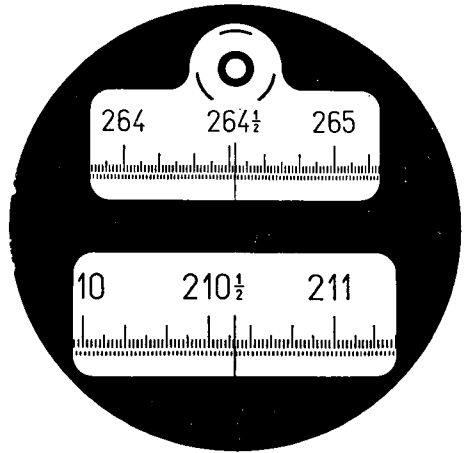
Theodolite 4149



b

Fig. 5 a

Theodolite 4149



a

Fig. 5 b

Poiché, come abbiamo detto, l'errore del compensatore può facilmente risultare trascurabile anche per percettibili inclinazioni, l'autolivello, nelle condizioni indicate in fig. 4, è senz'altro pronto per l'uso. Nell'autolivello 5190 i movimenti relativi concessi ai due reticoli sono molto ampi e superano i 200 secondi per parte; una tale ampiezza di movimento facilita molto la messa in stazione dello strumento.

Gli errori di compensazione automatica sono d'altra parte fortemente ridotti anche fino all'estremo bordo del campo di funzionamento e la simultanea osservazione dei due reticoli assicura l'osservatore contro il pericolo (molto frequente in altri tipi di autolivelli) che il sistema di compensazione non sia bloccato alla fine della corsa.

La fig. 5 mostra come appare il campo di osservazione del microscopio di lettura di un teodolite 4149. La fig. 5a mostra l'aspetto del campo con asse verticale sbandato (ma in tolleranza); indi passiamo all'illustrazione della fig. 5b (con asse verticale rettificato) colla manovra facile delle viti calanti. Si noti che in ambedue i casi la lettura sul cerchio verticale è corretta per il fatto che il sistema ottico compensatore, oltre a muovere l'immagine della bolla sferica, muove anche, della quantità dovuta, la graduazione del cerchio verticale.

#### 6. La robustezza della sospensione pendolare

Esaminiamo ora, quello che costituisce una delle più importanti caratteristiche per gli utilizzatori, assieme alla precisione: la robustezza del dispositivo che costituisce l'organo più delicato dello strumento; cioè la sospensione pendolare.

La fig. 6 mostra come in realtà si è ottenuta, con mezzi estremamente semplici, una perfetta e completa protezione.

I movimenti laterali del corpo pendolare sono limitati lateralmente dallo stesso

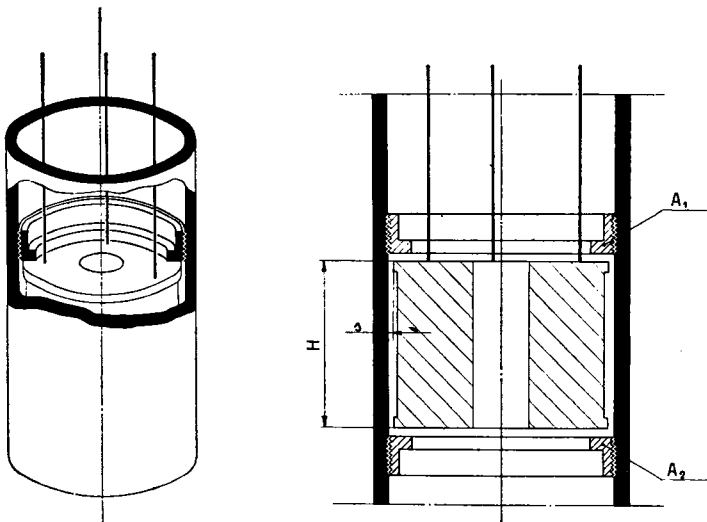


Fig. 6

tubo concentrico che costituisce la carcassa dello strumento; la differenza  $2s$  di diametro fra corpo pendolare e tubo esterno (vedi fig. 6), proporzionata al movimento totale desiderato ( $5'$ ) ed alla lunghezza virtuale del pendolo di sospensione (200 mm) risulta eguale a 3 decimi di millimetro. I movimenti laterali concessi sono quindi di entità molto modesta e causano sulle barrette di sospensione tensioni elastiche ben piccole rispetto a quelle che possono essere sopportate.

Due arresti  $A_1$  ed  $A_2$  anulari sistemati in modo facile ed ovvio sul tubo che costituisce la carcassa, limitano i movimenti assiali del corpo pendolare a valori che possono essere ridotti a volontà. Per facilitare la costruzione anche il lasco assiale del corpo pendolare viene lasciato dell'ordine dei due decimi di millimetro. Con questo ordine di grandezza dei movimenti concessi le barrette di sospensione non subiscono, in nessun caso, alcun sforzo eccessivo né quando vengono sollecitate alla compressione, né quando vengono sollecitate alla trazione a seguito di urti violenti assiali poiché il fine-corsa limiterà l'allungamento a valori che saranno ben facilmente molto minori a quelli consentiti dall'allungamento elastico.

Il dispositivo di fig. 6 nella sua semplicità raggiunge un ulteriore importante scopo, quello di smorzare pneumaticamente le oscillazioni del corpo pendolare, trafileando l'aria.

Si può evidentemente raggiungere un maggiore o minore grado di smorzamento variando l'altezza  $H$  del corpo pendolare e del suo contenitore, ed in pratica non è sorto in proposito alcun problema.

Un problema invece molto interessante è stato quello di evitare che il corpo pendolare, arrivato a « fine corsa » aderisse alle pareti del tubo di guida rendendo difficile la manovra dell'autolivello, quando, al momento della messa in stazione, l'autolivello era sbandato al di là dei limiti del « fine corsa ».

È interessante notare che questo problema, trascurato in un primo tempo poiché ritenuto in linea teorica non importante, ha dato qualche fastidio iniziale, aggravato dal fatto che si era pensato che le superfici affacciate del bariletto e del tubo dovessero essere più lisce e più regolari possibili.

In queste condizioni, il fenomeno dell'aderenza si presentava con effetti fortissimi *specialmente* negli apparecchi in cui la costruzione più accurata portava a un completo parallelismo fra gli assi del tubo esterno (e quindi delle generatrici esterne) e del corpo pendolare.

Il fenomeno è scomparso non appena ci si è resi conto che l'appiccicamento era dovuto ad una aderenza molecolare e non, come in un primo tempo poteva sembrare, a tracce di untuosità. Il rimedio è stato quindi ovvio e semplicissimo, disponendo sul corpo pendolare di un leggero bassofondo centrale e di due nervature laterali che limitavano l'effettivo contatto fra corpo pendolare e tubo esterno a due zone di superficie molto ristretta.

La fig. 6 mostra la soluzione pratica di questo problema. Come si vede questo fenomeno dell'aderenza non si verifica negli autolivelli Salmoiraghi.

## 7. Il micrometro ottico incorporato

La squadra ottica speculare è costituita dai due specchi  $R_1$  ed  $R_2$  di fig. 2, e si presta in modo egregio a risolvere il problema di dotare l'autolivello di un sistema

che trasli micrometricamente in altezza la linea di mira per l'apprezzamento delle frazioni di stadia.

Un tale micrometro ottico è evidentemente indispensabile, data la precisione offerta da questo autolivello, poiché anche per battute di 50 metri occorre, per sfruttare la precisione dell'autolivello, che le letture siano fatte con errori non superiori ai 5 centesimi di millimetro.

La caratteristica già considerata della costanza di deviazione della linea di mira offerta dalla squadra ottica  $R_1$ ,  $R_2$ , consente di realizzare con grande facilità lo spostamento della linea di mira facendo scorrere assialmente tutta la squadra ottica con un semplice tubo di guida coassiale che viene fatto muovere facilmente in direzione basso-alto.

Nella realizzazione della Salmoiraghi si è per questo particolare evitato ogni problema di precisione meccanica, poiché al tubo che sopporta la squadra ottica

Automatic Level 5190

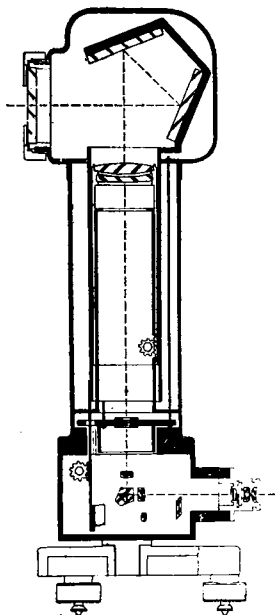


Fig. 7

è stata rigidamente connessa una scaletta graduata la cui posizione è resa visibile nello stesso oculare dell'autolivello per mezzo di un microscopio che porta l'immagine della scaletta nello stesso campo di osservazione dell'autolivello. Nella fig. 4 questa scaletta è già stata illustrata ed appare alla sinistra dell'osservatore.

Con questa disposizione lo schema generale dell'autolivello diventa quello illustrato nella fig. 7 che mostra una sezione dell'autolivello 5190 completo nelle sue linee essenziali, sfrondata dei particolari meccanici meno importanti.

In questa figura si vede che sulla testa dell'autolivello la pupilla di entrata è chiusa da una lamina di vetro a facce piano-parallele che:

- a) prima di tutto realizza la indispensabile protezione dalla polvere e dagli agenti atmosferici delle parti interne;
- b) consente, con la sua leggera prismaticità residua, di disporre di un mezzo molto comodo per dare piccoli movimenti di rettifica alla linea di mira.

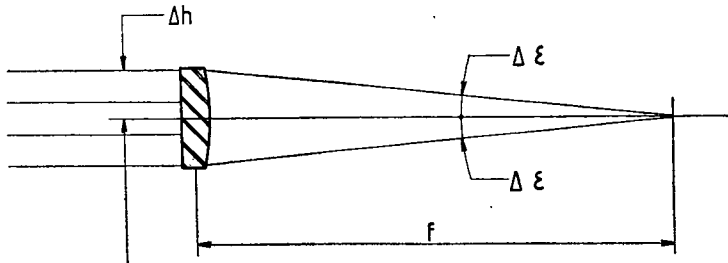
A questo scopo la lamina è montata su una montatura che può essere fatta ruotare su se stessa di piccoli angoli colla guida di una semplice graduazione convenzionale incisa sulla montatura.

Questa lamina di vetro ha dato luogo ad uno dei più sottili problemi ottici; essa infatti deve essere priva di potere ottico con una precisione talmente elevata che ha costituito una vera sorpresa fino a che non sono stati fatti i semplici calcoli di ottica geometrica relativi al caso specifico.

Il caso è così interessante che riteniamo valga la pena di esaminarlo a fondo. Durante la traslazione della squadra ottica la linea di mira trasla parallelamente a sé stessa per cambiare la quota collimata, e di conseguenza, attraverso a quota diversa, la lamina di chiusura. Se noi chiamiamo  $\Delta h$  la variazione di quota della linea di mira e se la lamina ha una focale complessiva  $f$ , avremo che la linea di mira, per effetto della variazione di quota  $\Delta h$  subirà una deviazione  $\Delta \varepsilon$  che secondo l'ottica geometrica elementare vale:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta h}{f}$$

formula che è resa evidente anche dalla fig. 8.



$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta h}{f}$$

Fig. 8

Se al solito poniamo  $\Delta \varepsilon =$  metà errore di collimazione (ossia  $0.5 \times 10^{-6}$ ), se poniamo che  $\Delta h$  arrivi a 5 millimetri (10 millimetri di corsa totale per poter leggere agevolmente senza tema di errori, le frazioni di scale centimetrata), risulta che deve essere  $f \leq 10^7$  mm, ossia ben diecimila metri.

Se supponiamo che il difetto di sfericità sia localizzato su una sola delle due

facce della lamina, il raggio di curvatura minimo ammesso per la superficie difettosa è di 5.000 metri.

Per rendersi conto della straordinaria finezza richiesta si può calcolare la freccia  $\tau$  che entro il diametro di 10 mm ha questa lamina, freccia che, da note formule, risulta:

$$\tau = \frac{(10)^2}{8 \times 5 \times 10^6} \text{ millimetri}$$

$$\tau = 2.5 \times 10^{-6} \text{ millimetri}$$

Si noti che all'esame interferenziale questa superficie mostrerebbe una deformazione delle frange di interferenza di 1/100 di frangia, deformazione molto difficilmente scopribile anche con i piú perfezionati interferometri.

Occorre a questo punto mettere bene in evidenza che tale estrema sensibilità non è un difetto dell'autolivello Salmoiraghi; qualsiasi livello veramente di alta precisione, automatico oppure no, per poter funzionare correttamente deve essere equipaggiato con lamine lavorate con questa precisione.

L'autolivello 5190, proprio per il suo, del tutto particolare, automatismo, riesce ad assicurare veramente quella precisione di 1 milionesimo che nei normali livelli di precisione è in realtà teorica; questa mette in chiara evidenza l'esigenza di precisione sopra descritta per la lamina.

In un livello non automatico invece la manovra della lamina micrometrica costringe a toccare lo strumento e lo strumento stesso, ben difficilmente sotto l'azione meccanica della mano dell'operatore, riesce a mantenere il proprio assetto corrispondente alla perfetta centratura della bolla della livella. Una collimazione quindi veramente accurata deve essere costituita da una serie di successive manovre della lamina della bolla, rendendo veramente problematica la possibilità di accorgersi se non come media di molte letture dei piccoli errori di collimazione.

La grande sensibilità dell'autolivello Salmoiraghi, di fronte alle piccole potenze residue della lamina di testa, costituisce una brillante conferma della altissima precisione del sistema, tanto da poter essere utilizzato per la determinazione della potenza ottica della lamina, con sensibilità nettamente superiore a quella offerta anche dai sistemi interferenziali.

Questo notevole risultato è ottenuto grazie anche alla disposizione generale dello strumento che, offrendo l'osservazione della scaletta graduata del micrometro contemporaneamente alla osservazione della mira nel campo principale, consente anche a qualsiasi operatore che non abbia mai usato l'autolivello di eseguire rapidamente un gran numero di collimazioni ripetute senza staccare l'occhio dall'oculare ed eseguendo quindi una media a stima immediata con la possibilità di raggiungere senza alcuna difficoltà le precisioni indicate.

## 8. Funzionamento dell'autolivello alle brevi distanze

Come abbiamo già detto al paragrafo precedente, e come del resto è noto, qualunque livello di precisione, per poter funzionare correttamente nelle brevi

distanze deve avere il fuoco anteriore giacente sull'asse di rotazione orizzontale dei movimenti di rettifica della linea di mira. In mancanza di questa coincidenza, il fuoco anteriore deve almeno giacere sul piano verticale passante per tale asse, poiché così i movimenti di aggiustaggio della linea di mira non provocano traslazioni verticali della linea stessa di mira.

La disposizione dell'autolivello 5190 ed in particolare il lungo percorso dell'asse ottico dentro la squadra di testa consente di portare il fuoco anteriore dell'obbiettivo molto vicino all'asse verticale dello strumento e quindi di realizzare con precisione la condizione ora descritta, poiché il centro di ruotazione della linea di mira, per effetto dei movimenti del compensatore, giace nello stesso asse verticale. L'autolivello 5190 mantiene così inalterata la sua precisione anche quando gli oggetti collimati anziché all'infinito sono a distanza ravvicinata.

### 9. *Stabilità agli sbalzi termici ed alla irradiazione solare dissimetrica*

La struttura dello strumento automaticamente risolve questo problema. Come si vede dalla fig. 7, lo strumento è composto in definitiva di tubi concentrici; il primo agisce come supporto centrale, il secondo, scorrevole rispetto al primo, per la focheggiatura dell'obbiettivo principale; il terzo, scorrevole anch'esso, è il supporto della squadra ottica di testa e della scaletta micrometrica relativa; il quarto è il tubo esterno di spessa parete in fusione di alluminio, buon conduttore del calore.

È facile comprendere che questa disposizione è ben adatta ad uniformare la temperatura nelle varie parti dello strumento, ed infatti la insensibilità dell'autolivello alla irradiazione solare dissimetrica è praticamente completa.

La superiorità in proposito, rispetto a qualunque livello classico, è una delle caratteristiche più notevoli del 5190.

\* \* \*

Abbiamo con questo dato una visione panoramica quasi completa dei principali problemi che sono stati incontrati nella progettazione e realizzazione dell'autolivello 5190.

I limiti di tempo concessi ci hanno costretti a sfiorare appena la maggior parte degli argomenti senza indicare quegli sviluppi matematici che hanno condotto alla soluzione dei vari problemi e che potevano essere anche molto interessanti.

Prima di chiudere la nostra esposizione vogliamo però rammentare che la più importante conseguenza diretta della semplicità e della logica di tutte le soluzioni adottate è la estrema robustezza di tutto l'insieme e la grande facilità della manutenzione e delle riparazioni.

In pratica, attualmente, le riparazioni si rendono necessarie solo a seguito di incidenti meccanici molto violenti che deteriorerebbero qualsiasi tipo di strumento, o a seguito di manomissioni dovute a maldestra curiosità. Noi riteniamo che questo livello sia molto più robusto e di affidamento di ogni altro da noi visto.

