

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE

DICAM

TESI DI LAUREA

in

TOPOGRAFIA

**PROCEDURE DI FIELD CALIBRATION PER DISTANZIOMETRI
TOPOGRAFICI**

CANDIDATO:

WALTER BENIGNI

RELATORE:

Prof. LUCA VITTUARI

CORRELATORE:

Dott. Ing. MARIA ALESSANDRA TINI

Anno Accademico 2009/2010

Sessione III

-Indice-

INTRODUZIONE.....	1
--------------------------	----------

1. DISTANZIOMETRI ELETTRIO-OTTICI

1.1 Metodo della misura di fase	3
1.1.1 Modalità di misura.....	6
1.1.2 Caratteristiche delle onde	7
1.2 EDM ad impulsi	8
1.3 EDM con tecnologia Pinpoint.....	11
1.3.1 Modellazione del Segnale.....	13

2. ERRORI DEI DISTANZIOMETRI ELETTRIO-OTTICI

2.1 COSTANTE ADDITIVA	18
2.2 ERRORI CICLICI.....	19
2.2.1 Errori dovuti ad interferenze elettro-ottiche.....	19
2.2.2 Errori del sistema di misura della fase.....	22
2.2.3 Errori dovuti al multipath.....	22
2.2.4 Risultati sperimentali.....	23
2.3 ERRORI DI SCALA.....	24
2.4 ERRORI NON LINEARI DIPENDENTI DALLA DISTANZA...25	
2.5 MODELLO MATEMATICO COMPLESSIVO DEGLI ERRORI.....	26

2 CALIBRAZIONE DEGLI EDM

3.1 LINEE DI CALIBRAZIONE DI EDM.....	29
3.1.1 SCHEMA DI HEERBRUGG.....	29
3.1.2 SCHEMA DI AARAU.....	33
3.1.3 SCHEMA DI HOBART.....	35
3.1.4 NORMA ISO.....	37
3.1.4.1 Configurazione della linea di calibrazione.....	38
3.1.4.2 Misure.....	40
3.1.4.3 Calcolo della costante additiva.....	40

3.2	PROGETTO FISICO DI UNA LINEA DI CALIBRAZIONE.....	43
3.3	ESECUZIONE DELLE MISURE.....	44
3.4	ELABORAZIONE DEI DATI.....	46
3.4.1	Preprocessamento.....	46
3.4.1.1	Calcolo del valor medio delle distanze ed applicazione agli angoli misurati della regola di Bessel.....	46
3.4.1.2	Riduzione orizzontale delle distanze inclinate ed allineamento.....	47
3.4.1.3	CORREZIONE ATMOSFERICA:METODO DI CIDDOR PER IL CALCOLO DELL'INDICE DI RIFRAZIONE DELL'ARIA MISTA	48
3.4.2	CALCOLO DEI PARAMETRI DI CALIBRAZIONE.....	60
3.4.2.1	Revisione delle opzioni di correzione della baseline.....	60
3.4.2.2	Determinazione della costante additiva e della correzione di scala su baseline con lunghezze note...	62
3.4.2.3	Determinazione della costante additiva e della lunghezza della baseline incognita.....	65
3.4.3	DETERMINAZIONE DELLA LUNGHEZZA DELLA BASELINE.....	68
3.5	CALIBRAZIONE DEGLI ERRORI CICLICI.....	70
3.5.1	PROGETTO E MISURE DI TEST DEGLI ERRORI CICLICI.....	70
3.5.2	DETERMINAZIONI SEMI-GRAFICA PER DELLO SHORT PERIODIC ERRORS.....	73
3.5.3	DETERMINAZIONE ANALITICA DELL'ERRORE CICLICO..	75
3.6	CALIBRAZIONE DEL MODULATORE DI FREQUENZA.....	80
3.7	ACURATEZZA DEGLI STRUMENTI EDM.....	80

4.DISTANZIOMETRI UTILIZZATI NELLA SPERIMENTAZIONE

5.PROCEDURE SPERIMENTALI DI CALIBRAZIONE

5.1	PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DELL'ALLINEAMENTO.....	88
-----	--	----

5.2	EFFETTUAZIONE DELLE MISURE.....	91
5.2.1	Set di dati acquisiti.....	93
5.2.1.1	Misure con distanziometro Leica TS30.....	93
5.2.1.2	Misure con distanziometro Leica TCA2003.....	98
5.3	PREPROCESSAMENTO DEI DATI SPERIMENTALI.....	106
5.3.1	Riduzione orizzontale delle distanze inclinate.....	106
5.3.2	Correzione Atmosferica.....	109
5.3.3	Allineamento.....	112
5.4	CALCOLO DEI PARAMETRI DI CALIBRAZIONE.....	115
5.4.1	Calcolo della costante additiva secondo norma ISO 171234.....	115
5.4.2	Calcolo della costante additiva e della correzione di scala per distanziometro TCA2003 su allineamento con lunghezze note....	120
5.4.3	Calcolo della costante additiva e della correzione di scala tramite regressione lineare su schema di Hobart.....	122
5.4.4	Risultati.....	125
6.	CONCLUSIONI.....	127

BIBLIOGRAFIA

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi descrive le procedure di campagna e le successive operazioni di elaborazione dei dati sperimentali per effettuare la calibrazione dei distanziometri elettro-ottici.

Con la calibrazione dei distanziometri elettro-ottici si determinano le precisioni dello strumento e le correzioni strumentali relative alle misure di distanze. Le correzioni strumentali vengono sommate alle distanze misurate per ottenere la corretta distanza.

La calibrazione periodica degli EDM è consigliata ai fini di un controllo della qualità dello strumento al momento dell'acquisto e periodicamente successivamente, per il miglioramento dell'accuratezza.

Nel corso della sperimentazione sono stati utilizzati diversi schemi per effettuare la calibrazione, tra cui lo schema di Heerbruggs in accordo con la normativa di riferimento (Norma ISO 17123-4) ed è stato deciso provare anche la metodologia basata sullo schema di Hobart. Inoltre su tali schemi sono state sperimentate diverse metodologie di calcolo dei parametri di calibrazione dei distanziometri elettro-ottici. La scelta del sito è ricaduta sulla pista ciclabile che corre a fianco del rettilineo di via Stelloni Levante nei pressi di Calderara di Reno, che offre i requisiti di accessibilità, planarità e lunghezza richiesti per la sperimentazione.

Essendo una fase preliminare della sperimentazione sulla calibrazione e data l'onerosità economica ed operativa della realizzazione di pilastri in calcestruzzo per il centramento forzato, si è optato per una materializzazione semplice con chiodi infissi nella pavimentazione stradale, prevedendo di stazionare sui vertici con treppiede.

1. DISTANZIOMETRI ELETTRO-OTTICI

Detti anche distanziometri a onde, utilizzano onde elettromagnetiche per la misura delle distanze.

Un tipo di distanziometri ora non più prodotti utilizzava onde radio ad alta frequenza (MDM – Microwave Distance Measurement).

Si impiegavano due stazioni entrambe attive (emittenti), poste agli estremi della distanza da misurare.

La portata era molto elevata, raggiungendo anche i 100 km. In questa categoria ricadevano i telluometri utilizzati negli anni 1950-60 dall'IGM per una revisione della rete geodetica nazionale, prima di allora basata su sole 8 basi misurate con misure dirette di alta precisione.

I distanziometri attuali possono essere considerati “discendenti” da un altro tipo di strumento, il Geodimeter di Bergstrand (Svezia, 1943) ed utilizzano tutti luce infrarossa (lunghezza d'onda circa 0,7-0,8 micron – campo dell'infrarosso vicino) che ha un'ottima capacità di penetrazione nella foschia e nel velo atmosferico.

Sono detti EODM (Electro Optical Distance Measurement) o semplicemente EDM (Electromagnetic Distance Meter).

Esistono tre tipologie di distanziometri elettro-ottici:

- EDM a misura di fase
- EDM a impulsi
- EDM con tecnologia pinpoint.

1.1 Metodo della misura di fase

In questo metodo si utilizza come campione di misura la lunghezza d'onda di un segnale sinusoidale modulato su una portante infrarossa con la tecnica della modulazione di ampiezza. Il distanziometro emette un fascio di luce infrarossa modulata in ampiezza con legge sinusoidale. Il fascio di luce colpisce un riflettore (prisma o gruppo di prismi) che lo rinvia indietro deviandolo di 180° . La luce compie quindi un percorso di andata e ritorno (sistema definito Two-Way Ranging System). Il distanziometro comprende sia un trasmettitore sia un ricevitore, mentre il riflettore si limita a rinviare indietro la luce (riflettore passivo).

La fase del segnale emesso viene confrontata con quella del segnale riflesso da un dispositivo all'interno del distanziometro detto comparatore (o discriminatore) di fase, determinando lo sfasamento angolare $\Delta\phi$ tra le due sinusoidi. Nel percorso di andata e ritorno (pari al doppio della distanza inclinata) risulta quindi compreso un numero intero n di lunghezze d'onda, più una frazione di lunghezza d'onda corrispondente allo sfasamento. Il metodo si basa sull'impiego di un campione di misura, la lunghezza d'onda λ di una oscillazione, ottenuto tramite un'onda elettromagnetica (Fig. 1).

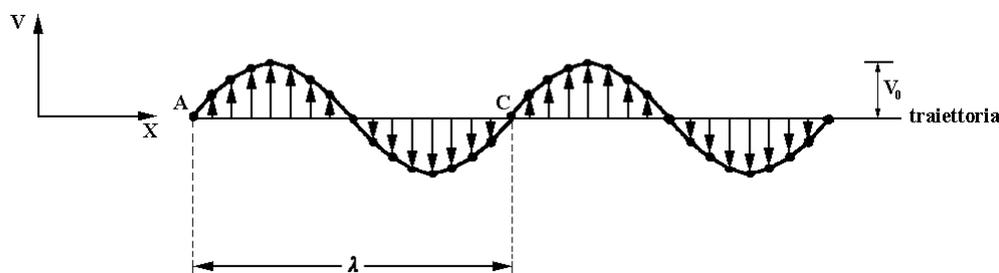


Fig.1

Consideriamo di dover misurare una distanza mediante un'onda di lunghezza λ e che tale distanza, $D = AB$, sia inferiore a $\lambda/2$ (Fig 2).

In Fig 2, per non appesantire il disegno, è stato riportato il punto A' simmetrico di A rispetto a B, per cui l'onda riflessa, rappresentata dal percorso BA, risulta ribaltata.

L'onda uscente da A all'istante t avrà equazione:

$$V_u = V_0 \text{sen}(\omega t + \varphi_0)$$

mentre l'onda rientrante sarà stata emessa Δt secondi prima, essendo $\Delta t = 2D/v$ il tempo impiegato per andare da A a B e rientrare in A, e quindi avrà equazione

$$V_r = V_0 \text{sen}[\omega(t - \Delta t) + \varphi_0]$$

Dove si è indicato con V_0 l'ampiezza dell'oscillazione, con φ_0 la fase iniziale pari a ωt_0 (con t_0 tempo iniziale), ω la pulsazione pari a $2\pi f = 2\pi / T$, T il periodo e f la frequenza.

La differenza di fase tra l'onda uscente e la rientrante sarà:

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_0) - [\omega(t - \Delta t) + \varphi_0]$$

$$\Delta\varphi = \omega \Delta t$$

Con chiare sostituzioni tenuto conto che:

$$\omega \frac{\lambda}{v} = 2\pi \quad \text{cioè} \quad \frac{2\pi \lambda}{T v} = 2\pi$$

$$\lambda = T v = \frac{v}{f}$$

si ricava:
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi 2D}{T v} = \frac{2\pi 2D}{\lambda}$$

Da cui si ottiene la distanza cercata D :

$$D = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \frac{\lambda}{2} \quad \text{con:} \quad 0 \leq \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \leq 1 \quad (\Delta\varphi \text{ con valori compresi tra } 0 \text{ e } 2\pi).$$

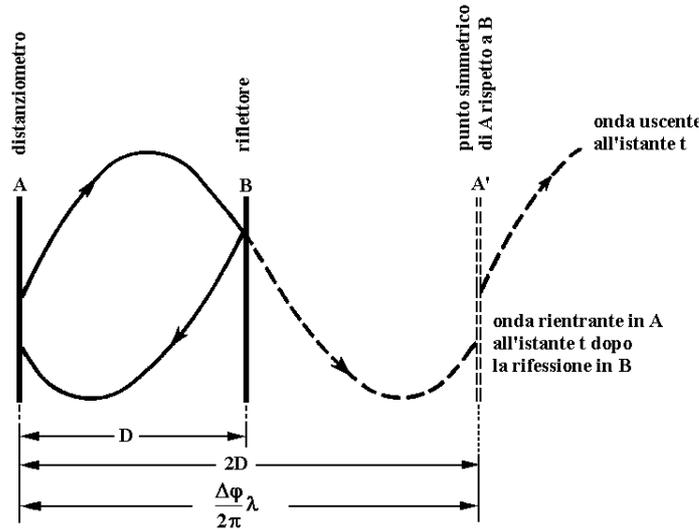


Fig. 2

Da tale equazione, nel caso semplice esaminato, la distanza risulta essere una frazione di metà della lunghezza d'onda impiegata e si può ottenere misurando lo sfasamento tra l'onda uscente e l'onda rientrante. Se ora il punto B si sposta di un numero intero di mezze lunghezze d'onda (A' si sposta di un numero intero di lunghezze d'onda) è evidente che lo sfasamento non cambia in quanto lungo il percorso $2D$ si è inserito un numero intero di lunghezze d'onda (Fig 3).

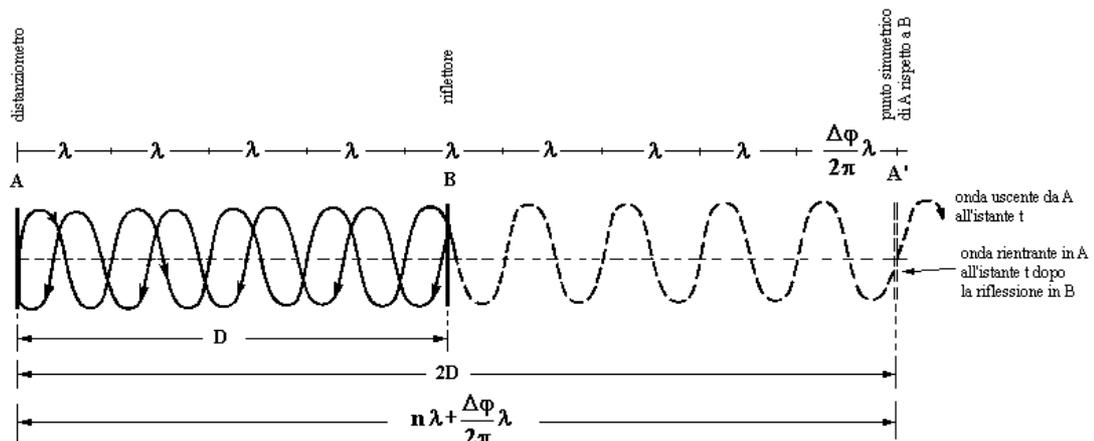


Fig.3

Si può pertanto scrivere in generale:

$$D = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \frac{\lambda}{2} + n \frac{\lambda}{2} = L + n \frac{\lambda}{2}$$

che rappresenta l'equazione fondamentale dei distanziometri ad onde. Risulta quindi evidente che per determinare la distanza D occorrerà misurare lo sfasamento $\Delta\varphi$ e valutare, senza errore, il numero intero n di mezze lunghezze d'onda.

I distanziometri che operano secondo questo metodo misurano in realtà il solo sfasamento mentre ricavano indirettamente n emettendo segnali con caratteristiche diverse.

1.1.1 Modalità di misura

La misura della distanza viene ripetuta un elevato numero di volte, generalmente alcune migliaia, consentendo in tal modo di ottenere un valore caratterizzato da uno sqm dell'ordine del millimetro.

Tutto ciò richiede tempi dell'ordine di qualche secondo, per cui è lecito ritenere che le fluttuazioni di misura siano dovute esclusivamente a cause accidentali piuttosto che a variazioni sistematiche delle condizioni ambientali. I distanziometri permettono di definire la modalità di misura di tracciamento con cui si effettuano un numero minore di misure, generalmente un centinaio, in modo che si riduca il tempo richiesto. Evidentemente ciò comporta un peggioramento dello sqm.

1.1.2 Caratteristiche delle onde

Lo schema che abbiamo descritto implica ovviamente che l'onda rientrante abbia sufficiente energia per determinare il corretto funzionamento dello strumento. Quindi è necessario impiegare onde di cui riesca facile la convogliabilità in stretti angoli solidi per evitare di far propagare l'energia in tutte le direzioni. Il problema della convogliabilità si risolve se si usano onde luminose, o di frequenza vicina alle luminose, usando un semplice sistema ottico. Le piccole lunghezze d'onda che saremmo costretti ad usare per superare il problema detto renderebbero però problematico il calcolo del numero n di mezza lunghezze d'onda ed il funzionamento del discriminatore di fase. Per queste ultime esigenze servirebbero lunghezze d'onda dell'ordine della decina di metri ($f = 30\text{MHz}$).

Questa contraddizione si risolve usando onde di facile convogliabilità (onde e.m. centimetriche, onde luminose o paraluminose) ma facendone variare nel tempo una loro caratteristica in modo da riprodurre un'onda di lunghezza decisamente più elevata. Il metodo più usato è quello di *modularle in ampiezza* (Fig. 4). Un'onda può essere *modulata in ampiezza* (se ne fa cioè aumentare e diminuire ciclicamente l'ampiezza massima), per ottenere da essa un'onda di lunghezza d'onda maggiore.

La prima onda si chiama *onda portante* o *onda modulata*; la seconda *onda portata* o *onda modulante*.

L'onda modulante è data dall'involuppo dei massimi dell'onda modulata.

Con l'operazione di modulazione si possono ottenere onde di lunghezza d'onda lunghissime, modulando onde di lunghezza d'onda molto corta.

Ad esempio, un'onda elettromagnetica infrarossa di $1\ \mu\text{m}$ di lunghezza d'onda può essere modulata in modo da ottenere onde con $\lambda = 20\ \text{m}$ o $\lambda = 2000\ \text{m}$.

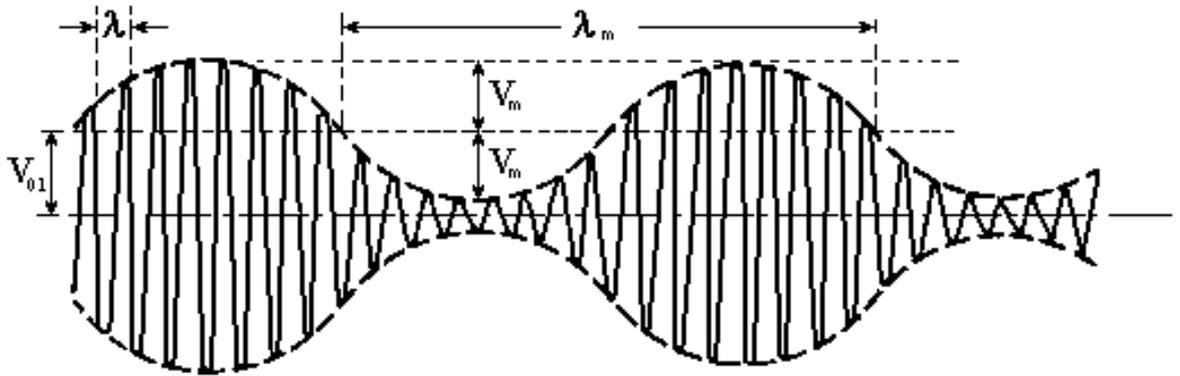


Fig.4

1.2 EDM ad impulsi

Utilizzano un metodo concettualmente diverso dal precedente, e più semplice: la distanza viene ottenuta misurando il tempo di viaggio di un impulso nel percorso di andata e ritorno della luce infrarossa: il distanziometro emette un impulso (segnale di brevissima durata ed alta intensità, paragonabile visivamente al lampo di un flash fotografico) di luce infrarossa laser (fascio di luce molto sottile e concentrato).

L'onda impulsiva (in realtà non è una sola come indicato in figura ma una breve sequenza di impulsi – come una rapida serie di flash in sequenza) compie il percorso di andata e ritorno alla velocità di propagazione v nell'atmosfera. La velocità v si suppone costante ed è stimabile in funzione delle condizioni atmosferiche (p , t , e) come già visto.

La distanza inclinata è proporzionale al tempo t necessario all'impulso a compiere il percorso di andata e ritorno:

$$2D = v \Delta t$$

da cui :

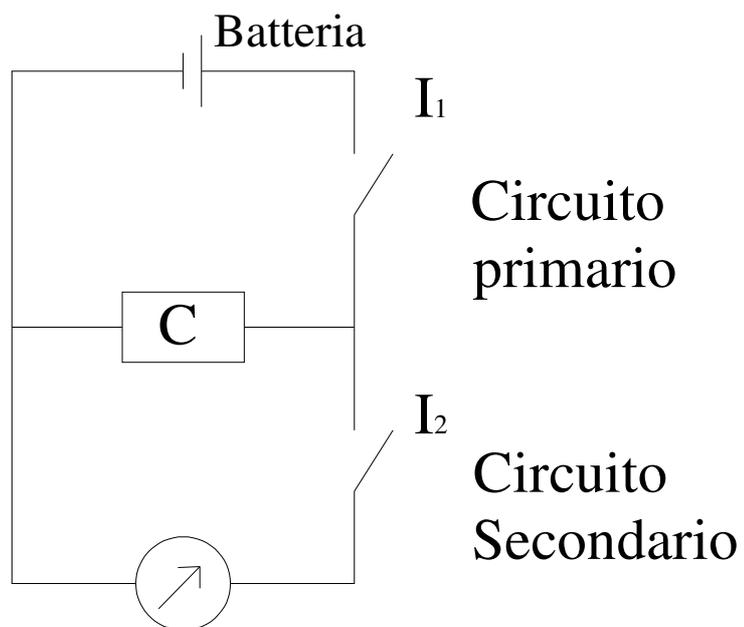
$$D = \frac{v \Delta t}{2}$$

Il problema della misura della distanza si riduce allora a quello di determinare il tempo Δt con l'accuratezza necessaria.

L'accuratezza necessaria nella misura di tempo è molto spinta. Per avere una sensibilità δD di un millimetro sulla distanza si richiede nella misura di tempo una sensibilità δt dell'ordine di alcuni picosecondi (millesimi di miliardesimo di secondo):

$$\delta t = \frac{\delta D}{t} = \frac{1 \cdot 10^{-3} m}{3 \cdot 10^8 m/s} = \frac{1}{3} \cdot 10^{-11} s \approx 3.3 \cdot 10^{-12}$$

La soluzione è stata trovata con un particolare metodo di misura basato su un circuito elettronico che concettualmente ha il seguente schema (in realtà è notevolmente più complesso):



Il circuito è composto di due parti: un circuito primario alimentato da una batteria, e un circuito secondario comprendente un rilevatore di intensità di corrente di picco (concettualmente analogo a un milliamperometro).

I due circuiti hanno un ramo comune in cui è inserito un condensatore. Inizialmente, entrambi gli interruttori I_1 e I_2 sono aperti, e nei circuiti non circola alcuna corrente.

Quando il segnale parte dal distanziometro, l'interruttore I_1 del primario viene chiuso e viene riaperto quando arriva il segnale di ritorno riflesso dal prisma. Nel tempo di viaggio Δt , a interruttore I_1 chiuso, nel primario circola corrente e nel condensatore C si accumula una quantità di carica elettrica proporzionale al tempo Δt trascorso. Viene poi chiuso l'interruttore I_2 . La carica elettrica presente nel condensatore determina una corrente transitoria (di breve durata) nel circuito secondario.

L'intensità di picco (massima) di tale corrente viene misurata dal rilevatore (milliamperometro). Essa risulta proporzionale alla carica accumulata in C , quindi anche al tempo Δt e quindi in definitiva anche alla distanza D_i .

Con una opportuna taratura del circuito (occorre anche tener conto dei ritardi nella chiusura e apertura dei circuiti, ecc.) si riesce a raggiungere accuratezze paragonabili a quelle degli EDM a misura di fase (anche se in genere leggermente inferiori).

I distanziometri a impulsi presentano alcuni vantaggi rispetto a quelli a misura di fase:

- maggiore portata (distanza massima misurabile): a parità di energia emessa, l'impulso ha un'intensità istantanea maggiore rispetto al segnale continuo di un EDM a misura di fase, per cui si propaga nell'atmosfera a distanze maggiori;

- possibilità di misurare senza riflettore (EDM reflectorless) su brevi distanze (qualche centinaio di metri, fino anche a 1 Km circa con alcuni strumenti recenti), in quanto essendo maggiore l'intensità istantanea della luce, anche il debole riflesso di tipo diffuso dato da una superficie opaca (muratura, intonaco, acciaio, pietra, ...) viene percepito dallo strumento, che riesce a determinare l'istante in cui il segnale di ritorno arriva e a misurare quindi la distanza. Con uno strumento di questo tipo è possibile effettuare il rilevamento di oggetti inaccessibili (ad es. edifici pericolanti, o in proprietà recintate) da una sola stazione e con un solo operatore (non è necessario avere un collaboratore che va a posizionare il prisma).

L'accuratezza, come già detto, è un po' inferiore agli EDM a misura di fase, ma i consistenti vantaggi sopra elencati hanno portato a una vasta diffusione degli EDM a impulsi, che tendono sempre più a sostituire quelli a misura di fase.

1.3 EDM con tecnologia Pinpoint

La nuova tecnologia Pinpoint per la misura elettronica della distanza considera gli svantaggi dei metodi di misurazione della distanza esistenti con l'obiettivo di:

- Avere precisioni delle misurazioni (nel range di mm) su grandi distanze (> 500 m) in pochi secondi (<12 sec).
- permettere l'identificazione di obiettivi multipli.
- permettere le misure di distanza indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, come polvere, fumo, nebbia, pioggia o

neve, ecc

- avere la distanza di calibrazione disponibile che corre in contemporanea con la misura di distanza per evitare derive termiche che interrompono il flusso di misurazione.

Per raggiungere questi obiettivi, è stata effettuata una precisa scelta delle frequenze di modulazione diverse dalle misure di fase tradizionale.

Preferibilmente, sono emesse solo alte frequenze di modulazione nel range di MHz a GHz in modo che il sistema diventa selettivo per quanto riguarda obiettivi molli, come pioggia, nebbia o neve.

Un ulteriore vantaggio dell'uso delle alte frequenze è l'aumento della precisione risultante nella misura della distanza.

Nel caso di uso esclusivo di alte frequenze, ogni frequenza contribuisce al risultato finale del parametro da determinare. Tuttavia, secondo la ben nota relazione tra la sensibilità e velocità di misura, se il numero di frequenze aumenta il "Sistema d'Analisi" sarà più sensibile ma più lento.

Un elemento fondamentale del "Sistema d'Analisi" è la valutazione del segnale totale per determinare la distanza; non è solo la fase come nel metodo di misura di fase, o dei tempi di volo come nel distanziometro ad impulsi.

Il segnale totale contiene informazioni su tutta la forma del segnale nel dominio del tempo o di frequenza, il canale di amplificazione e attenuazioni, rumore, ecc, quindi sono tutti misurati e compresi nella valutazione da parte del "Sistema d'Analisi".

1.3.1 Modellazione del Segnale

Il modello di segnale del "Sistema d'Analisi" si basa su un tempo invariante lineare di input-output del sistema, il cui comportamento è descritto da un impulso di risposta $h(t)$. (il sistema tempo-invariante è valida solo se si considera che i prismi e / o EDM sono stabili durante l'intera misura del tempo.)

Il comportamento del segnale di un sistema lineare elettronico può essere descritto dalla funzione impulso di risposta $h(t)$, o dalla sua risposta in frequenza $H(\omega)$ che può essere calcolata la Trasformata di Fourier (FT) di $h(t)$.

Quando è noto $h(t)$ allora la distanza può essere calcolata in modo simile al metodo del tempo di volo, quindi una soluzione sarebbe quella di determinare $h(t)$. Per un sistema lineare EDM, la risposta in frequenza $H(\omega)$ è definita come:

$$H(\omega) = \frac{a_n \cdot (i \cdot \omega)^n + a_{n-1} \cdot (i \cdot \omega)^{n-1} + \dots + a_0 \cdot (i \cdot \omega)^0}{b_m \cdot (i \cdot \omega)^m + b_{m-1} \cdot (i \cdot \omega)^{m-1} + \dots + b_0 \cdot (i \cdot \omega)^0} \cdot \left(\sum_{k=1}^d \rho_k \cdot e^{-i\omega t_k} \right) \quad (1)$$

Dove:

- $\omega = 2 \pi f$ è la velocità angolare di frequenza f ,
- i è l'unità immaginaria,
- d è il numero di target,
- ρ_k è la riflettività del target k
- t_k è il tempo di transito del segnale proporzionale alla distanza.

Le distanze sono calcolate in questo modo (c è la velocità della luce):

$$D_k = \frac{c}{2t_k}$$

Il primo termine dell'equazione (1) descrive le influenze dispersive dispersive, prodotte dalle componenti elettroniche, come i diodi laser, diodo ricevitore, filtro e si traducono in cambi di ampiezza e fase dall'ingresso all'uscita del sistema.

Il secondo termine consiste in una somma di funzioni esponenziali e descrive i tempi di transito tra la stazione totale e i vari target.

Al fine di consentire una misurazione dei tempi di transito con elevata precisione, il primo termine deve essere eliminato per mezzo di una calibrazione del sistema.

Per la calibrazione del sistema, l'equazione (1) può essere scritta completamente in una rappresentazione polare o esponenziale:

$$H(\omega) = |H(\omega)| \cdot e^{(-i\omega t_{disp}(\omega))} \cdot (\sum_{K=1}^d \rho_k \cdot e^{-i\omega t_k})$$

Mediante la calibrazione del sistema, il sistema di amplificazione $H(\omega)$ e la dispersione $t_{disp}(\omega)$ sono determinati alle frequenze emesse nel segnale di misura e quindi possono essere assunte note nell'attuale misurazione di distanza.

Dopo la calibrazione del sistema, la funzione di risposta calibrata per il caso di un target è:

$$H_c(\omega) = \rho_1 \cdot e^{-i\omega t_1}$$

E per il caso multi-target è:

$$H_c(\omega) = \sum_{k=1}^d \rho_1 \cdot e^{-i\omega t_k}$$

È stato dimostrato che il termine $H(\omega)$ non è il modo più efficiente per analizzare il sistema, quindi alcuni produttori hanno scelto di utilizzare una funzione di merito in coincidenza con il principio di massima verosimiglianza che contiene i parametri per determinare il tempo t_1 (o t_k) che impiega il raggio laser nel percorrere il doppio della distanza tra l'EDM ed il target.

Di conseguenza, la soluzione pratica prende un adeguato approccio di massima verosimiglianza, con il quale la fase e l'ampiezza di tutti i segnali ricevuti modulati sono valutati in un'avanzata formulazione matematica che considera tutte le frequenze di modulazione che vengono combinate in una singola funzione di merito.

Un esempio dei risultati di questa avanzata formulazione matematica combinata con un set di frequenze associate è il "segnale orario" di Figura 2, dove il primo riflette la distanza di un singolo bersaglio a circa 100 metri, ed il secondo riflette le distanze di due obiettivi a circa 50 metri e 110 metri. Il sistema d'analisi dell'EDM utilizza uno schema di modulazione pulsata in cui i segnali ricevuti sono campionati e conservati in un buffer.

Successivamente si costruisce una funzione di merito utilizzando tutte le informazioni del segnale in ingresso.

Così, il calcolo della distanza viene fatta valutando numericamente il segnale orario costruito.

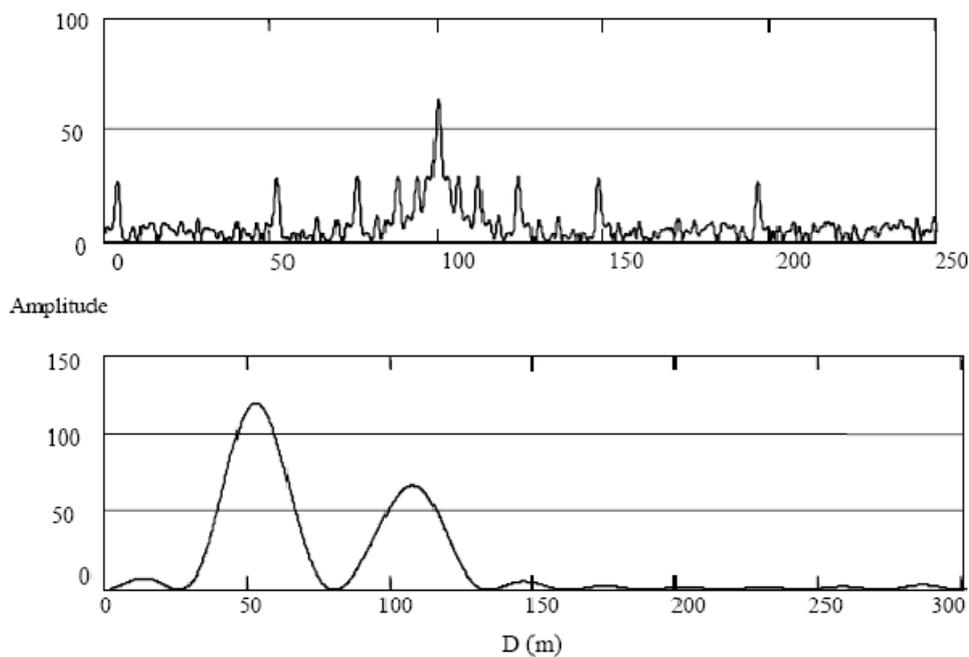


Figura 2: L'output del sistema d'analisi per una distanza di 100 m.

Sono riassunte alcune delle caratteristiche chiave di questo nuovo principio di misura:

1. Non sono utilizzate basse frequenze, ma vengono generate solo alte frequenze di almeno 100 MHz al fine di raccogliere le informazioni sulla distanza con una risoluzione esclusivamente elevata.

In questo modo, ogni frequenza contribuisce al risultato finale garantendo un'alta precisione. Con questo metodo il tempo di misura si riduce ed è realizzabile una precisione sulla distanza minore del millimetro.

2. Impulsi laser ultra corti nel range inferiore al nsec con pulsazione $\geq 100\text{MHz}$.

In questo modo, gran parte dell'energia viene emessa in armoniche superiori fino a 1000MHz con ancora alta precisione a distanza.

3. Il ricevitore raccoglie armoniche più alte fino a 500MHz .
4. Il numero di frequenze di modulazione utilizzate dipende dalla forza del segnale ricevuto:
 - Ad alti livelli di segnale, 4 frequenze sono sufficienti per misurare con specifica precisione.
 - A bassi livelli di segnale fino a 10 frequenze sono emesse e analizzate.
5. Dopo il campionamento dei segnali ricevuti viene calcolata una funzione di merito che si può comparare al tempo di volo del segnale. Il tempo di volo del segnale ha il suo massimo alla distanza da stimare.
6. Ulteriori vantaggi del nuovo principio di misura sono la sua elevata sensibilità e la sua risoluzione intrinseca di ambiguità. Per determinare il numero di onde o impulsi in aria non è più un problema.

2 ERRORI DEI DISTANZIOMETRI ELETTO-OTTICI

Le misure eseguite con distanziometri elettro-ottici sono affette da numerosi errori strumentali di piccola entità.

I principali errori dei distanziometri elettro-ottici possono essere classificati in:

2.1 COSTANTE ADDITIVA

2.2 ERRORI CICLICI

2.3 ERRORI DI SCALA

2.4 ERRORI NON LINEARI DIPENDENTI DALLA DISTANZA

2.1 COSTANTE ADDITIVA

Tutte le distanze misurate da un particolare EDM con il suo riflettore sono soggette ad un errore costante. Poiché l'origine elettro-ottica, o zero dello strumento, spesso non si trova sull'asse verticale dello strumento, una piccola correzione deve essere applicata a tutte le misure di distanza per riportare la distanza misurata all'asse verticale dello strumento. Tale correzione è usualmente chiamata COST ADD.

La costante additiva è influenzata da tre fattori:

- (a) ritardi elettrici, deviazioni geometriche, ed eccentricità nell' EDM,
- (b) differenze tra il centro elettronico e il centro meccanico dell' EDM,
- (c) differenze tra i centri ottici e meccanici del riflettore.

Il costruttore fornisce una costante additiva globale che tiene conto sia di quella del distanziometro che della costante del riflettore.

Questa correzione è dell'ordine di 1-2mm, per strumenti con una precisione interna di ± 5 mm al momento della regolazione di fabbrica e quando si usa uno specifico riflettore.

La costante additiva residua può cambiare nel tempo e nel corso di lavori di manutenzione o riparazione.

Di conseguenza si dovrebbe determinare periodicamente ed applicarla a tutte le distanze misurate. Essa è influenzata dalla temperatura, dal numero di prismi e dalle impostazioni dell'attenuatore o del diaframma.

2.2 ERRORI CICLICI

Gli strumenti EDM basati sul principio di misura di fase, possono mostrare errori periodici con lunghezza d'onda pari all'unità di lunghezza dello strumento U o ai suoi sottomultipli.

Questo errore può essere dovuto a interferenze elettro-ottiche o ad errori sistematici del sistema di misura della fase. Quelli del primo tipo hanno andamento sinusoidale, mentre i secondi possono avere un qualunque andamento ma con lunghezza d'onda U . Errori periodici con lunghezza d'onda U sono chiamati errori periodici di primo ordine. Quelli con lunghezza d'onda pari a $U/2$, $U/3$, $U/4$ etc. sono chiamati errori periodici di ordine superiore.

Gli errori ciclici vengono in genere espressi matematicamente con delle serie di Fourier. L'entità dell'errore può raggiungere l'ordine di 5-10 mm, ma negli EDM moderni è di solito inferiore ai 2mm (trascurabile).

2.2.1 Errori dovuti ad interferenze elettro-ottiche

A causa di una interferenza elettro-ottica, una parte del segnale trasmesso si sovrappone al segnale di ritorno. Si verifica in tutti i distanziometri, in

misura maggiore o minore, indipendentemente dal sistema di misura di fase. Per strumenti con accuratezza interna $\pm 5\text{mm}$ l'ampiezza degli errori ciclici nei distanziometri a corto raggio è minore di 5mm.

Gli errori dovuti ad interferenze elettro-ottiche, possono essere descritti con un modello matematico. Considerando il segnale trasmesso y_1 ed il segnale di ritorno y_2 , possono essere scritti come:

$$y_1 = A_1 \text{sen}(\omega t)$$

$$y_2 = A_2 \text{sen}(\omega t + \Delta\Phi)$$

Dove si è indicato con A l'ampiezza dell'oscillazione, con Φ la differenza di fase, con ω la pulsazione pari a $2\pi f = 2\pi / T$, T il periodo e f la frequenza.

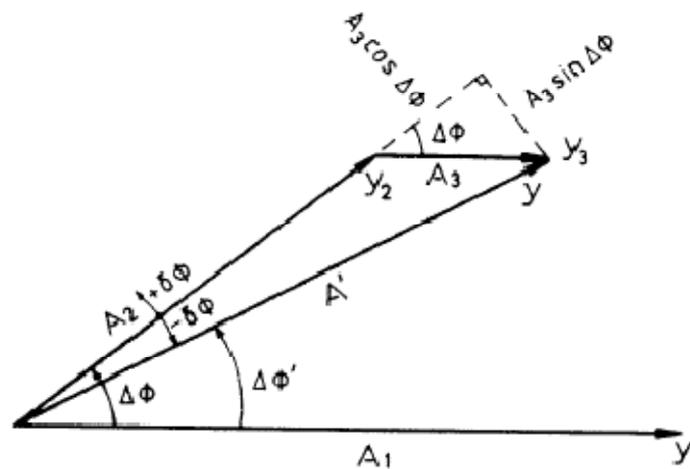


Fig.1. Errore periodico ($\delta\Phi$) causato dal vettore y_3 di interferenza del segnale alla ricevuta del segnale y_2 .

Il distanziometro utilizza il segnale combinato ed errato y , piuttosto che il corretto segnale di ritorno y_2 , e misura la differenza di fase $\Delta\Phi'$ piuttosto che la giusta fase $\Delta\Phi$. Il segnale di disturbo y_3 ha la medesima fase e frequenza del segnale trasmesso, ma ampiezza minore:

$$y_3 = A_3 \text{ sen}(\omega t) \quad \text{con } A_3 < A_1$$

Il segnale sovrapposto di ritorno diventa:

$$\begin{aligned} y &= y_2 + y_3 \\ &= A_3 \text{ sen}(\omega t) + A_2 \text{ sen}(\omega t + \Delta\Phi) \end{aligned}$$

Poiché due onde con stessa frequenza sono sovrapponibili, l'onda risultante avrà stessa frequenza, ma differente fase e ampiezza:

$$y = A \text{ sen}(\omega t + \varphi)$$

Con la condizione $A_3 < A_2$ posso scrivere:

$$y = (A_2 + A_3 \cos \Delta\Phi) \sin \left\{ \omega t + \left(\Delta\Phi - \frac{A_3}{A_2} \sin \Delta\Phi \right) \right\}$$

Poiché gli strumenti EDM si basano sulla misura della differenza di fase, solo l'ultimo termine è importante:

$$\Delta\Phi' = \Delta\Phi + \delta\Phi = \Delta\Phi - \frac{A_3}{A_2} \text{ sen} \Delta\Phi$$

Che scritto in termini di frazione dell'unità di lunghezza diventa:

$$L' = L - \frac{A_3}{A_2} \left(\frac{U}{2\pi} \right) \text{ sen} \left(\frac{2\pi L}{U} \right)$$

Dove:

- L' è la frazione di unità di lunghezza misurata sul segnale di ritorno contaminato
- L frazione di unità di lunghezza del segnale di ritorno
- U unità di lunghezza del distanziometro
- A₂ ampiezza del segnale di ritorno
- A₃ ampiezza del segnale di disturbo ($A_3 \ll A_2$)

Il termine $\left(\frac{A_3}{A_2} \text{sen} \Delta\Phi\right)$ viene chiamato errore periodico di primo ordine poiché è funzione della frazione dell'unità di lunghezza e così si ripete ogni U metri.

Tale errore inoltre è funzione anche della forza del segnale di ritorno (A_2) che decresce al crescere delle distanza. A seconda del distanziometro e a seconda del punto dove si verifica l'interferenza, questo errore può crescere o meno con la distanza. L'ampiezza di questo errore può essere di qualche millimetro.

Per esempio se l'unità di lunghezza U è di 10m, e l'ampiezza del segnale di disturbo $A_3 = 0.003 A_2$, l'ampiezza dell'errore periodico corto è:

$$\frac{A_3}{A_2} \left(\frac{U}{2\pi}\right) = 0.003 \left(\frac{10}{2\pi}\right) = 4.8 \text{ mm}$$

2.2.2 Errori del sistema di misura della fase

Alcuni sistemi di misura di fase analogici possono visualizzare l'errore periodico con andamento non sinusoidale per più di un'unità di lunghezza dello strumento U . Questi errori sono costanti e quindi indipendenti dalla distanza.

2.2.3 Errori dovuti al multipath

L'errore ciclico del primo ordine e di ordine superiore può anche essere causato dal fatto che il segnale viaggia più di due volte tra il distanziometro ed il riflettore, a causa di riflessioni improprie del segnale di ritorno. Il segnale di ritorno può essere riflesso dal distanziometro ottico e viaggiare ancora una volta verso il riflettore, per poi tornare indietro. Questo processo può ripetersi per poco tempo poiché la potenza

del segnale si riduce ad ogni riflessione. Considerando l'equazione precedentemente illustrata:

$$\Delta\Phi' = \Delta\Phi + \delta\Phi \quad (2.2.3.1)$$

$$= \Delta\Phi - \frac{A_3}{A_2} \text{sen}\Delta\Phi \quad (2.2.3.2)$$

L'errore periodico dato da 1 multipath può essere modellizzato con la seguente equazione:

$$\delta\Phi = \frac{A_5}{A_2} \text{sen}(\Delta\Phi) + \frac{A_6}{A_2} \text{sen}(2\Delta\Phi) + \frac{A_7}{A_2} \text{sen}(3\Delta\Phi)$$

Dove A5, A6, A7 sono le ampiezze dei segnali con doppio, triplo e quadruplo percorso del segnale rispettivamente. Poiché tali ampiezze calano al crescere della distanza, questi errori causati dal multipath diventano più piccoli al crescere della distanza. Inoltre poiché hanno segno opposto all'errore della equazione (2.2.3.2) possono anche compensarsi a vicenda.

2.2.4 Risultati sperimentali

I risultati sperimentali indicano che gli errori ciclici di primo ordine possono cambiare in fase ed ampiezza al variare della distanza, della forza del segnale, del tempo, delle condizioni di luce ambientali e dell'utilizzo. Possono arrivare a superare i 10 millimetri. Da notare che impronte digitali sulla lente frontale del distanziometro elettronico, può generare interferenze e quindi errore periodico corto. Gli errori di multipath sono in genere piccoli e di primo ordine.

I distanziometri possono essere calibrati dall'utente in modo da determinare gli errori ciclici e, quindi, correggere le distanze misurate.

2.3 ERRORI DI SCALA

Gli errori di scala nei distanziometri sono causati principalmente dall'oscillatore e dai diodi di emissione/ricezione. Ci sono anche numerose cause esterne che possono causare effetti di scala come ad esempio, un'erronea valutazione della velocità della luce, l'omissione della correzione dell'umidità, una stima erranea di temperatura e pressione, errate riduzioni geometriche etc. L'effetto di scala legato all'oscillatore è dovuto alla sua sensibilità alla temperatura.

Gli OCXO's (Oven- Controlled Crystal Oscillators) sono dei circuiti elettronici che usano la risonanza di un cristallo vibrante per generare un segnale elettrico con frequenza molto precisa. Gli OCXO's danno prestazioni migliori una volta raggiunta la temperatura operativa. Il diagramma frequenza-temperatura caratteristico dell'oscillatore al quarzo può essere modellizzato con un polinomio del terzo grado.

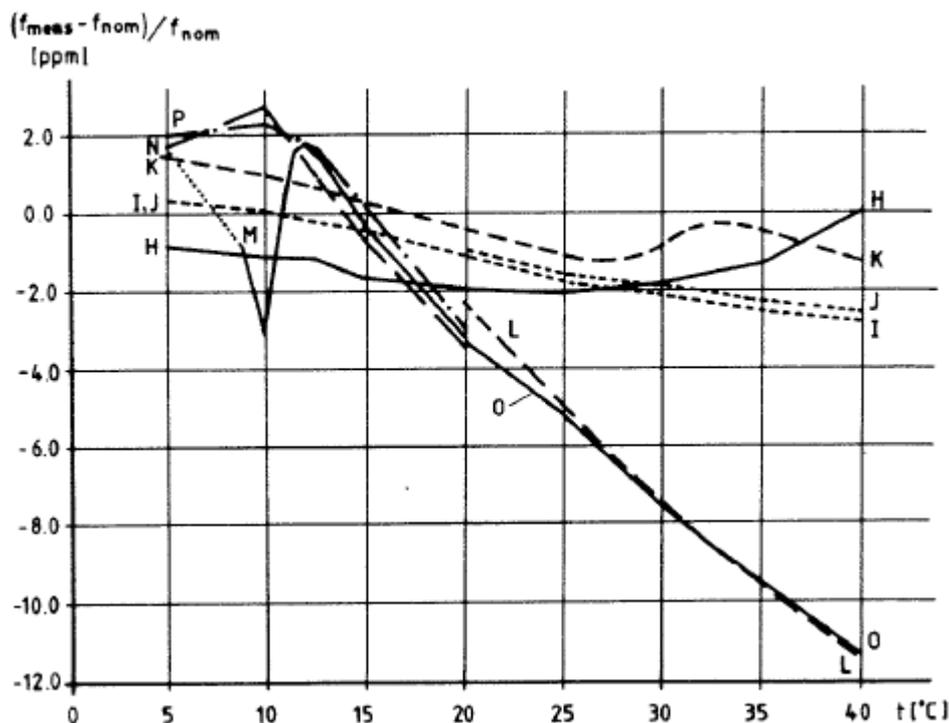


Fig.2 Diagramma caratteristico frequenza-temperatura per alcuni distanziometri.

A causa della dipendenza dell'oscillatore dalla temperatura, la scala dei distanziometri è molto colpita dall'effetto del riscaldamento dello strumento. Questo significa che la frequenza dell'oscillatore dipende da quanto tempo il distanziometro è operativo, in quanto durante le misurazioni il distanziometro dissipa calore che va a riscaldare l'oscillatore. L'effetto del riscaldamento può ammontare a meno di 1ppm oppure a più di 5ppm oltre la prima ora, in funzione dello strumento.

Il comportamento della frequenza nel tempo è descrivibile nel breve termine e nel lungo termine; la stabilità nel breve termine è molto buona, mentre la stabilità nel lungo termine è tipicamente minore di 1ppm/anno.

L'errore legato ai diodi è invece dovuto al fatto che anch'essi sono influenzati dalla temperatura, dal fatto che la portante emessa può avere lunghezza d'onda diversa da quella nominale, o da disomogeneità della fase in tutta l'emissione.

La scala di un distanziometro va verificata periodicamente perché l'oscillatore può essere soggetto ad un progressivo invecchiamento (effetto ageing).

2.4 ERRORI NON LINEARI DIPENDENTI DALLA DISTANZA

In questa categoria ricadono tutti gli errori sistematici dipendenti dalla distanza che non rientrano nelle classi sopra trattate. Questi errori per lo più sono legati a disomogeneità della fase nell'emissione e ricezione di diodi.

Questi errori chiamati anche *errori non periodici*, possono essere modellizzati con un polinomio di ordine n. Prove sperimentali hanno evidenziato che gli errori non periodici sono particolarmente evidenti sulle brevi distanze (a circa 20 metri) e possono arrivare anche a 20 mm.

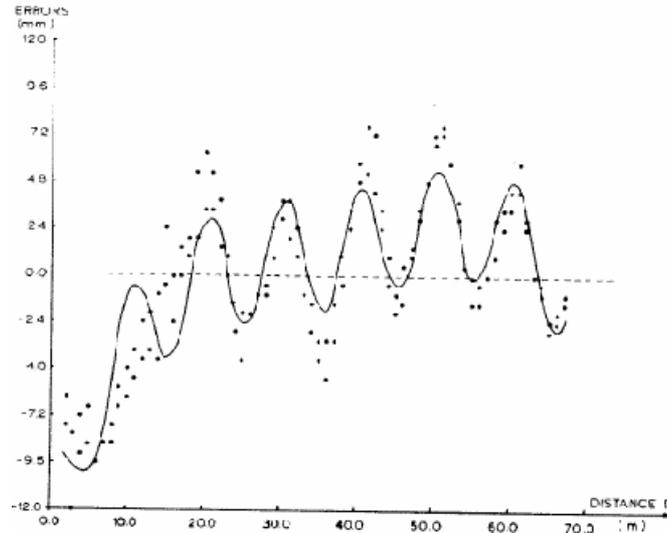


Fig.3 Errore non periodico di un distanziometro a corto raggio.

L'equazione per l'adatta correzione strumentale (IC) nella Fig.3 è la seguente:

$$\begin{aligned}
 IC = COST - 167.8 \cdot \left(\frac{D}{100}\right) + 679.0 \cdot \left(\frac{D}{100}\right)^2 - 1239.9 \cdot \left(\frac{D}{100}\right)^3 \\
 + 820.1 \cdot \left(\frac{D}{100}\right)^4 - 2.5 \cdot \text{SEN}\left(\frac{2\pi D}{10}\right) - 1.6 \cdot \text{COS}\left(\frac{2\pi D}{10}\right)
 \end{aligned}$$

Con: IC = Correzione Strumentale (mm)

D = Distanza (m)

CONST= Costante Additiva(mm)

Questi errori possono essere calibrati con allineamenti con più stazioni

2.5 MODELLO MATEMATICO COMPLESSIVO DEGLI ERRORI

Per quanto detto nei precedenti paragrafi, il modello matematico rappresentativo dei principali errori degli EDM può essere così espresso:

$$\begin{aligned}
 IC = A_{00} + A_{01}T + A_{02}e^{(-A_{03}t)} + (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3)D + (A_{14}Y)D \\
 + (A_{15}e^{(-A_{16}t)})D + A_{20}D^2 + A_{30}D^3 + A_{40}D^4 + A_{50}D^5 + \dots \\
 + (B_{11} + B_{12}D)\text{cos}\left(\frac{2\pi D}{U}\right) + (C_{11} + C_{12}D)\text{sen}\left(\frac{2\pi D}{U}\right) \\
 + (B_{21} + B_{22}D)\text{cos}\left(\frac{4\pi D}{U}\right) + (C_{21} + C_{22}D)\text{sen}\left(\frac{4\pi D}{U}\right) \\
 + (B_{31} + B_{32}D)\text{cos}\left(\frac{6\pi D}{U}\right) + (C_{31} + C_{32}D)\text{sen}\left(\frac{6\pi D}{U}\right) \\
 + (B_{41} + B_{42}D)\text{cos}\left(\frac{8\pi D}{U}\right) + (C_{41} + C_{42}D)\text{sen}\left(\frac{8\pi D}{U}\right) + \dots \quad (2.5.1)
 \end{aligned}$$

Dove

IC = Correzione Strumentale

D = Distanza

T = temperatura

t = tempo dal momento in cui lo strumento è stato acceso

U = unità di lunghezza del distanziometro

Y = anni dal momento dell'acquisto dell'EDM

A, B, C = parametri da calibrare

In particolare:

- A00, A01 e A02 sono i termini della costante additiva rispettivamente costante, dipendente dalla temperatura e dipendente dal riscaldamento dello strumento.
- Da A10 ad A15 modellizzano l'effetto di scala (A14 e A15 in particolare si riferiscono all'ageing ed al riscaldamento)
- Da A20 ad A50 esprimono gli errori non lineari che dipendono dalla distanza
- Le ultime 4 righe si riferiscono alla serie di Fourier per modellizzare gli errori ciclici di primo ordine e superiori.

Quando uno strumento deve essere utilizzato nel campo di precisione dichiarato dal costruttore, è sufficiente calibrare i termini:

-A00 costante additiva

-A10 correzione di scala

-B11 e C11 errore ciclico del primo ordine

Ed in alcuni casi anche i parametri da A20 ad A50 (errori non lineari dipendenti dalla distanza) e B21 e C21 (errore ciclico del second'ordine)

3. CALIBRAZIONE DEGLI EDM

Con la calibrazione degli EDM si determinano le correzioni strumentali proprie dello strumento e le precisioni associate. Le correzioni strumentali (IC) sono sommate alle distanze misurate per ottenere la corretta distanza. La calibrazione periodica degli EDM è consigliata ai fini di un controllo della qualità dello strumento al momento dell'acquisto e periodicamente successivamente, per il miglioramento dell'accuratezza.

Per verificare che un distanziometro lavori con i suoi effettivi limiti di precisione, è sufficiente determinare periodicamente i valori di A00 (costante additiva), A10 (correzione di scala), B11 e C11 (errori ciclici del I ordine) e talvolta anche i coefficienti da A20 ad A50 e B21 e C21.

Se invece si volesse aumentare la precisione di un EDM occorrerebbe determinare anche alti parametri della equazione (2.5.1).

In ogni caso la calibrazione dovrebbe essere applicata per gli errori sistematici significativi da un punto di vista statistico. Per stabilire quali siano significativi e quali no, sarebbe necessario fare una prima calibrazione completa sulla base della 2.5.1; le calibrazioni successive serviranno solo a controllare i parametri significativi.

Poiché la maggior parte degli errori noti è dipendente dalla distanza, sono stati messi a punto sistemi per determinare i coefficienti della correzione strumentale dipendenti dalla distanza.

Il sistema ideale per determinare questi parametri sarebbe l'utilizzo di un riflettore fissato su un carrello che viene fatto muovere su una rotaia, per uno o più Km di lunghezza. Con il distanziometro montato alla fine della rotaia, possono essere misurate differenti distanze in tutto il campo di lavoro del distanziometro, che vengono poi confrontate con lunghezze standard di lavoro.

Per ragioni pratiche si preferisce sostituire l'approccio ideale della rotaia con un numero finito di stazioni (in genere su pilastro) disposte su un allineamento.

Questi allineamenti (vaseline) consentono di stimare quasi tutti se non tutti i coefficienti dipendenti dalla distanza dell'IC (Instrument Correction), sempre se è nota la vera lunghezza della linea di base. In alcuni casi, si utilizzano ulteriori test per stimare gli errori ciclici.

Questi test possono essere integrati inoltre con ulteriori prove per stimare la dipendenza della costante additiva e della scala dalla temperatura o dal fenomeno del warm-up.

3.1 LINEE DI CALIBRAZIONE DI EDM

Gli allineamenti possono essere costruite con schemi differenti. In ogni caso vengono progettate in modo ottenere una distribuzione omogenea di tutte le distanze misurate tra la più piccola e la più grande, senza ripetizioni. Qualche schema richiede che ogni lunghezza sia multipla dell'unità di lunghezza d'onda dello strumento. Di seguito vengono presentate tre diverse modalità per la realizzazione di allineamenti di calibrazione.

3.1.1 SCHEMA DI HEERBRUGG

Il progetto originale pubblicato da Schwendener nei primi anni "70" prevede 7 stazioni su cui si effettuano 21 osservazioni in tutte le combinazioni, per una lunghezza totale della baseline di 1021.5m. E' basato su una lunghezza di base di 10 m ed è composto dalle seguenti sezioni: 19.5, 39.0, 68.0, 127.5, 256.0, 511.5.

Sono ripetute alcune frazioni dell'unità di lunghezza d'onda: 1.5 m tre volte e 7.5m due volte. Il progetto di questa baseline permette di determinare tutti gli errori dipendenti dalla distanza inclusi gli errori periodici.

La soluzione ai minimi quadrati fornisce i valori delle 6 distanze incognite e della costante additiva. Gli errori periodici vengono determinati plottando i residui in funzione delle corrispondenti frazioni dell'unità di lunghezza. Se sono presenti tali errori, occorre correggere le distanze.

Se non vengono effettuate le correzioni l'errore sulla costante additiva può raggiungere il 75% dell'ampiezza dell'errore periodico.

Per procedere al progetto di una baseline di calibrazione secondo questo schema, occorre definire quattro parametri iniziali:

U = unità di lunghezza dell'EDM

A = distanza più piccola della baseline (deve essere un multipla di U)

C_0 = lunghezza totale della baseline desiderata

n = numero di stazioni

Il valore di C_0 deve essere scelto secondo la massima distanza su cui sarà possibile effettuare il test nelle peggiori condizioni atmosferiche.

C_0 sarà ovviamente la massima distanza su cui sarà possibile fare il test, e il range A- C_0 dovrà essere quello in cui normalmente si lavora con l'EDM che si intende calibrare. Il numero di stazioni dovrà essere scelto come compromesso tra la precisione che si intende conseguire (in relazione anche alla possibilità di lavorare o meno con distanze note) e l'onere del lavoro di misura. Un giusto equilibrio tra costo e precisione è ottenibile con 6 o 7 stazioni. I parametri da definire per il progetto sono:

- C = lunghezza totale finale della baseline

- B_0 = stima del primo parametro di progetto
- B = valore finale del primo parametro di progetto (arrotondato al primo multiplo di A)
- D = secondo parametro di progetto.

I parametri di progetto si calcolano con le seguenti formule:

numero di stazioni	B_0	D
5	$\frac{1}{6}(C_0 - 4A - U)$	$\frac{1}{16}U$
6	$\frac{1}{10}(C_0 - 5A - U)$	$\frac{1}{25}U$
7	$\frac{1}{15}(C_0 - 6A - U)$	$\frac{1}{36}U$

Tab.1 Valore dei parametro di progetto B_0 e D per lo *SCHEMA DI HEERBRUGG*.

Una volta che sono stati determinati B_0 e D possono essere calcolate le diverse sezioni della baseline con le seguenti formule:

Sezione	Baseline con		
	5 stazioni	6 stazioni	7 stazioni
1	$A+B+3D$	$A+B+3D$	$A+B+3D$
2	$A+3B+7D$	$A+3B+7D$	$A+3B+7D$
3	$A+2B+5D$	$A+4B+9D$	$A+5B+11D$
4	$A+D$	$A+2B+5D$	$A+4B+9D$
5	-	$A+D$	$A+2B+5D$
6	-	-	$A+D$
$C =$	$4A+6B+16D$	$5A+10B+25D$	$6A+15B+36D$

Tab.2 Sezioni e lunghezza totale della baseline a seconda del numero di stazioni.

Prima B_0 è determinato con la tabella 1, approssimato per difetto al prossimo multiplo di $U(B)$. Il secondo parametro di progetto D deriva direttamente dal numero di stazioni e da U . Il suo valore è mostrato nella

tabella 1. Noti i valori di A ,B e D, posso calcolarmi le sezioni e la lunghezza totale C della baseline con le formule riportate in tab. 2.

Note le lunghezze delle sezioni, possono essere calcolate tutte le combinazioni di distanza. È consigliato plottare tutte le combinazioni di distanze in funzione della distanza per verificare la qualità del progetto. Poiché la distribuzione delle distanze sull'unità di lunghezza è uguale alla distribuzione sulla lunghezza totale del baseline, non bisogna plottare la prima.

Se il progetto non è soddisfacente, si può modificare con piccole variazioni dei coefficienti A e/o B. Comunque B non dovrebbe essere uguale ad A per evitare la ripetizione di distanze. Buoni progetti sono quelli in cui $B=2A$.

Un esempio numerico è riportato in tab. 3, in cui sono stati assegnati i seguenti parametri:

- $U = 10\text{m}$
- $A = 2U = 20\text{m}$
- $C_0 = 1000\text{m}$ (lunghezza totale della baseline desiderata)
- 8 stazioni
- $B_0 = 40.47\text{m}$, arrotondato per difetto a $B = 40\text{m}$
- $C = 990\text{m}$ (lunghezza totale finale della baseline)
- $D = 0.204\text{m}$

Stazioni	Sezioni	Combinazioni di distanza						
		0						
1		0						
	$20+40+0.61=60.61$							
2		60.61	0					
	$20+120+1.43=141.43$							
3		202.04	141.43	0				
	$20+200+2.24=222.24$							
4		424.28	363.67	222.24	0			
	$20+240+2.65=262.65$							
5		686.93	626.32	484.89	262.65	0		
	$20+160+1.84=181.84$							

6		868.77	808.16	666.73	444.49	181.84	0	
	$20+80+1.02=101.02$							
7		969.79	909.18	767.75	545.51	282.86	101.02	0
	$20+ 0.2=20.2$							
8		989.99	929.38	787.95	565.71	303.06	121.22	20.20

Tab 3.

Le formule danno una distribuzione omogenea delle distanze sulla lunghezza della baseline ed anche sull'unità di lunghezza U. Le distanze o le loro frazioni dell'unità di lunghezza non sono ripetute.

Poichè tutte le combinazioni di distanze sono distribuite nella stessa maniera sull'unità di lunghezza e sulla lunghezza del baseline, gli errori ciclici possono essere rappresentati in un grafico dei residui in funzione della distanza.

Come già detto la costante additiva così ottenuta può essere pari al 75% dell'ampiezza dell'errore ciclico; per togliere l'errore della costante additiva si può calcolare l'errore ciclico, correggere le misure e rieffettuare la calibrazione.

Sarebbe comunque preferibile includere gli errori periodici come parametri incogniti della compensazione ai minimi quadrati.

3.1.2 SCHEMA DI AARAU

Questo schema ha sezioni che sono multipli esatti dell'unità di lunghezza U. Assumendo che ampiezza e fase degli errori ciclici non cambino sulla lunghezza della baseline, l'errore ciclico si presenterà nella stessa misura in tutte le distanze misurate sull'allineamento.

In tal modo, la costante additiva stimata conterrà anche il valore dell'errore ciclico che, quindi dovrà essere determinato separatamente con procedure di test specifici in modo da depurare la costante additiva dal suo effetto sistematico.

Una formula generale per la baseline di Aarau è riportata nella Tab.4 e Tab.5 in cui i parametri sono gli stessi del paragrafo precedente.

numero di stazioni	B_0
5	$\frac{1}{6}(C_0 - 4A)$
6	$\frac{1}{10}(C_0 - 5A)$
7	$\frac{1}{15}(C_0 - 6A)$
8	$\frac{1}{21}(C_0 - 7A)$

Tab.4 Valore dei parametro di progetto B_0 per lo *SCHEMA DI AARAU*.

Sezione	Baseline con		
	5 stazioni	6 stazioni	7 stazioni
1	A+B	A+B	A+B
2	A+3B	A+3B	A+3B
3	A+2B	A+4B	A+5B
4	A	A+2B	A+4B
5	-	A	A+2B
6	-	-	A
7	-	-	-
C =	4A+6B	5A+10B	6A+15B

Tab.5 Sezioni e lunghezza totale della baseline a seconda del numero di stazioni.

In questo schema tutte le combinazioni di distanze sono multipli dell'unità di lunghezza U, quindi non è più richiesto il parametro D.

Un esempio numerico è riportato in tab. 6, in cui sono stati assegnati i seguenti parametri:

- U = 10m, A = 2U = 20m
- $C_0 = 1000\text{m}$ (lunghezza totale della baseline desiderata)
- 8 stazioni
- $B_0 = 40.47\text{m}$, arrotondato per difetto a B = 40m

- C = 990m (lunghezza totale finale della baseline)
- D = 0.204m

Stazioni	Sezioni	Combinazioni di distanza						
1		0						
	20+40=60							
2		60	0					
	20+120=140							
3		200	140	0				
	20+200=220							
4		420	360	220	0			
	20+240=260							
5		680	620	480	260	0		
	20+160=180							
6		860	800	660	440	180	0	
	20+80=100							
7		960	900	760	540	280	100	0
	20=20							
8		980	920	780	560	300	120	20

Tab 6.

Con questo schema gli errori ciclici e gli errori non lineari dipendenti dalla distanza sono determinati separatamente e quindi sono ottenuti con più precisione rispetto allo schema di Heerbrugg. Questo schema comporta un onere maggiore di lavoro ma consente di ottenere maggiori precisioni.

3.1.3 SCHEMA DI HOBART

Questo terzo schema di progetto di una baseline, non si basa sulla misurazione di tutte le combinazioni di distanza come i due schemi già descritti ed è anche differente poiché si basa sulla conoscenza delle distanze che costituiscono la baseline.

Le stazioni sono spaziate in intervalli uguali sulla lunghezza della baseline. Il distanziometro da calibrare occupa solo un punto finale della

baseline ed una stazione ausiliaria posta a mezza unità di lunghezza dello strumento. I pilastri dell'originale schema di Hobart per la calibrazione degli EDM sono posti a 0, 5, 10, 123, 231, 359, 477 e 595m, in cui il pilastro a 5m è usato per distanziometri con unità di lunghezza pari a 10m, mentre quello a 10m è usato per distanziometri con unità di lunghezza pari a 20m.

Questa specifica baseline è caratterizzata da 6 stazioni fondamentali e da 2 stazioni ausiliari. Le procedure di misura si eseguono in poco tempo ed il distanziometro non si muove più di qualche metro.

Questo schema permette di determinare la costante additiva e la correzione di scala con semplici regressioni lineari. Entrambi i parametri non sono affetti da alcun errore ciclico del primo ordine e minimamente da errore ciclico del terzo ordine. Comunque entrambi i parametri sono affetti da errori ciclici del secondo ordine. La scarsa ridondanza di misure dell'originale schema di Hobart può essere migliorata con un incremento di stazioni fondamentali e/o stazioni ausiliare poste ad 1/4 e 3/4 dell'unità di lunghezza dalla prima stazione. In Tab.7 sono espresse le equazioni generalizzate per il progetto di baselines secondo Hobart, in cui compaiono i seguenti parametri:

- U = unità di lunghezza dell'EDM
- C_0 = lunghezza totale della baseline desiderata
- C = lunghezza totale finale della baseline
- B_0 = stima del primo parametro di progetto
- B = valore finale del primo parametro di progetto (arrotondato per difetto al primo multiplo di)
- D = secondo parametro di progetto.
- $B + D$ = lunghezza della sezione tra le stazioni fondamentali.

Numero di stazioni	Numero di sezioni	Numero di misure	C	B ₀	D
6 (+1)	5	10	5B+U	(C ₀ -U)/5	U/5
7 (+1)	6	12	6B+U	(C ₀ -U)/6	U/6
8 (+1)	7	14	7B+U	(C ₀ -U)/7	U/7
9 (+1)	8	16	8B+U	(C ₀ -U)/8	U/8
10 (+1)	9	18	9B+U	(C ₀ -U)/9	U/9
11 (+1)	10	20	10B+U	(C ₀ -U)/10	U/10
12(+1)	11	22	11B+U	(C ₀ -U)/11	U/11

Tab.7 Equazioni che descrivono tutti i parametri per lo schema di Hobart.

3.1.4 NORMA ISO

ISO (International Organization for Standardization) è una federazione mondiale di organismi nazionali di normalizzazione (corpi membri ISO). Il lavoro di preparazione degli standard internazionali è di norma effettuata mediante comitati tecnici ISO.

Ogni organismo membro si interessa di un argomento per il quale viene istituito un comitato tecnico.

La norma che a noi interessa per la calibrazione degli EDM è la *ISO 17123-4: Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments —Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments)*.

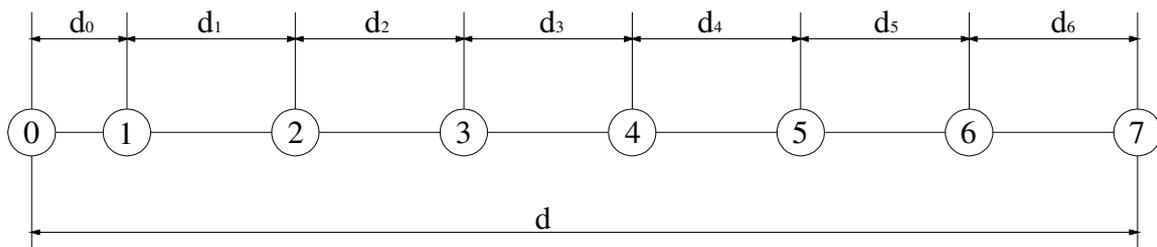
Questa parte della norma ISO 17123 chiarisce le procedure di campo da adottare per la determinazione e la valutazione della precisione dei distanziometri elettro-ottici (strumenti EDM) e delle loro apparecchiature ausiliarie quando vengono rilevate misure di distanze. Questa parte della norma ISO 17123 può essere pensata come uno dei

primi passi nel processo di valutazione dell'incertezza di una misura. L'incertezza di un risultato di una misurazione dipende da un serie di fattori. Queste includono, tra gli altri: ripetibilità, la riproducibilità (nei giorni), e una valutazione approfondita di tutte le fonti di errore possibile, come prescritto dalla guida ISO sull'espressione dell'incertezza nelle misure (GUM). Queste procedure di campo sono state sviluppate specificamente per le applicazioni in sito, senza bisogno di attrezzature speciali e sono appositamente ideate per ridurre al minimo le influenze atmosferiche.

3.1.4.1 Configurazione della linea di calibrazione

Vengono stabiliti sette punti lungo una linea retta lunga circa 600m in una zona pianeggiante o in una zona con una leggera pendenza costante (vedi Figura). I punti devono essere stabili durante le misurazioni.

Al fine di ottenere valori rappresentativi per la deviazione standard sperimentale e la correzione del punto zero (costante additiva), questi punti devono essere selezionati in modo tale che le distanze misurate con la tecnica della misura di fase, siano distribuite uniformemente su tutta l'unità di lunghezza dello strumento EDM.



Una buona configurazione della linea di calibrazione deriva dalla seguente procedura:

- $d_0 = 600$ m (lunghezza approssimata della linea di calibrazione)
- $\lambda =$ lunghezza d'onda dello strumento EDM
- $\lambda/2 =$ unità di lunghezza dello strumento

$$\beta_0 = \frac{d_0 - 6.5\lambda}{15} \quad .$$

$\beta = \mu \cdot \lambda/2$ (β approssimato per difetto ad un multiplo dell'unità di lunghezza dello strumento mentre μ è un numero intero)

$$\gamma = \lambda/72 = 6\text{m} / 72 = 0.08333 \text{ m}$$

Le sei distanze dall'intera lunghezza d vengono calcolate nel seguente modo:

$$d_1 = \lambda + \beta + 3\gamma$$

$$d_2 = \lambda + 3\beta + 7\gamma$$

$$d_3 = \lambda + 5\beta + 11\gamma$$

$$d_4 = \lambda + 4\beta + 9\gamma$$

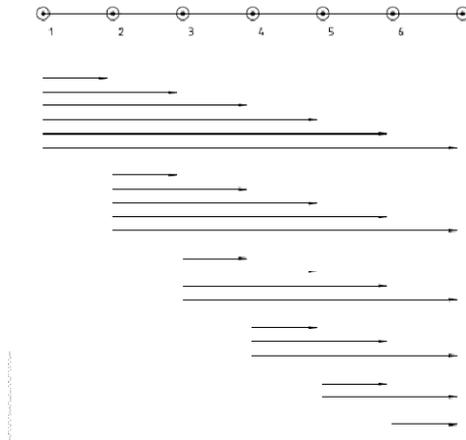
$$d_5 = \lambda + 2\beta + 5\gamma$$

$$d_6 = \lambda + \gamma$$

$$d = 6\lambda + 15\beta + 36\gamma$$

3.1.4.2 Misure

Devono essere misurate nello stesso giorno tutte le possibili 21 distanze tra i sette punti, come si può vedere in figura.



Utilizzando la centratura forzata vengono eliminati gli errori di centratura. La misurazione delle distanze deve essere iniziata solo quando la visibilità è buona ed è prevedibile una bassa insolazione .

La temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la pressione devono essere misurate in continuo per garantire affidabili correzioni atmosferiche.

3.1.4.3 Calcolo della costante additiva

Le misure $\tilde{x}_{p,q}$ (distanze grezze) lette sullo strumento EDM devono essere corretta per gli effetti sistematici (correzione atmosferica, riduzione all'orizzontale ed allineamento delle misure sulla retta passante dalla prima all'ultima stazione) ottenendo così i corretti valori $x_{p,q}$ da utilizzare nei calcoli. I parametri sconosciuti sono le sei vere distanze $\bar{x}_{1,2} \bar{x}_{2,3} \dots \bar{x}_{6,7}$ e la correzione del punto zero δ .

I risultati derivano da:

$$a_p = \sum_{q=1}^{7-p} x_{q,p+q} - \sum_{q=1}^p x_{q,7-p+q} ; \quad p = 4, 5, 6$$

$$b_p = \sum_{q=p+1}^7 x_{p,q} - \sum_{q=1}^{p-1} x_{q,p} ; \quad p = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.$$

La correzione del punto zero è data da:

$$\delta = \frac{1}{35} \sum_{p=4}^6 (2p - 7) \cdot a_p$$

mentre i residui $r_{p,q}$ delle 21 misure di distanze $x_{p,q}$ corrette dagli effetti sistematici sono dati da:

$$r_{p,q} = b_p - b_q - \frac{7 + 2(p - q)}{7} \cdot \delta - x_{p,q}; p = 1, \dots, 7; \quad q = p + 1, \dots, 7$$

Ora se calcolo la somma dei quadrati di tutti i residui $\sum r^2$ ed i gradi di libertà ν :

$$\sum r^2 = \sum_{p=1}^6 \sum_{q=p+1}^7 r_{p,q}^2 = r_{1,2}^2 + r_{1,3}^2 \dots + r_{6,7}^2$$

$$\nu = n - u$$

con:

n = numero di misure (=21)

u = numero di incognite ($6 + 1 = 7$),

posso calcolarmi la deviazione standard sperimentale di una singola misura di distanza:

$$s = \sqrt{\frac{\sum r^2}{v}} = \sqrt{\frac{\sum r^2}{14}} ; \quad s_{ISO-EDM} = s.$$

Mentre la deviazione standard sperimentale della correzione del punto zero è data da:

$$s_{\delta} = s \times \frac{1}{\sqrt{5}} = s \times 0.45 .$$

3.2 PROGETTO FISICO DI UNA LINEA DI CALIBRAZIONE

Un sito ideale per il progetto di una baseline dovrebbe avere le seguenti proprietà:

1. lunghezza richiesta
2. superficie del terreno orizzontale (o leggermente concava)
3. equa irradiazione solare sull'intera linea
4. vegetazione piatta con basse crescite(es. prateria)
5. limitato o vietato accesso al pubblico(per evitare atti di vandalismo)
6. substrato roccioso non troppo al di sotto della superficie del terreno
7. facile accesso
8. strada di accesso lungo la baseline (per accelerare il trasporto del riflettore e degli strumenti tra le stazioni)
9. orientamento Nord-Sud (per permettere la misura con e contro sole)

Se la baseline deve essere usata solo per la calibrazione di uno specifico strumento, deve essere lunga come la massima distanza che normalmente si usa nella pratica.

I pilastri di cemento hanno molti vantaggi rispetto a materializzazioni sul terreno e di conseguenza sono usati se è richiesta un'alta precisione. I vantaggi dei pilastri sono i seguenti:

1. stabilità durante le misure,
2. nessun pericolo di movimento quando si scambiano i riflettori o strumenti pesanti,
3. veloce sistemazione degli strumenti e dei riflettori grazie al centramento forzato ed alla piastra d'appoggio dello strumento già livellata,
4. centratura precisa di 0.1 mm o meno,
5. altezza costante dello strumento e del riflettore.

Comunque i pilastri possono subire movimenti nell'arco della giornata a causa del cambio di esposizione solare (0.6-1mm), quindi conviene proteggere i pilastri dal sole diretto.

I pilastri possono anche subire movimenti nel lungo periodo causati da cedimenti del terreno a causa del peso proprio, scivolamenti nei terreni pendenti, rigonfiamenti e restringimenti di terreni coesivi a causa dell'acqua ecc.

3.3 ESECUZIONE DELLE MISURE

In questo paragrafo sono elencate le operazioni di misura sulla baseline per la calibrazione di strumenti EDM. Sono richieste elaborate procedure di misura durante la calibrazione di precisione o di alta precisione dei distanziometri.

1. La sequenza delle osservazioni deve essere scelta in modo tale che le linee più corte sono misurate prima e dopo quelle più lunghe. (per esempio le 21 combinazioni di misura su una baseline con 7 stazioni devono essere misurate nel seguente modo: 6→7, 5→7, 5→6, 4→6, 4→5, 4→7, 3→7, 3→6,....., 1→5, 1→4, 1→3, 1→2.
2. Lo strumento EDM deve essere coperto con un ombrello.
3. La temperatura e la pressione devono essere misurate (all'ombra) dove viene posizionato lo strumento all'inizio delle operazioni di misura sulla baseline, poi vengono rimisurati a intervalli di mezz'ora e ad ogni cambiamento delle condizioni meteorologiche.

4. Nella prima stazione in cui viene posizionato lo strumento EDM viene impostato e tenuto all'ombra almeno 15 minuti prima della misurazione della prima linea sulla baseline.
5. Per ogni linea, vengono ripetute quattro misurazioni di distanza,.
6. Se è possibile, tutte le distanze vengono misurate con un unico prisma.
7. Tra la prima e l'ultima misurazione sulla baseline, lo strumento EDM dovrebbero essere tenuti all'aperto e all'ombra.
8. Lo strumento EDM dovrebbe essere gestito in base alle istruzioni della casa produttrice e/o secondo le procedure di misurazione seguite durante rilievi.
9. Lo strumento EDM deve essere sempre mantenuto acceso.
10. Sulle baselines con pilastri, l'altezza del riflettore e l'altezza del teodolite sopra la piastra inferiore del basamento usato, devono essere misurate in millimetri, prima e dopo le misurazioni sulla baseline.
11. Ogni volta che vengono utilizzate livelle con bolla ai fini del livellamento,
la corretta posizione dello strumento deve essere controllata, prima di iniziare la prima misura sulla baseline ed anche dopo la misurazione di tutte le distanze sulla baseline.
12. La temperatura deve essere misurata all'altezza dello strumento ed all'ombra con un termometro di mercurio di buona qualità. L'errore del termometro usato non deve essere superiore di $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$.
13. La pressione deve essere misurata con un barometro orizzontale ed all'ombra.
14. Le misure sulla baseline devono essere effettuate completamente durante il giorno o completamente durante la notte.

3.4 ELABORAZIONE DEI DATI

3.4.1 Preprocessamento

Le misure di distanze lette sullo strumento EDM (distanze grezze) devono essere corrette per gli effetti sistematici, cioè si deve effettuare la correzione atmosferica, la riduzione all'orizzontale ed l'allineamento delle misure sulla retta passante dalla prima all'ultima stazione.

3.4.1.1 Calcolo del valor medio delle distanze ed applicazione agli angoli misurati della regola di Bessel.

Per ogni distanza sono state effettuate 4 misurazioni di angoli e distanze in posizione diretta e coniugata. Per quanto riguarda le misure delle distanze, inizialmente è stata effettuata una media aritmetica dei valori rilevati, mentre per le misure angolari è stata effettuata una media dei valori relativi alle letture in posizione diretta e coniugata, ed è stata applicata la regola di Bessel. Si può infatti dimostrare che alcuni errori sistematici sull'angolo azimutale, in particolare i seguenti:

- errore residuo di inclinazione
- errore residuo di collimazione
- errore di eccentricità del cannocchiale

si manifestano con lo stesso valore ma con segno opposto nella posizione diritta e in quella capovolta. Quindi, se si esegue la media delle due letture “coniugate” un errore positivo si somma a un uguale errore negativo per cui complessivamente l'errore si elide. La media va effettuata tenendo conto che le due letture coniugate differiscono di un angolo piatto, in quanto l'alidada viene ruotata di 180° tra l'una e l'altra. Traducendo quindi la regola di Bessel in formula si ha:

$$l_m = \frac{l^{C.S.} + (l^{C.D.} \pm 200^g)}{2}$$

N. B. : il segno dentro la parentesi va assunto positivo se $l^{C.D.} < 200^g$ negativo se $l^{C.D.} > 200^g$.

L'angolo zenitale si calcola facendo la media della lettura cerchio a sinistra e del complemento all'angolo giro della lettura cerchio a destra.

Il valore così calcolato è esente dallo zenit strumentale:

$$\varphi = \frac{l_s + (400^g - l_d)}{2}$$

in modo da eliminare, applicando la regola di Bessel, gli errori residui costruttivi delle stazioni totali (eccentricità dell'alidada e dell'asse di collimazione ed inclinazione dell'asse di rotazione del cannocchiale).

Inoltre è stata registrata, sui fogli di campagna, l'ora di acquisizione dei dati misurati in modo da poter risalire, in fase di preprocessamento dei dati, agli effettivi valori dei parametri atmosferici al momento delle misure.

3.4.1.2 Riduzione orizzontale delle distanze inclinate ed allineamento.

Poiché tutte le distanze misurate in loco sono distanze inclinate, occorre riportare tutte queste distanze sull'orizzontale tramite la seguente relazione:

$$d_{Orizzontale} = d_{Inclinata} \cdot \sin \varphi$$

Dove φ è l'angolo zenitale relativo alla distanza misurata (Fig.1)

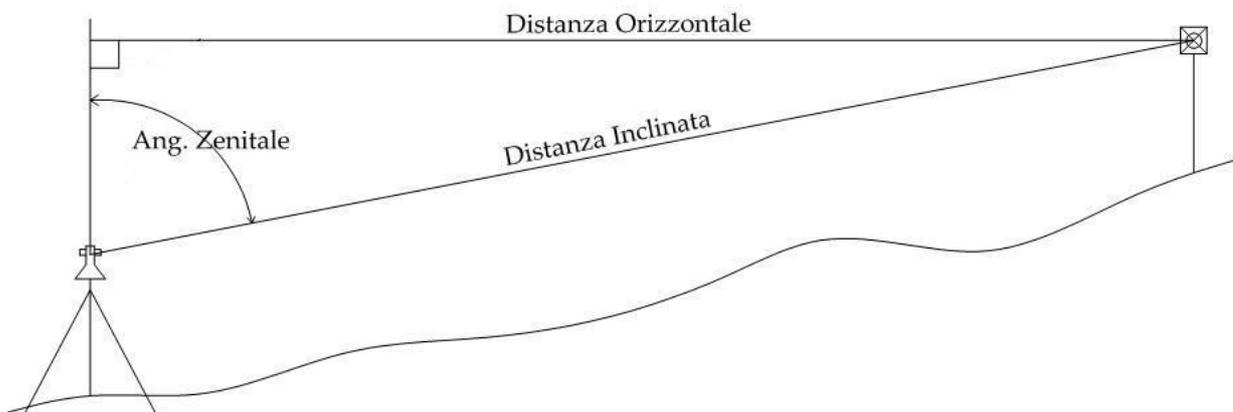


Fig.1 Riduzione orizzontale delle distanze rilevate.

Inoltre le linee devono essere corrette (tramite relazioni geometriche) per qualsiasi eccentricità che possono avere i loro rispettivi terminali dalla linea retta passante per la prima e l'ultima stazione.

3.4.1.3 CORREZIONE ATMOSFERICA: METODO DI CIDDOR PER IL CALCOLO DELL'INDICE DI RIFRAZIONE DELL'ARIA MISTA.

La metodologia proposta da Ciddor può essere applicata per qualunque condizione atmosferica (temperatura tra -40°C e $+100^{\circ}\text{C}$, pressione tra 80 e 120kPa, umidità relativa tra 0 e 100%) e per lunghezze d'onda comprese tra 350 e 1300 nm.

Il metodo può essere sintetizzato nei seguenti passi principali:

- 1) Calcolo della RIFRATTIVITA'¹ di ogni componente dell'aria mista (aria secca e vapore acqueo) in condizioni atmosferiche standard.

¹ La Rifrattività è per definizione pari a:
 $R = (n - 1)$ dove n è l'indice di rifrazione
 La Rifrattività specifica è invece pari a:

Ciddor fornisce le equazioni per il calcolo di:

- $(n_{as}-1)^2$ rifrattività aria secca in condizioni standard,
- $(n_{ws}-1)$ rifrattività del vapore acqueo puro (water vapor) in condizioni standard.

2) Calcolo della DENSITA' RELATIVA di ogni componente rispetto alla densità nelle condizioni standard

Ciddor fornisce una formula per il calcolo della densità dell'aria in determinate condizioni meteorologiche.

Tramite questa formula potremo calcolare:

ρ_a densità dell'aria secca nelle condizioni atmosferiche reali

ρ_w densità del vapore acqueo nelle condizioni atmosferiche reali

ρ_{as} densità dell'aria secca nelle condizioni atmosferiche standard

ρ_{ws} densità del vapore acqueo nelle condizioni atmosferiche standard

Da tali valori è possibile ottenere le densità relative:

$$\frac{\rho_a}{\rho_{as}} \text{ e } \frac{\rho_w}{\rho_{ws}}$$

3) Calcolo della rifrattività totale come combinazione (per somma o tramite la relazione di Lorentz- Lorenz) delle rifrattività parziali.

4) Calcolo dell'indice di rifrazione di gruppo.

$r = \frac{n-1}{d}$ dove d è la densità

² $(n_{as}-1)$ nel caso di una concentrazione di CO₂ diversa da 450ppm

PASSO 1 – CALCOLO DELLA RIFRATTIVITA’

ARIA SECCA

CONDIZIONI STANDARD

Temperatura 15 °C

Pressione 101.325 KPa (pressione atmosferica sul livello del mare)

Umidità 0%

450 ppm CO₂

$$10^8(n_{as} - 1) = \frac{k_1}{(k_0 - \sigma^2)} + \frac{k_3}{(k_2 - \sigma^2)} \quad (1)$$

Dove σ è il reciproco della lunghezza d’onda nel vuoto:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda_{vac}}$$

e i k_i sono coefficienti che verranno definiti in appendice 1.

Nel caso si abbia una concentrazione di CO₂ diversa da 450 ppm, si può calcolare la rifrattività dell’aria secca a partire dal valore desunto con la (1), tramite la formula:

$$(n_{axs} - 1) = (n_{as} - 1)[1 + 0.534 * 10^{-6}(x_c - 450)] \quad (2)$$

Dove x_c è la concentrazione effettiva di CO₂ in ppm.

VAPORE ACQUEO PURO

CONDIZIONI STANDARD

Temperatura 20°C

Pressione 1333Pa

Umidità 100%

$$10^8(n_{ws} - 1) = cf(w_0 + w_1\sigma^2 + w_2\sigma^4 + w_3\sigma^6) \quad (3)^3$$

Dove $cf = 1.022$ è un fattore di correzione utilizzato per adattare i valori calcolati con la (19) ai valori desunti per via sperimentale, e i w_i sono coefficienti che verranno definiti in appendice 2.

PASSO 2 – CALCOLO DELLA DENSITA' RELATIVA

Per la densità dell'aria mista, Ciddor propone l'equazione BIPM:

$$\rho = \left(\frac{pM_a}{ZRT}\right) \left[1 - x_w \left(1 - \frac{M_w}{M_a}\right)\right] \quad (4)$$

dove:

p = pressione totale (Pa)

$M_a = 10^{-3}[28.9635 + 12.011 * 10^{-6}(x_c - 400)]$ è la massa molare dell'aria secca (in kg/mol) contenente x_c ppm di CO_2

$M_w = 0.018015$ kg/mol è la massa molare del vapore d'acqua

T è la temperatura in gradi Kelvin

$R = 8.314510$ ($Jmol^{-1}K^{-1}$) è la costante dei gas

x_w è la frazione molare del vapore acqueo nell'aria mista

Z è la compressibilità dell'aria mista calcolabile come vedremo in appendice.

Dalla relazione (4) è possibile ottenere le densità delle componenti dell'aria nelle diverse condizioni.

Per la determinazione di ρ_{as} si adotteranno i valori dell'aria secca standard: temperatura 15 °C,

pressione 101.325 KPa, $x_w = 0$ e x_c pari al valore reale dei ppm.

³ Le relazioni 1,2 e 3 sono delle relazioni di dispersione in quanto esprimono la relazione esistente tra velocità di propagazione (tramite n) e lunghezza d'onda (tramite σ).

Per la determinazione di ρ_{ws} si adotteranno i valori del vapore acqueo puro: temperatura 20°C, pressione 1333Pa, $x_w = 1$.

Per i valori di ρ_a e ρ_w si adotteranno invece i dati atmosferici reali.

PASSO 3 - CALCOLO DELLA RIFRATTIVITA' DELL'ARIA MISTA (CALCOLO DELLA RIFRATTIVITA' TOTALE)

Questo calcolo può essere fatto secondo due metodi che possono ritenersi equivalenti nei risultati.

METODO 1 – SOMMA

$$n_{prop} - 1 = \left(\frac{\rho_a}{\rho_{axs}} \right) (n_{axs} - 1) + \left(\frac{\rho_w}{\rho_{ws}} \right) (n_{ws} - 1) \quad (5)$$

METODO 2 – RELAZIONE DI LORENTZ-LORENZ

$$L_i = \frac{(n_{is}^2 - 1)}{(n_{is}^2 + 2)} \quad (6)$$

dove $i = a$ (dry air), w (water vapor)

$$L = \left(\frac{\rho_a}{\rho_{axs}} \right) L_a + \left(\frac{\rho_w}{\rho_{ws}} \right) L_w \quad (7)$$

e

$$n_{LL} = \left[\frac{(1 + 2L)}{(1 - L)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

PASSO 4 – CALCOLO DELL'INDICE DI RIFRAZIONE DI GRUPPO

La trattazione condotta fino ad ora ha portato alla definizione di una metodologia per il calcolo dell'indice di rifrazione di fase.

Quando si ha a che fare con onde modulate (come avviene nei distanziometri ad onde) è necessario tenere conto del fenomeno della dispersione e cioè del fatto che le componenti del segnale modulato, avendo differenti lunghezze d'onda, hanno anche una diversa velocità di propagazione nell'atmosfera. E' necessario quindi calcolare un indice di rifrazione di gruppo.

La relazione tra indice di rifrazione di gruppo e indice di rifrazione di fase può essere espressa con la formula:

$$n_g = n + \sigma \frac{dn}{d\sigma}$$

Derivando quindi la (8) per L , la (7) per n_i e la (6) per σ , si ottiene la seguente equazione per l'indice di rifrazione di gruppo:

$$n_g = n + \sigma \left[\frac{(n^2 + 2)^2}{n} \right] \sum_i \left[\frac{n_{is}}{(n_{is}^2 + 2)^2} \right] \times \left(\frac{\rho_i}{\rho_{si}} \right) \left(\frac{dn_{is}}{d\sigma} \right) \quad (9)$$

dove $i = a$ (dry air), w (water vapor) e dove le derivate sono definite in appendice 4.

Applicazione della prima correzione di velocità sulla distanza misurata con il metodo di Ciddor

Per quanto previsto da Rueger, la distanza corretta può essere calcolata come:

$$d = d' + K'$$

dove d è la distanza corretta e d' è la distanza misurata.

Nel caso di Ciddor n_{ref} e n sono gli indici di rifrazione di gruppo per le condizioni standard dello strumento e per le condizioni atmosferiche reale all'atto delle misure. Anche in questo caso il calcolo dei ppm deve essere fatto ad entrambi gli estremi della distanza osservata: si applica poi il valore medio delle correzioni calcolate.

Seconda correzione di velocità sulla distanza misurata

Con questa correzione si tiene conto del fatto che per effetto della rifrazione atmosferica il percorso del segnale non è lineare ma tende ad incurvarsi con la concavità della curva ricolta verso il basso.

Per modellizzare la traiettoria del segnale ipotizziamo che si tratti di un arco di circonferenza. In questo caso, la seconda correzione di velocità può essere scritta come:

$$K'' = -(k - k^2) \frac{d^3}{12R^2}$$

Dove:

- k è il coefficiente di rifrazione⁴ (determinabile per via sperimentale tramite le misure di livellazione trigonometrica reciproche e contemporanee)
- R è il raggio della sfera locale

⁴ Il coefficiente di rifrazione è definito dalla relazione:

$$k = \frac{R}{r}$$

Dove r , raggio di curvatura della traiettoria del segnale è legato all'indice di rifrazione tramite:

$$\frac{1}{r} = -\sin z \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{dn}{dh} \right)$$

Dove $\frac{dn}{dh}$ è il gradiente verticale dell'indice di rifrazione dell'aria

z angolo tra la direzione del gradiente verticale e la tangente alla traiettoria del segnale (angolo zenitale non corretto per la rifrazione).

Complessivamente quindi al distanza corretta è ottenibile come:

$$d = d' + K' + K''$$

APPENDICE 1 - VALORI k_i PER LA DISPERSIONE DELL'ARIA SECCA IN CONDIZIONI STANDARD (EQUAZIONE 3)

$$k_0 = 238.0185 \mu\text{m}^{-2} \quad k_1 = 5792105 \mu\text{m}^{-2}$$

$$k_2 = 57.362 \mu\text{m}^{-2} \quad k_3 = 167917 \mu\text{m}^{-2}$$

APPENDICE 2-VALORI w_i PER LA DISPERSIONE DEL VAPORE ACQUEO IN CONDIZIONI STANDARD (EQUAZIONE 5)

$$w_0 = 295.235 \quad w_1 = 2.6422 \mu\text{m}^2$$

$$w_2 = -0.032380 \mu\text{m}^4 \quad w_3 = 0.004028 \mu\text{m}^6$$

APPENDICE 3 - VALORI EMPIRICI E FORMULE USATE PER IL CALCOLO DELLA DENSITA' (EQUAZIONE 4)

$$x_w = f \cdot h \frac{svp}{p} \quad \text{frazione molare del vapore acqueo nell'aria mista}$$

dove h è l'umidità relativa in forma frazionale (tra 0 e 1) ottenibile in genere da misure igrometriche

$$h = \frac{p_w}{svp}$$

f è fattore di accrescimento del vapore acqueo in aria

$$f = \alpha + \beta p + \gamma t^2$$

dove

$$\alpha = 1.00062 \quad \beta = 3.14 \times 10^{-8} \quad (\text{Pa}^{-1})$$

$$\gamma = 5.6 \times 10^{-7} \quad (^\circ\text{C}^{-2})$$

$$t = T - 273.15 \text{ (temperatura in } ^\circ\text{C)}$$

svp è la tensione di vapore saturo del vapore acqueo su acqua (sul ghiaccio è diversa)

$$svp = \exp\left(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T}\right) \text{ (in Pa)}$$

dove

$$A = 1.2378847 \times 10^{-5} \quad (K^{-2})$$

$$B = -1.9121316 \times 10^{-2} \quad (K^{-1})$$

$$C = 33.93711047$$

$$D = -6.3431645 \times 10^3 \quad (K)$$

Inoltre il fattore di compressibilità dell'aria Z è dato dalla relazione:

$$Z = 1 - \left(\frac{p}{T}\right) [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_w + (c_0 + c_1 t)x_w^2] \\ + \left(\frac{p}{T}\right)^2 (d + ex_w^2)$$

dove:

$$a_0 = 1.58123 \times 10^{-6} \quad KPa^{-1} \quad a_1 = -2.9331 \times 10^{-8} \quad Pa^{-1}$$

$$a_2 = 1.1043 \times 10^{-10} \quad K^{-1} Pa^{-1}$$

$$b_0 = 5.707 \times 10^{-6} \quad KPa^{-1} \quad b_1 = -2.051 \times 10^{-8} \quad Pa^{-1}$$

$$c_0 = 1.9898 \times 10^{-4} \quad KPa^{-1} \quad c_1 = -2.376 \times 10^{-6} \quad Pa^{-1}$$

$$d = 1.83 \times 10^{-11} \quad K^2 Pa^{-2} \quad e = -0.765 \times 10^{-8} \quad K^2 Pa^{-2}$$

APPENDICE 4 – DERIVATE PER IL CALCOLO DELL'INDICE DI RIFRAZIONE DI GRUPPO

Derivando la (3) in funzione di σ si ottiene:

$$10^8 \frac{dn_{as}}{d\sigma} = 2\sigma \frac{k_1}{(k_0 - \sigma^2)^2} + 2\sigma \frac{k_3}{(k_2 - \sigma^2)^2} \quad (4 - 1)$$

Dove i valori di k_i sono dati in appendice 1⁵.

Invece derivando la (5) in funzione di σ si ottiene:

$$10^8 \frac{dn_{ws}}{d\sigma} = 2cf(w_1\sigma + 2w_2\sigma^3 + 3w_3\sigma^5) \quad (4 - 2)$$

Dove i valori di w_i sono dati in appendice 1.

APPENDICE 5 - EQUAZIONI DI BARRELL & SEARS⁶

CASO 1 – EQUAZIONE PER ARIA SECCA SENZA CO₂

$$(n_{t,p} - 1) = \left[A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \right] \frac{p\{1 + \beta_t p\}}{1 + \alpha t} \quad (5 - 1)$$

dove

λ = lunghezza d'onda nel vuoto in micron

t è la temperatura in celsius (°C)

p è la pressione in mm di Hg

$\alpha = 0.003661$ costante teorica di espansione di un gas perfetto

$$\beta_t = a - bt$$

dove

$$a = 1.049 \times 10^{-6}$$

$$b = 0.0157 \times 10^{-6}$$

$$K = \left[A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \right]$$

con

$$A = 0.378065 \times 10^{-6}, B = 2.14098 \times 10^{-9} \text{ e } C = 17.936 \times 10^{-12}$$

Quindi in modo più esplicito l'equazione (5-1) può essere scritta come:

⁵ Nell'articolo di Ciddor a mio parere ci sono alcuni errori nella appendice B, relativamente al calcolo di questa derivata: viene indicato un segno meno (invece secondo me è +) e viene indicato un indice sbagliato relativamente al valore di k_0 (secondo me $k_0=b_1$)

⁶ Tratto da: H.Barrell, J.E.Sears, THE REFRACTION AND DISPERSION OF AIR FOR VISIBLE SPECTRUM, Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A 238, 1-64 (1939)

$$(n_{t,p} - 1)10^6 = \left[0.378065 + \frac{0.002141}{\lambda^2} + \frac{0.00001794}{\lambda^4} \right] \cdot \left\{ \frac{p[1 + (1.049 - 0.0157t)p10^{-6}]}{1 + 0.003661t} \right\} \quad (5-2)$$

Sulla base di quanto detto a pagina 9 dell'articolo questa relazione dovrebbe andare bene per ogni valore di temperatura e pressione atmosferica, ma solo nello spettro del visibile (λ tra 0.44 e 0.64 μm).

CASO 2 – EQUAZIONE PER ARIA MISTA E NORMALE

E' cioè il caso di aria atmosferica composta da aria secca, vapore acqueo e contenente 300 ppm di CO2.

INDICE DI RIFRAZIONE PER IL VAPORE ACQUEO

Come per l'aria secca l'indice di rifrazione per il vapore acqueo può essere definito con una relazione analoga alla (5-1):

$$(n'_{t,f} - 1) = \left[A' + \frac{B'}{\lambda^2} \right] \frac{f\{1 + \beta'_{t,f}\}}{1 + \alpha t} \quad (5-3)$$

Dove f è la pressione del vapore saturo

$$K' = \left[A' + \frac{B'}{\lambda^2} \right]$$

Dove $A' = 0.3159 \times 10^{-6}$ e $B' = 2.963 \times 10^{-9}$

L'equazione (5-3) si intende valida solo per condizioni climatiche temperate per cui la f è mediamente di 10 mm di Hg e raramente supera i

20 mm. Il termine che contiene $(1+\beta_t f)$ si può ritenere trascurabile nella maggior parte dei casi pratici.

Nel caso di aria secca con un contenuto di CO₂ pari allo 0.03% (ARIA SECCA NORMALE), si può definire un K_N :

$$K_N = 0.9997K + 0.0003K''$$

Dove:

$$K'' \times 10^6 = 0.5777 + 0.003697\lambda_N^{-2}$$

In cui si può ritenere che $\lambda_N = \lambda$.

L'indice di rifrazione per aria mista normale si può ritenere dato da:

$$(n_{t,p,f} - 1) = K_N \frac{(p - f)\{1 + \beta_t(p - f)\}}{1 + \alpha t} + K' \frac{f\{1 + \beta'_t f\}}{1 + \alpha t} \quad (5 - 4)$$

Dove

$\alpha = 0.003661$ coefficiente espansione dell'aria

$$\beta_t = a - bt \quad \text{con} \quad a = 1.049 \times 10^{-6} \quad \text{e} \quad b = 0.0157 \times 10^{-6}$$

$$\beta'_t = 27 \times 10^{-6} \quad (\text{per } t=20^\circ\text{C})$$

Dopo una serie di sostituzioni e semplificazioni si ottiene:

$$(n_{t,p,f} - 1)10^6 = \left[0.378125 + \frac{0.0021414}{\lambda^2} + \frac{0.00001793}{\lambda^4} \right] \times \frac{p\{1 + (1.049 - 0.0157t)p10^{-6}\}}{1 + 0.003661t} - \left[0.0624 - \frac{0.000680}{\lambda^2} \right] \frac{f}{1 + 0.003661t} \quad (5 - 5)$$

Tale equazione può essere applicata per temperature tra 10-30°C e pressioni p comprese tra 720-800mm di Hg.

3.4.2 CALCOLO DEI PARAMETRI DI CALIBRAZIONE

3.4.2.1 Revisione delle opzioni di correzione della baseline

La scelta del modello di calcolo dei parametri di correzione dipende dalla disponibilità o meno della lunghezza “vera” delle distanze che costituiscono l’allineamento e dalla necessità di una correzione strumentale completa o parziale. Nel caso dello schema di Hobart è richiesta la conoscenza delle vere distanze.

Gli altri due schemi di allineamento (Heerbrugg e Aarau) permettono la determinazione di molti coefficienti della correzione strumentale (IC) sia conoscendo le distanze e sia se non sono note a priori. Nella tabella 8 sono descritti le quattro opzioni di calcolo ai minimi quadrati per la determinazione delle correzioni strumentali.

	Baseline di lunghezza nota	Baseline di lunghezza non nota
Calcolo con calcolatrice tascabile	Metodo: regressione lineare (=correzione ai minimi quadrati) Incognite: - Costante additiva - Correzione di scala	Metodo: correzione ai minimi quadrati (pesi uguali per tutte le osservazioni) Incognite: - Costante additiva - (N-1) distanze sulla baseline (N=numero di stazioni sulla baseline)
Calcolo mediante PC	Metodo: correzione ai minimi quadrati con corretto peso delle	Metodo: correzione ai minimi quadrati con corretto peso delle osservazioni

	osservazioni	Incognite:
	Incognite: - Costante additiva - Correzione di scala - Correzione dello short periodic error - Altri parametri	- Costante additiva - (N-1) distanze sulla baseline - Correzione dello short periodic error - Altri parametri

Tab.8 Quattro maggiori opzioni di regolazione ai minimi quadrati per la determinazione delle correzioni strumentali.

Le soluzioni per baseline con distanze non note sono possibili solo se si possono effettuare misure di distanze in tutte (o per la maggior parte) le combinazioni. Questo caso si riferisce agli schemi di progettazione di baseline di Heerbrugg e di Aarau.

I residui e le deviazioni standard di tutti i coefficienti delle correzioni strumentali da determinare possono essere calcolati in entrambi i casi descritti nella tabella 8. Nel caso della soluzioni chiusa mediante calcolatrice tascabile, i residui dovrebbero essere plottati in funzione della distanza ed anche in funzione dell'unità di lunghezza per verificare l'errore ciclico (errore non lineare dipendente dalla distanza). Entrambi i plottaggi di residui sono raccomandati quando si usa la generale soluzione ai minimi quadrati. Nella soluzione generale ai minimi quadrati, vengono inizialmente calcolati molti coefficienti della correzione strumentale (IC). Dopo aver testato il significato statistico dei coefficienti, viene ripetuta la correzione ai minimi quadrati solo per i termini significanti.

Nei prossimi paragrafi verranno descritti dettagliatamente le soluzioni chiuse che consentono l'uso di semplici calcolatrici tascabili. Questi due metodi sono stati usati anche in accordo con la norma ISO per i test di calibrazione oggetto del presente studio.

3.4.2.2 Determinazione della costante additiva e della correzione di scala su baseline con lunghezze note.

La soluzione mediante regressione lineare può essere usata per calcolare la costante additiva e la correzione di scala sulle misure effettuate su un qualsiasi schema di progetto di allineamento ogni volta che sono note le “vere” distanze sulla baseline.

Posti : y = distanza misurata
e x = “vera distanza”

l'equazione della regressione lineare per la distanza è data da:

$$\hat{y} = a + bx \quad (3.2)$$

dove \hat{y} = stima di y per ottenere x .

Le soluzioni chiuse ai minimi quadrati per i parametri incogniti a e b sono le seguenti:

$$a = \frac{(\sum x^2)(\sum y) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (3.3)$$

$$b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (3.4)$$

$$s_0^2 = \frac{(\sum a + bx - y)^2}{n - 2} \quad (3.5)$$

$$s_a = s_0 \sqrt{\frac{(\sum x^2)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}} \quad (3.6)$$

$$S_b = \frac{s_0}{\sqrt{(\sum x^2) - (\sum x)^2/n}} \quad (3.7)$$

Per arrivare alle correzioni strumentali IC, nell'Eq (3.2) viene calcolata la x:

$$x = -a/b + \left(\frac{1}{b}\right) \hat{y} \quad (3.8)$$

Il primo ed il secondo parametro rappresentano rispettivamente la costante additiva e la correzione di scala.

Il seguente esempio mostra gli steps da seguire per un distanziometro da calibrare su una baseline composta da 7 stazioni. Si avranno a disposizione 21 misurazioni di distanza e le 21 rispettive “vere” distanze come si può vedere nella figura 9.

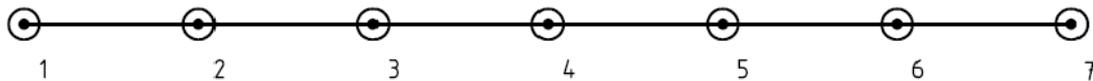


Fig.9 Schema di un allineamento ipotetico di Aurauco costituito da 7 stazioni

Nella tabella 10 sono elencate le corrispondenti coppie di dati x ed y.

Linea	y(m)	x(m)	linea	y(m)	x(m)
12	30.0235	30.0191	67	50.0094	50.0022
23	69.9931	69.9882	34	79.9959	79.9913
13	100.0121	100.0073	45	120.0060	119.9985
24	149.9844	149.9795	46	170.0124	170.0029
14	180.0029	179.9986	35	199.9959	199.9898
57	220.0147	220.0051	25	269.9823	269.9780
46	290.0109	290.0014	15	300.0033	299.9971
47	340.0031	340.0036	36	369.9978	369.9927
37	420.0031	419.9949	26	439.9865	439.9809
16	470.0070	470.000	27	489.9883	489.9831

17	520.0098	520.0022
----	----------	----------

Tab.10 Coppie di misure e vere distanze ottenuti sullo schema di Aaurau per la calibrazione di EDM su baseline.

Applicando ai dati sperimentali della tabella 10 le formule dalla (3.3) alla (3.8), si ottiene:

$$\hat{y} = +0.0057m + 1.00000218x$$

$$x = -5.7mm + 0.99999728\hat{y}$$

$$IC = -5.7mm - 2.18(D/1000)$$

Dove:

- D = distanza (in m)
- IC = Instrumental correction (in mm)

Infine vengono calcolate le seguenti deviazioni standard:

$S_0 = \pm 1.8 \text{ mm}$ =deviazione standard di una misura di distanza

$S_b = \pm 2.6 \text{ ppm}$ =deviazione standard della correzione di scala

$S_a = \pm 0.8 \text{ mm}$ =deviazione standard della costante additiva

Poiché i dati sono stati ottenuti mediante schema di Aarau per la calibrazione di strumenti EDM su vaseline (tutte le distanze sono multiple di 10 m), lo short periodic errors deve essere calcolato separatamente e la costante additiva deve essere corretta di conseguenza.

3.4.2.3 Determinazione della costante additiva e della lunghezza della baseline incognita

E' possibile ottenere le soluzioni ai minimi quadrati per la costante additiva e per le distanze incognite dell'allineamento in tutte le combinazioni. In seguito verrà descritta ed utilizzata la soluzione di Halmos e Kadar (1972), che fornisce la costante additiva e la lunghezza tra la prima ed ogni altra stazione. Questo metodo è applicabile anche con calcolatrici tascabili.

La soluzione di Halmos e Kadar viene presentata inizialmente per una baseline formata da 5 stazioni.

La costante additiva (indicata con c) e le 4 distanze incognite sulla baseline vengono calcolate come:

$$c = -1/10[3(S_{12} + S_{23} + S_{34} + S_{45} - S_{15}) + (S_{13} + S_{35} - S_{25} + S_{24} - S_{14})]$$

Dove S_{ij} = distanze osservate (strumento EDM) dal punto i al punto j .

$$\bar{S}_{12} = 1/5[2c + 2S_{12} + (S_{13} - S_{23} + S_{14} - S_{24} + S_{15} - S_{25})]$$

$$\bar{S}_{13} = 1/5[4c + 2S_{13} + (S_{12} + S_{23} + S_{14} - S_{34} + S_{15} - S_{35})]$$

$$\bar{S}_{14} = 1/5[6c + 2S_{14} + (S_{12} + S_{24} + S_{13} + S_{34} + S_{15} - S_{45})]$$

$$\bar{S}_{15} = 1/5[8c + 2S_{15} + (S_{12} + S_{25} + S_{13} + S_{35} + S_{14} + S_{45})]$$

Dove \bar{S}_{ij} = valore corretto della distanza fra il punto iniziale ed il punto j della baseline.

I residui possono essere calcolati tramite la seguente relazione:

$$\bar{S}_{ij} = S_{ij} + c + v_{S_{ij}}$$

La deviazione standard delle distanze misurate è ottenuta dalla nota formula:

$$S_0 = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{n - u}}$$

Dove :

- n = numero di osservazioni
- u = numero di incognite
- u = N
-

$$n = \frac{N!}{2(N - 2)!}$$

Per un allineamento con N stazioni, la formula per la costante additiva c le (N-1) distanze incognite è data da:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{N} \left[2(j - 1)c + 2S_{ij} + \sum S_{ij} \right]$$

Dove $2 \leq j \leq N$

- \bar{S}_{ij} = valore corretto della distanza fra il punto iniziale ed il j-esimo punto
- S_{ij} = valori di distanza misurati fra il punto iniziale ed il j-esimo punto
- N = numero di stazioni della baseline

e dove $\sum S_{ij}$ è determinate nel seguente modo:

$$\sum S_{ij} = \sum_{k=2}^N (S_{1k} + S_{kj}) \quad k \neq j$$

Se $k > j$, si sostituisce S_{kj} con $(-S_{kj})$,

dove:

- S_{1k} = distanza misurata tra il primo ed il k-esimo punto
- S_{kj} = distanza misurata tra il k-esimo ed il j-esimo punto.

$$c = - \frac{\sum_{i=1}^m (N - 2i)\Delta_i}{N(N - 1)(N - 2)/6}$$

dove:

- $m = (N-2)/2$ per numero pari di stazioni (N)
- $m = (N-1)/2$ per numero dispari di stazioni (N)

e dove gli errori di chiusura della poligonale sono indicati con Δ_i . Per chiarire più facilmente il significato delle Δ_i si riporta l'esempio nel caso di allineamento costituito da 7 stazioni:

$$c = -1/35[5(S_{12} + S_{23} + S_{34} + S_{45} + S_{56} + S_{67} - S_{17}) \\ + 3(S_{13} + S_{35} + S_{57} - S_{27} + S_{24} + S_{46} - S_{16}) \\ + (S_{14} + S_{47} - S_{37} + S_{36} - S_{26} + S_{25} - S_{15})]$$

La soluzione chiusa per la deviazione standard della costante additiva (S_c) e la corretta lunghezza della baseline (s_{1j}) sono date da Pauli (1977) come:

$$s_c = s_0(Q_{cc})^{0.5}$$

$$s_{1j} = s_0(Q_{1j})^{0.5}$$

dove s_0 è stato precedentemente definito come:

$$s_0 = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-u}}$$

ed i cofattori Q sono definiti come:

$$Q_{cc} = \frac{6}{(N-1)(N-2)}$$

$$Q_{1j} = \frac{2}{N} \left\{ 1 + \frac{12(j-1)^2}{N(N-1)(N-2)} \right\}$$

con $j = 2, \dots, N$.

Sono inoltre elencati due cofattori addizionali (per distanze comprese fra due qualsiasi stazioni) anche se in generale non sono necessari:

$$Q_{ij} = \frac{1}{N} \left\{ 1 + \frac{24(i-1)(j-1)^2}{N(N-1)(N-2)} \right\}$$

per $i \neq j$; $j = 2, \dots, N-1$; $i = j + 1, \dots, N$

$$Q_{cj} = \frac{12(j-1)}{N(N-1)(N-2)}$$

con $j = 2, \dots, N$.

Occorre notare che, a meno della simbologia utilizzata, quello appena descritto è il metodo di calcolo indicato nella norma ISO 17123-4.

3.4.3 DETERMINAZIONE DELLA LUNGHEZZA DELLA BASELINE

La calibrazione di EDM su baselines di lunghezze note ha almeno due diversi vantaggi rispetto alle baseline con lunghezze incognite:

1. permette di determinare la correzione di scala assoluta del distanziometro (coefficiente A_{10} della correzione strumentale) ,
2. essi forniscono un numero più elevato di gradi di libertà nella compensazione ai minimi quadrati poichè le lunghezze dell'allineamento non devono essere calcolate.

Questo porta ad una maggiore accuratezza delle correzioni strumentali che ne derivano e permette di ottenere più parametri delle correzioni strumentali (IC); per esempio è improbabile che la soluzione del

polinomio di quinto grado (parametri A_{20} , A_{30} , A_{40} , A_{50}) sia ottenibile nel caso di baselines con distanze incognite.

Le “vere” distanze per un allineamento di calibrazione possono essere determinate anche in relazione alla precisione dell’EDM da calibrare con diversi metodi:

- nastro invar
- EDM di alta precisione
- interferometro multifrequenza

Il primo metodo non è più utilizzato anche se è stato usato con successo nel passato. Gli EDM ad alta precisione possono essere utilizzati in modalità assoluta o relativa. Gli interferometri multifrequenza possono misurare distanze di 100m direttamente con estrema precisione.

Il problema principale degli allineamenti con distanze note è di mantenere tali “vere” distanze invariate nel tempo, in particolare se una o più stazioni dimostra instabilità. Non sono rari movimenti dei pilastrini in calcestruzzo di 1 mm all’anno. E’ perciò consigliabile di selezionare il sito per le misurazioni con molta attenzione e ad analizzare tutti i dati ottenuti dalle misure di test con tutti e dei i metodi illustrati precedentemente, cioè con e senza le lunghezze note. Con corrette tecniche di analisi della deformazione si possono tracciare i movimenti delle stazioni fra diversi periodi di misura sulla base dei dati raccolti con normali strumenti EDM.

3.5 CALIBRAZIONE DEGLI ERRORI CICLICI

La calibrazione dell'errore ciclico mediante test specifici può essere ritenuta strettamente necessaria o supplementare a seconda del tipo di allineamento utilizzato per la calibrazione dello strumento al fine di depurare le misurazioni dagli errori dipendenti dalla distanza mediante la correzione strumentale (IC).

La determinazione degli errori ciclici è strettamente necessaria ogni volta che:

- le correzioni strumentali sono state determinate mediante un allineamento realizzato secondo lo schema di Aarau,
- le correzioni strumentali sono state determinate mediante schema di Heerbrugg o di Hobart, che non è stato progettato per l'unità di lunghezza del distanziometro in oggetto.

La realizzazione di test specifici può invece essere ritenuta supplementare qualora:

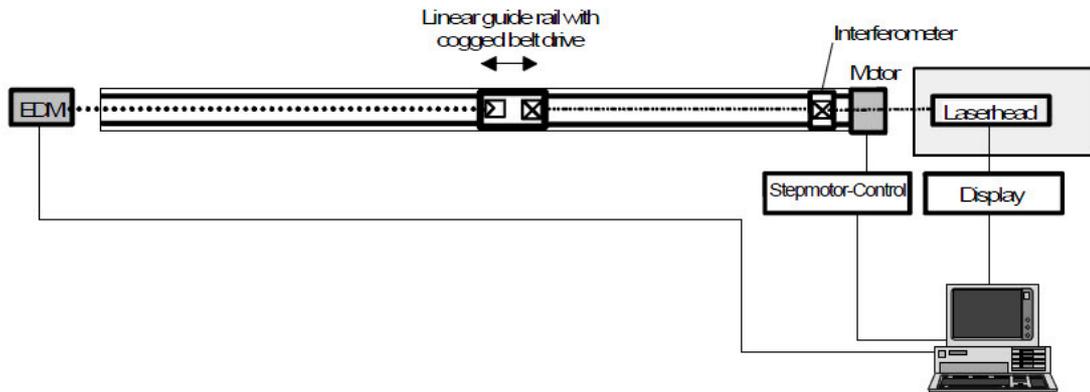
- deve essere stimato il cambiamento dell'errore ciclico con la distanza,
- l'accuratezza della stima dell'errore ciclico determinata con schema di Heerbrugg o di Hobart non è sufficiente.

3.5.1 PROGETTO E MISURE DI TEST DEGLI ERRORI CICLICI

Le metodologie più accurate per la determinazione degli errori ciclici degli EDM prevedono l'impiego di complessi sistemi realizzati in laboratorio.

Tali sistemi sono in genere realizzati con una rotaia, lunga alcune decine di metri sulla quale si fa scorrere lo specchio retroriflettente su distanze sottomultiple della unità di lunghezza dell'EDM da calibrare. Le distanze misurate con l'EDM vengono confrontate con distanze misurate con

elevate precisioni grazie all'impiego parallelo di interferometri. Un esempio schematico di questo tipo di sistema è riportato in figura.



Tali sistemi, caratterizzati da elevate prestazioni in termini di efficienza e accuratezza (gli interferometri consentono di raggiungere una precisione dell'ordine di 10^{-7}), sono tuttavia estremamente costosi e, dunque, non alla portata dei comuni utilizzatori di EDM.

Esistono però metodi, certamente meno precisi, ma più semplici ed economici da realizzare che consentono una valutazione degli errori ciclici degli EDM.

Il principio metodologico è comunque sempre quello di misurare delle distanze che siano frazione della unità di lunghezza e sulla base dei residui calcolati per confronto con distanze note a priori tramite sistemi di misura di precisione adeguata, stimare l'entità dell'errore ciclico.

Un esempio di un sistema di questo tipo è proposto dal Rueger (1985) e verrà di seguito descritto. Occorre precisare che il metodo descritto prevede l'utilizzo di un nastro graduato per la determinazione delle distanze note a priori. L'attuale disponibilità di EDM di elevata precisione potrebbe consentirne la sostituzione con evidente semplificazione delle procedure operative.

Lo schema generale per effettuare il test è raffigurato in Fig.9. Il muro deve essere piano, ma non necessariamente perfettamente orizzontale. Un

nastro d'acciaio di 30 m, di buona qualità viene sottoposto ad una tensione standard (di solito 5N) e fissato sulla sommità del muro. Generalmente lo strumento EDM viene posizionato a 50-100 m dal muro ed ad un'altezza che rende la linea di mira dello strumento parallela al nastro d'acciaio.

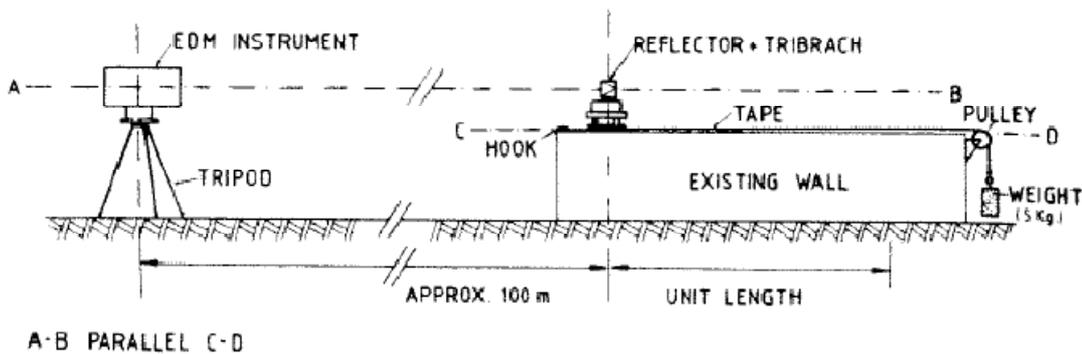


Fig.9 Sezione longitudinale di un test sull'errore ciclico.

Per testare uno strumento EDM con unità di lunghezza pari a 10 m, il riflettore viene posizionato ad intervalli successivi di 1 m dall'inizio del nastro e viene misurata la distanza dal riflettore in ciascuna di queste posizioni. Con questa procedura si ottengono 10 misure di distanza equamente spaziate sui 10 m di unità di lunghezza dello strumento.

Per una maggiore precisione il riflettore può essere spostato ad intervalli di 0.5m o 0.25m invece che di 1.0m. Un fattore molto importante è l'accuratezza con cui il riflettore montato sul basamento viene posizionato sul nastro, ed anche l'accuratezza della graduazione sul nastro.

Un elemento critico di questa procedura è il cambio della temperatura dell'aria; assumendo che il distanziometro sia ad una distanza di 100 m dal riflettore, un cambiamento di 10°C durante il test porterà ad una variazione della misura di distanza di 1 mm e quindi ad un errore di scala di 100 ppm sui 10 m. Se la temperatura cambia più di 5°C durante il test

su distanze maggiori di 100 m, le distanze devono essere corrette per depurare le osservazioni da questo tipo di errore.

Il test sull'errore ciclico può essere usato ad integrazione della calibrazione di EDM mediante la costruzione di un muro di lunghezza adeguata al di là di una della stazione terminale dell'allineamento. Questo poi permette la determinazione dell'errore ciclico per ogni stazione dell'allineamento.

3.5.2 DETERMINAZIONI SEMI-GRAFICA DELL'ERRORE CICLICO

Nella tabella 10 vengono riportati dei valori numerici esemplificativi delle misure eseguite durante un test per la determinazione dell'errore ciclico di un EDM con unità di lunghezza di 10 metri. Con s sono indicate le distanze misurate, con s^* le corrispondenti lunghezze riportate alla osservazione della prima posizione del riflettore.

La figura 11 rappresenta la funzione sinusoidale dell'errore ciclico ottenuta graficando le s^* in funzione della distanza misurata s .

La correzione dell'originale costante additiva d_c per un esatto multiplo della lunghezza d'onda (in questo caso 10m) è ottenuta mediante la differenza del valore sinusoidale stimato dell'errore ciclico presente in ordinata (s^*) e la media di s^* . La correzione d_c richiesta per rimuovere l'errore periodico dalla costante additiva c , calcolata mediante lo schema di Aarau, per la calibrazione di strumenti EDM su baseline è assunta positiva se la curva è sopra la linea della media di s^* e negativa se la curva è al di sotto della media di s^* .

Posizioni riflettore	s	Subtract	s*
1m	100.032 m	0m	100.032 m
2m	101.032 m	1m	100.032 m
3m	102.026 m	2m	100.026 m

4m	103.022 m	3m	100.022 m
5m	104.018 m	4m	100.018 m
6m	105.016 m	5m	100.016 m
7m	106.016 m	6m	100.016 m
8m	107.020 m	7m	100.020 m
9m	108.026 m	8m	100.026 m
10m	109.030 m	9m	100.030 m
Media s*=100.0238m			

Tab.10 Misure originali s e misure ridotte all'osservazione del primo tape mark s*.

Nell'esempio in figura 10, il valore dc per s =100m o per s =110m è di +8mm (infatti $dc=s^*-s^*_{medio}=100.032-100.0238=0.008m$).

Nel caso in cui la costante additiva c sia stata determinata utilizzando un allineamento secondo lo schema di Aarau, la costante additiva complessiva c_{tot} sarà data:

$$c_{tot} = c + dc .$$

La costante additiva totale corrisponde al primo parametro A_{00} delle correzioni strumentali (IC).

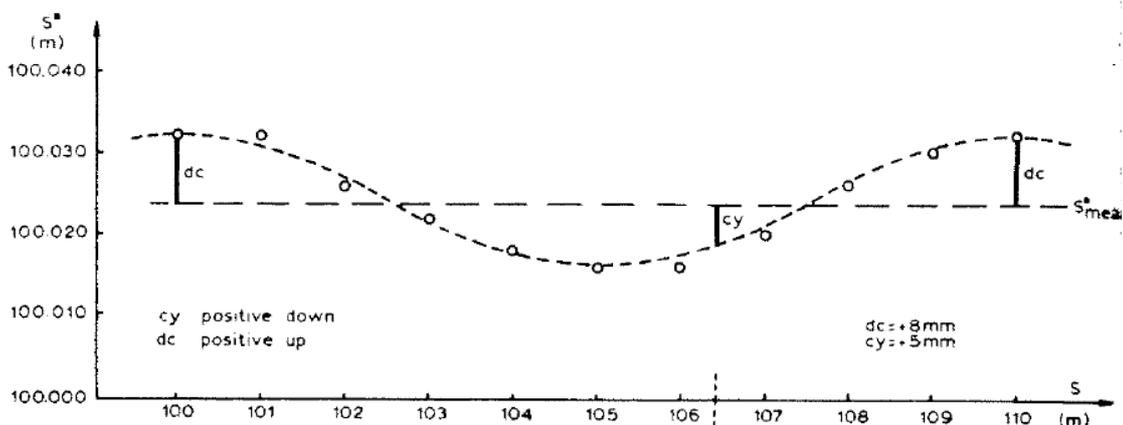


Fig.11 Funzione sinusoidale dell'errore ciclico.

Nel caso, invece, degli schemi di Heerbrugg e di Hobart, occorre correggere le distanze misurate del corrispondente valore dell'errore ciclico e poi ripetere il calcolo dei parametri di calibrazione.

Quindi la correzione per l'errore ciclico (cy) può essere ottenuta graficamente dalla Fig.10 a prescindere dallo schema utilizzato per la calibrazione di EDM su baseline; cy è definito come l'intervallo tra la stima della curva dell'errore ciclico e la media di s^* per una certa frazione dell'unità di lunghezza. La correzione viene assunta positiva se la curva è sopra la media di s^* e negativa se la curva si trova sotto la linea della media di s^* ; essa equivale ai termini B_{11} e C_{11} nella formula generale delle correzioni strumentali (IC).

Nella pratica la correzione dell'errore ciclico può essere omessa ogni volta che l'ampiezza di tale errore è inferiore all'accuratezza dichiarata del distanziometro o inferiore all'accuratezza richiesta per le attività di rilievo previste.

L'accuratezza della determinazione della correzione può essere migliorata spostando il riflettore con intervalli di distanza più e utilizzando un calcolo ai minimi quadrati.

3.5.3 DETERMINAZIONE ANALITICA DELLO SHORT PERIODIC ERRORS

L'errore ciclico del primo ordine può essere descritto dalla seguente espressione:

$$CE = A_1 \text{sen} \left[\left(\frac{2\pi}{U} \right) (S + B_1) \right] \quad (3.8)$$

dove :

- A_1 = ampiezza dell'errore
- U = unità di lunghezza dello strumento EDM
- S = misura di distanza
- B_1 = fase dell'errore
- CE = errore ciclico alla distanza S

Questa equazione può essere sviluppata, usando note identità, nella seguente forma:

$$CE = A_1 \left[\text{sen} \left(\frac{2\pi S}{U} \right) \cos \left(\frac{2\pi B_1}{U} \right) + \cos \left(\frac{2\pi S}{U} \right) \text{sen} \left(\frac{2\pi B_1}{U} \right) \right] \quad (3.9)$$

Considerando le sostituzioni:

$$b_1 = A_1 \cos \left(\frac{2\pi B_1}{U} \right) \quad a_1 = A_1 \text{sen} \left(\frac{2\pi B_1}{U} \right) \quad (3.10)$$

l'errore ciclico del primo ordine può essere riscritto in una forma più adatta per i calcoli:

$$CE = a_1 \cos \left(\frac{2\pi S}{U} \right) + b_1 \text{sen} \left(\frac{2\pi S}{U} \right) \quad (3.11)$$

Se si considerano tutti gli errori ciclici di ordine n-esimo si ottiene:

$$CE' = \sum_{j=1}^n a_j \cos \left[\left(\frac{2\pi S}{U} \right) j \right] + \sum_{j=1}^n b_j \sin \left[\left(\frac{2\pi S}{U} \right) j \right] \quad (3.12)$$

La formula originale dell'errore ciclico può essere riportata usando le seguenti equazioni:

$$A_j = (a_j^2 + b_j^2)^{1/2} \quad B_j = (U/2\pi) \arctan(a_j/b_j) \quad (3.13)$$

Se si assume che il numero totale delle m osservazioni (equamente distribuite sopra l'unità di lunghezza) sono state effettuate nel corso di un test sull'errore periodico corto con:

$$m D = U \quad , \quad (3.14)$$

dove D è la spaziatura delle misure sull'unità di lunghezza. Quindi, in termini di frazioni dell'unità di lunghezza, le misure sono state effettuate nei punti:

0, D, 2D, . . . (m - 2)D, (m - 1)D .

Per ogni delle m misurazioni, può essere formulata un'equazione sperimentale con la seguente forma:

$$s_i + v_i = S_i + \sum_{j=1}^n a_j \cos \left[\left(\frac{2\pi j}{U} \right) S_i \right] + \sum_{j=1}^n b_j \sin \left[\left(\frac{2\pi j}{U} \right) S_i \right] , \quad (3.15)$$

Dove:

- s_i = i-esima misura di distanza
- v_i = residuo i-esima misurazione
- $i = 0, 1, 2, 3, \dots, (m-1)$
- j = grado dell'errore periodico = 1, 2, 3, 4, , (n)
- a_j = ampiezza compensata del j-esimo termine coseno
- b_j = ampiezza compensata del j-esimo termine seno
- m = numero totale delle osservazioni
- n = grado più alto dell'errore periodico considerato, dove $m > (2n + 1)$

Assumendo che il nastro graduato (e quindi D) sia privo di errori, il parametro S_i può essere sostituito con:

$$S_i = S_0 + iD \quad (3.16)$$

dove:

- $D = U/m$
- S_0 = corretta distanza nella posizione nulla del riflettore ($i=0$).

Definendo come in Tabella 11:

$$s_i^* = s_i - iD \quad \text{ed} \quad \bar{s}^* = \left(\frac{1}{m} \right) \sum_{i=0}^{m-1} s_i^* \quad (3.17)$$

S_0 può essere espresso come:

$$S_0 = \bar{s}^* + ds \quad . \quad (3.18)$$

Sostituendo l'equazione (3.16) e (3.17) nella (3.15) e considerando semplici sostituzioni si ottiene:

$$E_i = (2\pi/U) (\bar{s}^* + ds + iD) \quad (3.19)$$

che conduce alle seguenti equazioni di osservazione:

$$l_i + v_i = ds + \sum_{j=1}^n a_j \cos(jE_i) + \sum_{j=1}^n b_j \sin(jE_i) \quad (3.20)$$

dove:

$$l_i = s_i^* - \bar{s}^* \quad (3.21)$$

L'equazione (3.20) riconduce al classico caso di analisi armonica dove m valori y_i (qui l_i) sono noti per il corrispondente valore d'ascissa x (qui E_i), con x_i equamente distribuiti da 0 a 2π . La soluzione per tutti i parametri incogniti ds , a_j , e b_j sono dati da Carslaw (1950) nel seguente modo:

$$- \quad ds = (1/m) \sum_{i=0}^{m-1} l_i \quad (3.22)$$

$$- \quad a_j = (2/m) \sum_{i=0}^{m-1} [l_i \cos(jE_i)] \quad ; \quad j \neq (m/2) \quad (3.23)$$

$$- \quad b_j = (2/m) \sum_{i=0}^{m-1} [l_i \sin(jE_i)] \quad , \quad (3.24)$$

dove $m > 2j + 1$.

Sostituendo l'equazione (3.21) e (3.17) nella (3.21) si arriva a:

$$ds = 0 \quad ,$$

ciò significa che E_i si riduce a:

$$E_i = (2\pi/U) (\bar{s}^* + iD) \quad . \quad (3.25)$$

La deviazione standard s_{EDM} delle osservazioni di distanza (di fatto l_j) relativamente alla curve CE' dell'errore ciclico compensato viene calcolata come:

$$s_{EDM} = \pm \left(\frac{sv_i^2}{f} \right)^{1/2} \quad (3.26)$$

dove $f = \text{gradi di libertà} = m - 2j - 1$.

La deviazione standard dei coefficienti di Fourier a_j , b_j sono dati dalle relazioni:

$$s_{a_j} = s_{b_j} = s_{EDM} \left(\frac{2}{m} \right)^{1/2} \quad (3.27)$$

La significatività di ogni singolo coefficiente è indagato statisticamente testando la sua differenza dallo zero. Un coefficiente può essere ignorato ai fini pratici se soddisfatta la seguente diseuguaglianza:

$$\left(\frac{a_j}{s_{a_j}} \right) \leq t_{f,\alpha} \quad , \quad \left(\frac{b_j}{s_{b_j}} \right) \leq t_{f,\alpha} \quad (3.28)$$

dove :

- t denota la statistica del test (t-distribuzione)
- $\alpha = \text{livello di significatività}$
- $f = \text{gradi di libertà}$.

Applicando la legge della propagazione della varianza all'equazione (3.12) si ottiene la deviazione standard per la correzione dell'errore ciclico (c_y):

$$s_{c_y} = s_{EDM} \left(\frac{2j}{m} \right)^{1/2} \quad (3.29)$$

dove $j = \text{numero di lunghezze d'onda presenti nella correzione dell'errore periodico corto}$.

3.6 CALIBRAZIONE DEL MODULATORE DI FREQUENZA

La calibrazione dell'oscillatore degli EDM viene effettuata tipicamente ad integrazione dei test condotti sugli allineamenti. Il servizio di calibrazione non viene effettuato dal possessore dello strumento EDM, ma da laboratori certificati ed anche da qualche università. Tutte queste organizzazioni possono fornire misurazioni di frequenza a temperatura ambiente per determinare l'invecchiamento dell'oscillatore di cristallo [parametri A_{10} e A_{14} nell'equazione (2.5.1) delle correzioni strumentali] e se richiesto, l'effetto del warm-up dello strumento [parametri A_{15} e A_{16} nell'equazione (2.5.1) delle correzioni strumentali].

3.7 ACCURATEZZA DEGLI STRUMENTI EDM

La maggior parte delle case produttrici dichiarano l'accuratezza dei loro strumenti nella seguente forma:

$$s = \pm (A + B \cdot D) \quad (3.30)$$

con A in mm, B in ppm e D distanza in km; assumendo che essa rappresenti la deviazione standard al 66% di livello di confidenza.

Il termine A include:

1. risoluzione di fase dello strumento EDM
2. massima ampiezza dell'errore ciclico
3. massimo effetto dell'errore non lineare dipendente dalla distanza
4. accuratezza della costante additiva di costruzione
5. compatibilità del riflettore.

Considerando EDM a corto raggio il termine B contiene:

1. il range di deriva della frequenza dell'oscillatore principale all'interno dell'intervallo di temperatura di esercizio dello strumento (es. $-20^{\circ}\text{C} \rightarrow +40^{\circ}\text{C}$) oppure
2. il massimo errore che può essere causato dal limitato passo dell'intervallo del "ppm dial"

Si ricorda che c'è un miscuglio di errori casuali e semi-casuali (es. errore ciclico) con errori puramente sistematici (deriva della frequenza con la temperatura). Per questi motivi l'equazione (3.30), non dovrebbe essere usata per definire la varianza a priori nella compensazione ai minimi quadrati. Ad esempio, con omogenee condizioni di temperatura in campagna, il termine proporzionale alla distanza è probabilmente molto piccolo.

Il significato dell'accuratezza descritto dalla equazione (3.30) può essere ulteriormente illustrato mediante il seguente test, che può essere impiegato dall'utilizzatore dello strumento per verificare i contenuti delle specifiche tecniche. Occorre, in primo luogo, disporre di 14 distanze note che coprano l'intervallo di distanza complessivo di lavoro del distanziometro; ognuna di queste distanze dovrebbe essere misurata una sola volta in tutto l'intero range di temperature di utilizzazione del distanziometro (es. a -20°C , -10°C , 0°C , $+10^{\circ}\text{C}$, $+20^{\circ}\text{C}$, $+30^{\circ}\text{C}$, $+40^{\circ}\text{C}$). Questo porterebbe ad un totale di 98 osservazioni. Plottando i residui (distanze misurate meno le distanze note) in funzione della distanza, 68 errori dovrebbero rientrare all'interno della gamma di errori dati dall'equazione (3.30) e 95 errori dovrebbero rientrare nella banda di errore raddoppiato di $(\pm (2A + 2B \cdot D))$.

Naturalmente, deve essere utilizzato lo specifico riflettore associato dal costruttore al distanziometro nel test. Tale prova dovrebbe stabilire se lo strumento soddisfa l'accuratezza dichiarata dalla casa produttrice o no.

Il test è purtroppo di difficile applicazione pratica, poiché è ristretto alle sole località temperature annuali che variano dai -20°C e $+40^{\circ}\text{C}$ e per il fatto che tale metodo richiederebbe un intero anno per verificare l'accuratezza dello strumento.

4.DISTANZIOMETRI UTILIZZATI NELLA SPERIMENTAZIONE

La sperimentazione oggetto della presente tesi è stata condotta utilizzando due stazioni totali Leica ad elevate prestazioni: la stazione TCA2003 e la TS30.

Le stazioni totali ad alte prestazioni si contraddistinguono per la loro precisione unica. Possono essere eseguite in modo affidabile e con la massima precisione le più complesse operazioni di misura nel campo dell'ingegneria, della costruzione di gallerie e dell'edilizia. Le stazioni totali sono estremamente robuste e si adattano perfettamente per le misure in continuo come il monitoraggio di strutture o il controllo delle macchine.

Questa tipologia di strumento trova applicazione principalmente nel:

- **Engineering Survey:** Monitoraggio di strutture esistenti o in fase di costruzione, misure manuali o automatiche, osservazioni di gallerie per l'allineamento di macchine per lo scavo e frese nonché per la determinazione dei fori da trivellare e della direzione di avanzamento, tracciamenti di precisione, misure di controllo nell'ingegneria civile e reti di triangolazione, misure di carico dei ponti, misura della deformazione permanente, controllo automatico delle spalle.

Vantaggi: Elevata flessibilità d'impiego, anche in condizioni difficili.



- **Misura delle deformazioni:** monitoraggio di dighe e di opere simili.

Vantaggi: Misure di monitoraggio in continuo, temporizzate e ad elevata precisione, funzionamento diurno e notturno con possibilità di allarme in automatico.



- **Controllo delle macchine:**

1. **Opere di fondazione:** impiego per il controllo di trivellatrici verticali e di battipali nonché per l'allineamento di impianti e macchine.



Vantaggi:

I pali per delimitare i punti del reticolo diventano superflui.

2. **Costruzione di strade e ferrovie:** Impiego per il controllo di macchine a casseforme scorrevoli, pavimentatrici per asfalto, spianatrici e fresatrici.



Vantaggi:

Grazie alle misure continue online con la stazione totale non è più necessario installare fili di guida per le macchine.

3. Lavori di spianamento

Impiego per il controllo di rulli di ogni genere.



Vantaggi:

Impiegando una stazione totale automatizzata, si evitano dei costosi tempi di arresto della macchina livellatrice. È possibile lavorare senza problemi e senza interruzioni anche su superfici inclinate.

Nelle schede successive sono riportate le principali caratteristiche tecniche dei due strumenti.

Pur essendo entrambe le stazioni totali caratterizzate da elevatissime precisioni, la stazione TS30, sfruttando la tecnologia PinPoint descritta nei precedenti capitoli, è caratterizzata da una maggiore precisione nella misura della distanza.

Tale stazione inoltre essendo di recente acquisizione, è stata calibrata dalla Ditta costruttrice da pochi mesi e, pertanto, è da ritenersi molto affidabile. Per entrambi i motivi si è quindi deciso di utilizzarla per misurare le distanze “vere”, da utilizzare per la verifica e calibrazione dell’EDM della stazione TCA2003.

LEICA TCA2003

STAZIONE TOTALE MOTORIZZATA



MISURE ANGOLARI:

Precisione: 0.5''

MISURA DI DISTANZA CON PRISMA:

Range: 2500 m

precisione : 1 mm + 1 ppm

FUNZIONE ATR (Automatica Target Recognition)

LEICA TS30

STAZIONE TOTALE MOTORIZZATA



MISURE ANGOLARI:

Precisione: : 0.5"

MISURA DI DISTANZA CON PRISMA:

range : 1.5m – 3500m

Precisione: 0.6 mm + 1 ppm

MISURA DI DISTANZA SENZA PRISMA:

Range : 1,5 m-1200m

Precisione: 2 mm + 2 ppm

FUNZIONE ATR (Automatica Target Recognition)

5. PROCEDURE SPERIMENTALI DI CALIBRAZIONE

Ai fini della verifica e calibrazione dell'EDM della stazione TCA2003, si è scelto di adottare lo schema di Heerbruggs con 7 stazioni, così come previsto dalla normativa di riferimento (Norma ISO 17123-4).

In questo modo, oltre a sperimentare una metodologia standard utilizzata anche dai costruttori per la certificazione degli strumenti, è possibile confrontare i dati ottenuti con quelli presentati dalla ditta Leica all'atto della vendita dello strumento.

5.1 PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DELL'ALLINEAMENTO

Il primo passo della sperimentazione è stato dunque la progettazione dell'allineamento di calibrazione con il calcolo delle distanze tra le stazioni. Poiché lo strumento in oggetto è caratterizzato da una unità di lunghezza di 3 metri, utilizzando le formule presentate nel paragrafo 3.1.4.1 si ottiene:

$$\beta_0 = \frac{600-6.5\lambda}{15} = \frac{600-6.5 \cdot 6}{15} = 37.4m$$

$\beta = 36$ m (β_0 approssimato per difetto ad un multiplo dell'unità di lunghezza dello strumento)

$$\gamma = \lambda/72 = 6 / 72 = 0.08333 \text{ m}$$

Le sei distanze dell'allineamento vengono calcolate nel seguente modo:

$$d_1 = \lambda + \beta + 3\gamma = 6 + 36 + 3 \cdot 0.08333 = 42.25 \text{ m}$$

$$d_2 = \lambda + 3\beta + 7\gamma = 6 + 3 \cdot 36 + 7 \cdot 0.08333 = 114.58 \text{ m}$$

$$d_3 = \lambda + 5\beta + 11\gamma = 6 + 5 \cdot 36 + 11 \cdot 0.08333 = 186.92 \text{ m}$$

$$d_4 = \lambda + 4\beta + 9\gamma = 6 + 4 \cdot 36 + 9 \cdot 0.08333 = 150.75 \text{ m}$$

$$d_5 = \lambda + 2\beta + 5\gamma = 6 + 2 \cdot 36 + 5 \cdot 0.08333 = 78.42 \text{ m}$$

$$d_6 = \lambda + \gamma = 6 + 0.08333 = 6.08 \text{ m}$$

$$d = 6\lambda + 15\beta + 36\gamma = 6 \cdot 6 + 15 \cdot 36 + 36 \cdot 0.08333 = 579 \text{ m}$$

Inoltre, trattandosi di una prima occasione di sperimentazione sulla calibrazione di EDM, si è deciso di materializzare anche una stazione ausiliaria (stazione 0) posta ad 1,5 m prima della stazione 1, in modo da utilizzare le distanze misurate anche per provare la metodologia basata sullo schema di Hobart.

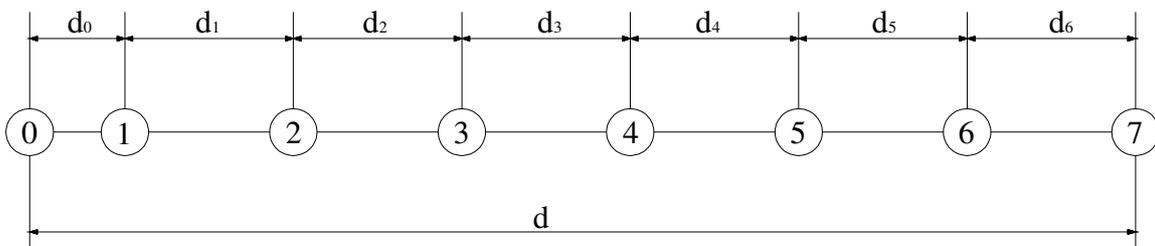


Fig.1 Configurazione dell'allineamento lungo la pista ciclabile.

La scelta del sito è ricaduta sulla pista ciclabile che corre a fianco del rettilineo di via Stelloni Levante nei pressi di Calderara di Reno, che offre i requisiti di accessibilità, planarità e lunghezza richiesti per la sperimentazione. La strada non è disposta lungo la direzione Nord-Sud,

come consigliabile, ma eseguendo le misure a cielo coperto, le condizioni di illuminazione non costituiscono un vincolo da considerare.



Fig.2 pista ciclabile che corre a fianco del rettilineo di via Stelloni Levante

Essendo una fase preliminare della sperimentazione sulla calibrazione e data l'onerosità economica ed operativa della realizzazione di pilastri per il centramento forzato, si è optato per una materializzazione semplice con chiodi infissi nella pavimentazione stradale, prevedendo di stazionare sui vertici con treppiede.

La materializzazione è stata attuata mediante chiodi topografici posizionati approssimativamente alle distanze indicate, mantenendo almeno in prima approssimazione l'allineamento. Per effettuare questa operazione sono stati utilizzati la stazione totale Leica TS30 ed una palina munita di livella sferica su cui è stato montato un prisma retroriflettore. Due radio ricetrasmittenti sono state impiegate per mantenere in

comunicazione l'operatore allo strumento e quello dotato di palina che si occupava del fissaggio dei chiodi alla pavimentazione.

5.2 EFFETTUAZIONE DELLE MISURE

Per il posizionamento della mira sono stati utilizzati otto treppiedi con relative basette topografiche, che sono stati messi in stazione sfruttando il piombino laser e la livella elettronica della stazione totale TS30.

In accordo alla normativa ISO ed alle indicazioni metodologiche previste per questo tipo di applicazione, sono state misurate con entrambi gli strumenti (Leica TS30 e Leica TCA2003) le 21 distanze dell'allineamento dello schema della norma ISO e le 6 distanze dalla stazione ausiliaria alle stazioni 2, 3, 4, 5, 6 e 7 (vedi figura 3) e tutte le altezze strumentali.

In particolare, è stato utilizzato un solo prisma retroriflettente Leica modello GPR121 di cui è stato registrato il numero di serie (8805628) per poterlo utilizzare per eventuali ulteriori test di calibrazione ai fini di un confronto dei risultati.

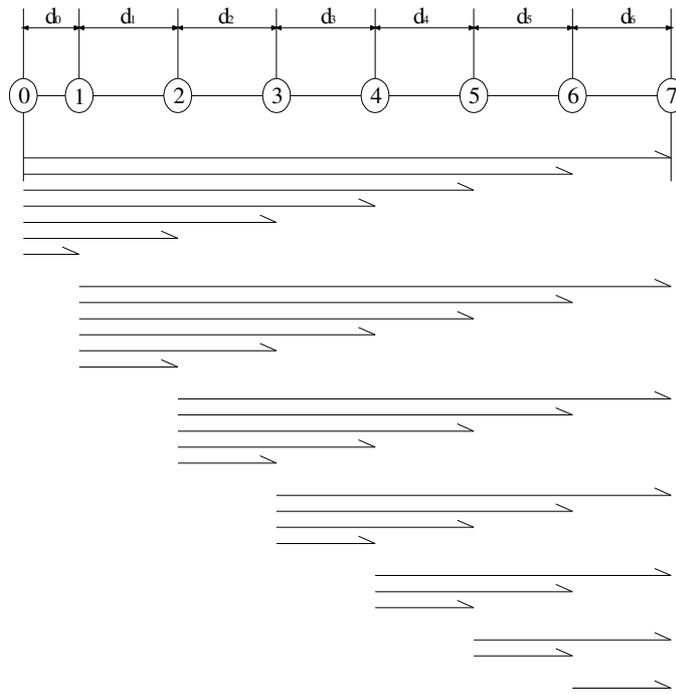


Fig.3 Distanze misurate.

La misurazione delle distanze deve essere iniziata solo quando c'è una bassa insolazione e la visibilità è buona. Gli strumenti sono stati mantenuti in condizioni di insolazione costante e sempre accesi per tutta la durata delle operazioni di misura. Nel corso delle misurazioni, ai fini delle correzioni atmosferiche, sono stati utilizzati:

- tre psicrometri posti rispettivamente ad inizio, metà ed alla fine della test line per la misurazione in continuo della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria,(vedi altre correzioni)



- un barometro per la misura della pressione.



Per ogni distanza sono state effettuate 4 misurazioni di angoli e distanze in posizione diretta e coniugata.

1.2.1 Set di dati acquisiti

5.2.1.1 Misure con distanziometro Leica TS30



La stazione totale TS30 offre la possibilità di effettuare le misure in posizione diretta e coniugata in modo del tutto automatico. I valori degli angoli e delle distanze che vengono memorizzati sono già le medie delle misure effettuate nelle due posizioni.

In questo caso, quindi, per ogni accoppiamento di stazioni sono registrati solo 4 set di valori, che vengono di seguito riportati.

Stazione 1

				Azimutale	Zenitale	Distanza
D1-2						
0121	366172	9988475	422580	3,66172	99,88475	42,258
0122	366149	9988440	422579	3,66149	99,8844	42,2579
0123	366168	9988459	422579	3,66168	99,88459	42,2579
0124	366146	9988487	422578	3,66146	99,88487	42,2578
				3,6615875	99,884653	42,2579
D1-3						
0131	352620	9982487	1568335	3,5262	99,82487	156,8335
0132	352618	9982420	1568337	3,52618	99,8242	156,8337
0133	352646	9982448	1568336	3,52646	99,82448	156,8336
0134	352540	9982437	1568337	3,5254	99,82437	156,8337
				3,52606	99,82448	156,83363
D1-4						
0141	339778	9986401	3437537	3,39778	99,86401	343,7537
0142	339718	9986503	3437539	3,39718	99,86503	343,7539
0143	339874	9986474	3437539	3,39874	99,86474	343,7539
0144	339829	9986324	3437539	3,39829	99,86324	343,7539
				3,3979975	99,864255	343,75385
D1-5						
0151	339420	9986657	4945230	3,3942	99,86657	494,523
0152	339392	9986651	4945231	3,39392	99,86651	494,5231
0153	339351	9986695	4945233	3,39351	99,86695	494,5233
0154	339367	9986756	4945230	3,39367	99,86756	494,523
				3,393825	99,866898	494,5231
D1-6						
0161	342427	9988721	5729521	3,42427	99,88721	572,9521
0162	342115	9988910	5729523	3,42115	99,8891	572,9523
0163	342196	9988912	5729524	3,42196	99,88912	572,9524
0164	342155	9988944	5729525	3,42155	99,88944	572,9525
				3,4222325	99,888718	572,95233

D1-7

0171	342325	9988988	5790289	3,42325	99,88988	579,0289
0172	342523	9989008	5790287	3,42523	99,89008	579,0287
0173	342534	9988797	5790290	3,42534	99,88797	579,029
0174	342503	9989100	5790289	3,42503	99,891	579,0289
				3,4247125	99,889733	579,02888

Stazione 2**D2-7**

0271	1409518	9988962	5367717	14,09518	99,88962	536,7717
0272	1409688	9988931	5367714	14,09688	99,88931	536,7714
0273	1409560	9988921	5367716	14,0956	99,88921	536,7716
0274	1409582	9988954	5367717	14,09582	99,88954	536,7717
				14,09587	99,88942	536,7716

D2-6

0261	1409331	9988652	5306945	14,09331	99,88652	530,6945
0262	1409249	9988713	5306948	14,09249	99,88713	530,6948
0263	1409326	9988656	5306953	14,09326	99,88656	530,6953
0264	1409391	9988581	5306947	14,09391	99,88581	530,6947
				14,093243	99,886505	530,69483

D2-5

0251	1405867	9986509	4522654	14,05867	99,86509	452,2654
0252	1405827	9986545	4522657	14,05827	99,86545	452,2657
0253	1405710	9986502	4522654	14,0571	99,86502	452,2654
0254	1405670	9986504	4522652	14,0567	99,86504	452,2652
				14,057685	99,86515	452,26543

D2-4

0241	1405102	9986084	3014959	14,05102	99,86084	301,4959
0242	1405219	9985936	3014959	14,05219	99,85936	301,4959
0243	1405180	9986052	3014963	14,0518	99,86052	301,4963
0244	1405175	9985981	3014961	14,05175	99,85981	301,4961
				14,05169	99,860133	301,49605

D2-3

0231	1416787	9980104	1145757	14,16787	99,80104	114,5757
0232	1416764	9980154	1145757	14,16764	99,80154	114,5757
0233	1416860	9980125	1145757	14,1686	99,80125	114,5757
0234	1416871	9980065	1145757	14,16871	99,80065	114,5757
				14,168205	99,80112	114,5757

Stazione 3**D3-4**

0341	2255579	9989348	1869208	22,55579	99,89348	186,9208
0342	2255623	9989459	1869207	22,55623	99,89459	186,9207

0343	2255534	9989359	1869208	22,55534	99,89359	186,9208
0344	2255579	9989295	1869206	22,55579	99,89295	186,9206
0345	2255501	9989269	1869208	22,55501	99,89269	186,9208
				22,555632	99,89346	186,92074

D3-5

0351	2259851	9988191	3376895	22,59851	99,88191	337,6895
0352	2259784	9988194	3376895	22,59784	99,88194	337,6895
0353	2259725	9988297	3376897	22,59725	99,88297	337,6897
0354	2259763	9988382	3376894	22,59763	99,88382	337,6894
				22,597808	99,88266	337,6895

D3-6

0361	2265078	9990585	4161185	22,65078	99,90585	416,1185
0362	2265009	9990628	4161187	22,65009	99,90628	416,1187
0363	2265123	9990581	4161181	22,65123	99,90581	416,1181
0364	2264964	9990512	4161186	22,64964	99,90512	416,1186
				22,650435	99,905765	416,11848

D3-7

0371	2265247	9990868	4221956	22,65247	99,90868	422,1956
0372	2265283	9990687	4221956	22,65283	99,90687	422,1956
0373	2265284	9990797	4221957	22,65284	99,90797	422,1957
0374	2265417	9990781	4221955	22,65417	99,90781	422,1955
				22,653078	99,907833	422,1956

Stazione 4

D4-5

0451	838550	9986349	1507690	8,3855	99,86349	150,769
0452	838535	9986338	1507691	8,38535	99,86338	150,7691
0453	838525	9986340	1507691	8,38525	99,8634	150,7691
0454	838540	9986350	1507689	8,3854	99,8635	150,7689
				8,385375	99,863443	150,76903

D4-6

0461	846438	9991129	2291984	8,46438	99,91129	229,1984
0462	846445	9991084	2291986	8,46445	99,91084	229,1986
0463	846470	9991050	2291984	8,4647	99,9105	229,1984
0464	846477	9991086	2291984	8,46477	99,91086	229,1984
				8,464575	99,910873	229,19845

D4-7

0471	846969	9991270	2352755	8,46969	99,9127	235,2755
0472	846995	9991226	2352754	8,46995	99,91226	235,2754
0473	847027	9991211	2352755	8,47027	99,91211	235,2755
0474	846956	9991229	2352756	8,46956	99,91229	235,2756
				8,4698675	99,91234	235,2755

Stazione 5

D5-6

0561	951128	10000180	784300	9,51128	100,0018	78,43
0562	951139	10000256	784299	9,51139	100,00256	78,4299
0563	951130	10000195	784300	9,5113	100,00195	78,43
0564	951140	10000190	784301	9,5114	100,0019	78,4301
				9,5113425	100,00205	78,43

Altezza strumentale Da 5 a 6

56B1	951117	10104006	784393	9,51117	101,04006	78,4393
56B2	951182	10103887	784395	9,51182	101,03887	78,4395
56B3	951181	10104054	784393	9,51181	101,04054	78,4393
56B4	951180	10103932	784393	9,5118	101,03932	78,4393
				9,51165	101,0397	78,43935

D5-7

0571	951566	9999814	845072	9,51566	99,99814	84,5072
0572	951541	9999887	845070	9,51541	99,99887	84,507
0573	951562	9999850	845072	9,51562	99,9985	84,5072
0574	951569	9999843	845072	9,51569	99,99843	84,5072
				9,515595	99,998485	84,50715

Altezza strumentale Da 5 a 7

57B1	951517	10096976	845156	9,51517	100,96976	84,5156
57B2	951494	10096993	845154	9,51494	100,96993	84,5154
57B3	951526	10096950	845155	9,51526	100,9695	84,5155
57B4	951499	10096958	845156	9,51499	100,96958	84,5156
				9,51509	100,96969	84,515525

Stazione 6**D6-7**

0671	1063181	9995612	60774	10,63181	99,95612	6,0774
0672	1063172	9995603	60775	10,63172	99,95603	6,0775
0673	1063151	9995617	60773	10,63151	99,95617	6,0773
0674	1063137	9995628	60773	10,63137	99,95628	6,0773
				10,631603	99,95615	6,077375

Stazione 0**D0-7**

0A71	2019222	9990642	5805257	20,19222	99,90642	580,5257
0A72	2019184	9990654	5805255	20,19184	99,90654	580,5255
0A73	2019190	9990539	5805257	20,1919	99,90539	580,5257
0A74	2019235	9990642	5805259	20,19235	99,90642	580,5259
				20,192078	99,906193	580,5257

D0-6

0A61	2018914	9990551	5744489	20,18914	99,90551	574,4489
------	---------	---------	---------	----------	----------	----------

0A62	2018973	9990517	5744491	20,18973	99,90517	574,4491
0A63	2018915	9990475	5744491	20,18915	99,90475	574,4491
0A64	2018974	9990484	5744487	20,18974	99,90484	574,4487
				20,18944	99,905068	574,44895
D0-5						
0A51	2016051	9988913	4960197	20,16051	99,88913	496,0197
0A52	2015953	9988930	4960196	20,15953	99,8893	496,0196
0A53	2016058	9988909	4960194	20,16058	99,88909	496,0194
0A54	2016129	9988876	4960194	20,16129	99,88876	496,0194
				20,160478	99,88907	496,01953
D0-4						
0A41	2016642	9989745	3452505	20,16642	99,89745	345,2505
0A42	2016614	9989727	3452508	20,16614	99,89727	345,2508
0A43	2016642	9989717	3452508	20,16642	99,89717	345,2508
0A44	2016679	9989725	3452510	20,16679	99,89725	345,251
				20,166443	99,897285	345,25078
D0-3						
0A31	2029506	9990089	1583310	20,29506	99,90089	158,331
0A32	2029516	9990104	1583310	20,29516	99,90104	158,331
0A33	2029517	9990078	1583311	20,29517	99,90078	158,3311
0A34	2029536	9990098	1583309	20,29536	99,90098	158,3309
				20,295188	99,900923	158,331
D0-2						
0A21	2042321	10016201	437564	20,42321	100,16201	43,7564
0A22	2042309	10016197	437563	20,42309	100,16197	43,7563
0A23	2042304	10016172	437564	20,42304	100,16172	43,7564
0A24	2042315	10016202	437564	20,42315	100,16202	43,7564
				20,423123	100,16193	43,756375

5.1.1.2 Misure con distanziometro Leica TCA2003

Con la stazione totale TCA2003 sono state effettuate 4 collimazioni, con relative letture, in posizione diretta e 4 in posizione coniugata.

La media dei valori misurati è stata effettuata successivamente in laboratorio in un foglio di calcolo.

Di seguito vengono riportati i dati misurati e le relative medie calcolate.

Stazione 0

	Azimutale	Zenitale	Distanza
D0-2			
00000201	38558540	10016603	437569
00000202	38558632	10016704	437567
00000203	38558663	10016787	437568
000A0204	38558558	10016589	437567
000A0205	18558698	29983824	437567
000A0206	18558749	29984035	437567
000A0207	18558745	29984038	437568
000A0208	18558766	29983958	437567
	385,5867	100,1635	43,75675

D0-3			
000A0301	38545826	9990272	1583314
000A0302	38545851	9990163	1583315
000A0303	38545872	9990120	1583315
000A0304	38545798	9990175	1583316
000A0305	18545767	30010063	1583314
000A0306	18545834	30010013	1583314
000A0307	18545716	30010023	1583315
000A0308	18545790	30010045	1583315
	385,4581	99,90073	158,3315

D0-4			
000A0401	38533224	9989878	3452516
000A0402	38533364	9989882	3452515
000A0403	38533363	9989875	3452511
000A0404	38533362	9989885	3452512
000A0405	18533353	30010078	3452513
000A0406	18533358	30010097	3452514
000A0407	18533375	30010087	3452511
000A0408	18533385	30010102	3452512
	385,3335	99,89895	345,2513

D0-5			
000A0501	18532680	30010664	4960204
000A0502	18532684	30010675	4960204
000A0503	18532681	30010677	4960206
000A0504	18532682	30010667	4960203
000A0505	38532673	9989489	4960205
000A0506	38532663	9989516	4960202
000A0507	38532655	9989532	4960202
000A0508	38532648	9989517	4960215
	385,3267	99,89421	496,0205

D0-6

000A0601	38535484	9991173	5744493
000A0602	38535480	9991175	5744501
000A0603	38535479	9991192	5744499
000A0604	38535484	9991182	5744497
000A0605	18535562	30008781	5744499
000A0606	18535572	30008782	5744498
000A0607	18535579	30008776	5744498
000A0608	18535576	30008821	5744494
	385,3553	99,91195	574,4497

D0-7

000A0701	18535474	30009094	5805268
000A0702	18535526	30009131	5805266
000A0703	18535510	30009103	5805264
000A0704	18535509	30009125	5805261
000A0705	38535471	9991095	5805261
000A0706	38535516	9991103	5805266
000A0707	38535508	9991149	5805267
000A0708	38535492	9991142	5805268
	385,355	99,91005	580,5265

Stazione 1**D1-2**

000A1201	39470383	9988486	422579
000A1202	39470379	9988505	422579
000A1203	39470389	9988508	422578
000A1204	39470387	9988505	422579
000A1205	19470400	30011580	422579
000A1206	19470411	30011598	422580
000A1207	19470443	30011586	422580
000A1208	19470444	30011589	422580
	394,704	99,88456	42,25793

D1-3

000A1301	19451788	30017560	1568329
000A1302	19451872	30017552	1568327
000A1303	19451852	30017552	1568328
000A1304	19451849	30017534	1568327
000A1305	39451814	9982594	1568328
000A1306	39451790	9982611	1568328
000A1307	39451790	9982610	1568327
000A1308	39451928	9982604	1568327
	394,5184	99,82528	156,8328

D1-4

000A1401	39438857	9986589	3437542
000A1402	39438858	9986588	3437529
000A1403	39438858	9986596	3437535
000A1404	39438856	9986591	3437528
000A1405	19438875	30013497	3437526
000A1406	19438879	30013462	3437529
000A1407	19438893	30013493	3437529
000A1408	19438881	30013504	3437528
	394,3887	99,86551	343,7531

D1-5

000A1501	19438258	30013337	4945216
000A1502	19438296	30013344	4945216
000A1503	19438294	30013330	4945219
000A1504	19438288	30013356	4945216
000A1505	39438353	9986852	4945221
000A1506	39438383	9986864	4945217
000A1507	39438312	9986846	4945217
000A1508	39438310	9986873	4945219
	394,3831	99,86759	494,5218

D1-6

000A1601	19441969	30010895	5729508
000A1602	19441943	30010830	5729510
000A1603	19442023	30010900	5729511
000A1604	19441997	30010891	5729512
000A1605	39441455	9989304	5729514
000A1606	39441455	9989301	5729511
000A1607	39441467	9989292	5729516
000A1608	39441435	9989308	5729517
	394,4172	99,89211	572,9512

D1-7

000A1701	39441649	9989078	5790282
000A1702	39441653	9989078	5790283
000A1703	39441646	9989067	5790279
000A1704	39441654	9989082	5790277
000A1705	19441641	30010910	5790276
000A1706	19441663	30010913	5790272
000A1707	19441698	30010932	5790285
000A1708	19441698	30010856	5790282
	394,4166	99,89087	579,028

Stazione 2

D2-3

000A2301	18558675	30019920	1145751
000A2302	18558651	30019911	1145752
000A2303	18558660	30019917	1145751
000A2304	18558661	30019892	1145752
000A2305	38558696	9980212	1145750
000A2306	38558701	9980224	1145751
000A2307	38558740	9980233	1145751
000A2308	38558678	9980241	1145751
	385,5868	99,80159	114,5751

D2-4

000A2401	38547280	9986107	3014951
000A2402	38546738	9986062	3014958
000A2403	38546735	9986053	3014955
000A2404	38546740	9986058	3014958
000A2405	18546775	30014001	3014954
000A2406	18546777	30014002	3014952
000A2407	18546816	30013990	3014952
000A2408	18546816	30013990	3014952
	385,4683	99,86037	301,4954

D2-5

000A2501	18547580	30013398	4522641
000A2502	18547574	30013392	4522637
000A2503	18547622	30013405	4522638
000A2504	18547577	30013403	4522642
000A2505	18547579	30013395	4522641
000A2506	38547679	9986634	4522641
000A2507	38547630	9986623	4522641
000A2508	38547603	9986642	4522639
	385,4761	99,86617	452,264

D2-6

000A2601	38551247	9988618	5306938
000A2602	38551255	9988642	5306926
000A2603	38551297	9988633	5306934
000A2604	38551323	9988626	5306931
000A2605	18551348	30011346	5306929
000A2606	18551340	30011352	5306927
000A2607	18551385	30011345	5306936
000A2608	18551388	30011345	5306931
	385,5132	99,88641	530,6932

D2-7

000A2701	18551391	30011468	5367700
000A2702	18551381	30011459	5367697
000A2703	18551391	30011449	5367697
000A2704	18551390	30011437	5367695
000A2705	38551360	9988585	5367697
000A2706	38551371	9988593	5367697
000A2707	38551376	9988601	5367701
000A2708	38551349	9988577	5367698
	385,5138	99,88568	536,7698

Stazione 3

D3-4

000A3401	6194504	30010724	1869200
000A3402	6194501	30010673	1869201
000A3403	6194529	30010732	1869202
000A3404	6194529	30010729	1869201
000A3405	26194548	9989418	1869200
000A3406	26194566	9989417	1869200
000A3407	26194545	9989436	1869202
000A3408	26194545	9989477	1869200
	261,9453	99,89361	186,9201

D3-5

000A3501	6198281	30012040	3376888
000A3502	6198307	30012040	3376887
000A3503	6198307	30012031	3376890
000A3504	6198365	30012045	3376886
000A3505	26198414	9988066	3376890
000A3506	26198410	9988106	3376894
000A3507	26198440	9988054	3376887
000A3508	26198384	9988015	3376888
	261,9836	99,88011	337,6889

D3-6

000A3601	6203668	30009343	4161182
000A3602	6203637	30009334	4161175
000A3603	6203652	30009329	4161186
000A3604	6203648	30009304	4161179
000A3605	26203643	9990764	4161180
000A3606	26203625	9990758	4161179
000A3607	26203601	9990787	4161182
000A3608	26203620	9990790	4161179
	262,0364	99,90724	416,118

D3-7

000A3701	26203801	9990797	4221950
000A3702	26203801	9990851	4221947
000A3703	26203807	9990789	4221953
000A3704	26203829	9990797	4221949
000A3705	6203846	30009263	4221950
000A3706	6203808	30009244	4221955
000A3707	6203807	30009261	4221951
000A3708	6203805	30009247	4221951
	262,0381	99,90777	422,1951

Stazione 4**D4-5**

000A4501	26614529	9986175	1507686
000A4502	26614572	9986181	1507685
000A4503	26614569	9986198	1507685
000A4504	26614567	9986189	1507685
000A4505	6614534	30013890	1507685
000A4506	6614533	30013914	1507686
000A4507	6614530	30013887	1507685
000A4508	6614565	30013926	1507685
	266,1455	99,86141	150,7685

D4-6

000A4601	26621932	9991309	2291979
000A4602	26621966	9991316	2291977
000A4603	26621971	9991259	2291979
000A4604	26621979	9991265	2291979
000A4605	6622085	30008919	2291980
000A4606	6622068	30008904	2291978
000A4607	6622066	30008921	2291979
000A4608	6622061	30008922	2291978
	266,2202	99,91185	229,1979

D4-7

000A4701	6622405	30008989	2352749
000A4702	6622422	30008934	2352750
000A4703	6622577	30008965	2352750
000A4704	6622577	30008997	2352765
000A4705	26622559	9991105	2352751
000A4706	26622571	9991125	2352751
000A4707	26622572	9991127	2352750
000A4708	26622590	9991138	2352750
	266,2253	99,91076	235,2752

Stazione 5

D5-6

000A5601	26248962	9999740	784297
000A5602	26249020	9999735	784299
000A5603	26249021	9999766	784298
000A5604	26249020	9999736	784298
000A5605	6249075	30000307	784298
000A5606	6248574	30000326	784297
000A5607	6248571	30000322	784296
000A5608	6248569	30000333	784297
	262,4885	99,99711	78,42975

D5-7

000A5701	6248947	30000269	845069
000A5702	6248943	30000282	845069
000A5703	6248934	30000254	845069
000A5704	6248934	30000259	845070
000A5705	26248914	9999713	845070
000A5706	26249015	9999752	845070
000A5707	26249014	9999745	845070
000A5708	26249012	9999737	845070
	262,4896	99,99735	84,50696

Stazione 6

D6-7

000A6701	26419426	9996338	60772
000A6702	26419405	9996216	60772
000A6703	26419375	9996302	60773
000A6704	26419375	9996285	60773
000A6705	6419777	30005160	60772
000A6706	6419804	30005264	60772
000A6707	6419798	30005176	60772
000A6708	6419817	30005264	60773
	264,196	99,95535	6,077238

5.3 PREPROCESSAMENTO DEI DATI SPERIMENTALI

Sulla base di quanto descritto nel paragrafo 3.4.1, nei paragrafi successivi verranno descritti i calcoli eseguiti sulle misure di distanza effettuate al fine di preparare i dati per la calibrazione vera e propria.

5.3.1 Riduzione orizzontale delle distanze inclinate

Come descritto al cap. 3.4.1.2 occorre riportare tutte le distanze inclinate relative ad entrambe le stazioni totali sull'orizzontale tramite la relazione:

$$d_{Orizzontale} = d_{Inclinata} \cdot \sin \varphi$$

Dove φ l'angolo zenitale relativo alla distanza misurata.

Il calcolo è stato effettuato mediante un foglio di calcolo Excel per tutte le misure di distanza, come si può vedere nella tabella dove è stato riportato come esempio il calcolo relativo alla distanza fra la stazione 1 e la stazione 2 relativo alla stazione totale Laica TS30:

D1-2(TS30)	Azimutale	Zenitale	Distanza Inclinata	distanze orizzontali
0121	3,66172	99,88475	42,258	
0122	3,66149	99,8844	42,2579	
0123	3,66168	99,88459	42,2579	
0124	3,66146	99,88487	42,2578	
	3,661588	99,88465	42,2579	42,2579 * sin99,88465°C= 42,2578

Di seguito vengono riportati i valori relativi alle distanze orizzontali calcolate per entrambe le stazioni totali:

TS30

Distanza orizzontale

0	2	43.7562
0	3	158.3308
0	4	345.2503
0	5	496.0188
0	6	574.4483
0	7	580.5251
1	2	42.2578
1	3	156.8330
1	4	343.7531
1	5	494.5220
1	6	572.9514
1	7	579.0280
2	3	114.5751
2	4	301.4953
2	5	452.2644
2	6	530.6940
2	7	536.7708
3	4	186.9205
3	5	337.6889
3	6	416.1180
3	7	422.1952
4	5	150.7687
4	6	229.1982
4	7	235.2753
5	6	78.4300
5	7	84.5071
6	7	6.0774

TCA 2003

Distanza orizzontale

0	2	43,7566
0	3	158,3313
0	4	345,2509
0	5	496,0198
0	6	574,4492
0	7	580,5259
1	2	42,2579
1	3	156,8322
1	4	343,7523
1	5	494,5207
1	6	572,9504
1	7	579,0271
2	3	114,5746
2	4	301,4947
2	5	452,2630
2	6	530,6923
2	7	536,7689
3	4	186,9198
3	5	337,6883
3	6	416,1176
3	7	422,1946
4	5	150,7682
4	6	229,1976
4	7	235,2750
5	6	78,4297
5	7	84,5070
6	7	6,0772

5.3.2 Correzione Atmosferica

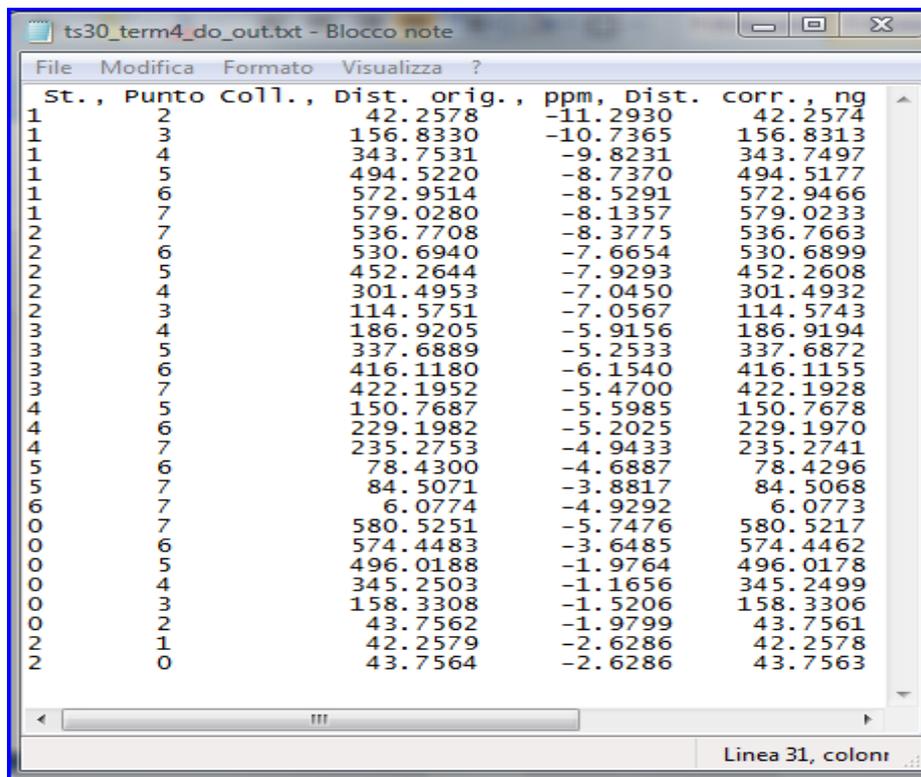
Alle distanze orizzontali sono state successivamente applicate le correzioni atmosferiche secondo il metodo di Ciddor (descritto al paragrafo 3.4.1.3) per il calcolo dell'indice di rifrazione dell'aria.

Il calcolo è stato effettuato tramite un programma di calcolo in linguaggio Fortran che implementa il metodo di Ciddor (Fig.1). Nel programma vengono inseriti i dati relativi alle distanze nella seguente forma:

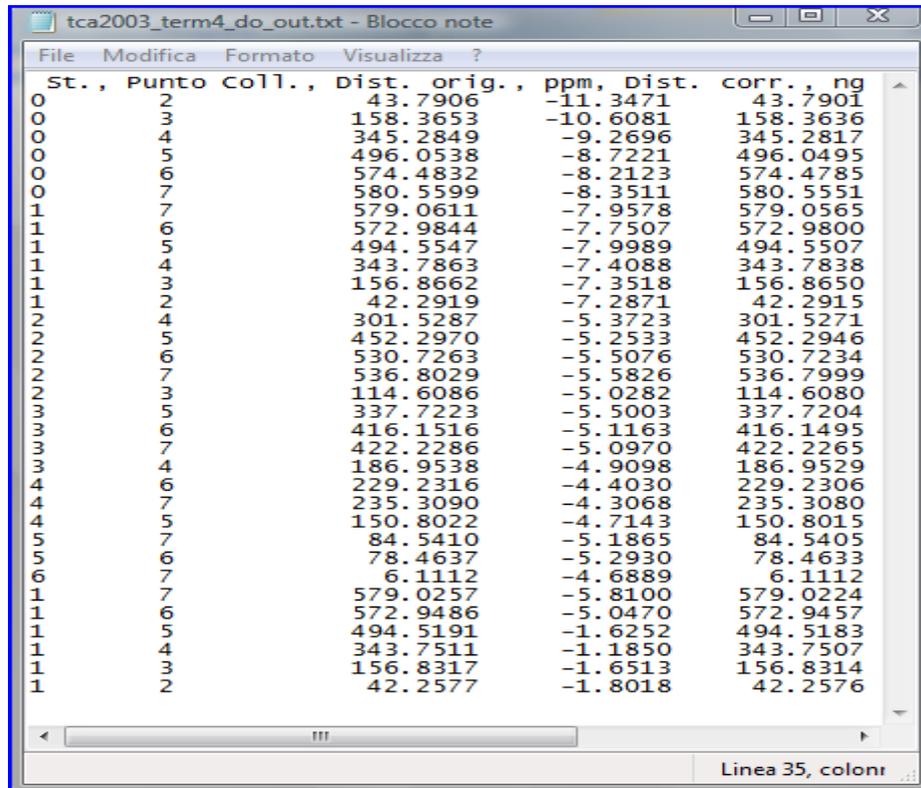
Estremi	distanza	distanza(m)	pressione(mmHg)	Temperatura(°C)	% umidità relativa
1	2	42.2578	768.5	6.4	57.3
1	3	156.8330	768.5	8.2	51.5
.	.				

Il programma restituisce un file di output con le distanze corrette già con le correzioni atmosferiche nella seguente forma:

TS30



TCA 2003

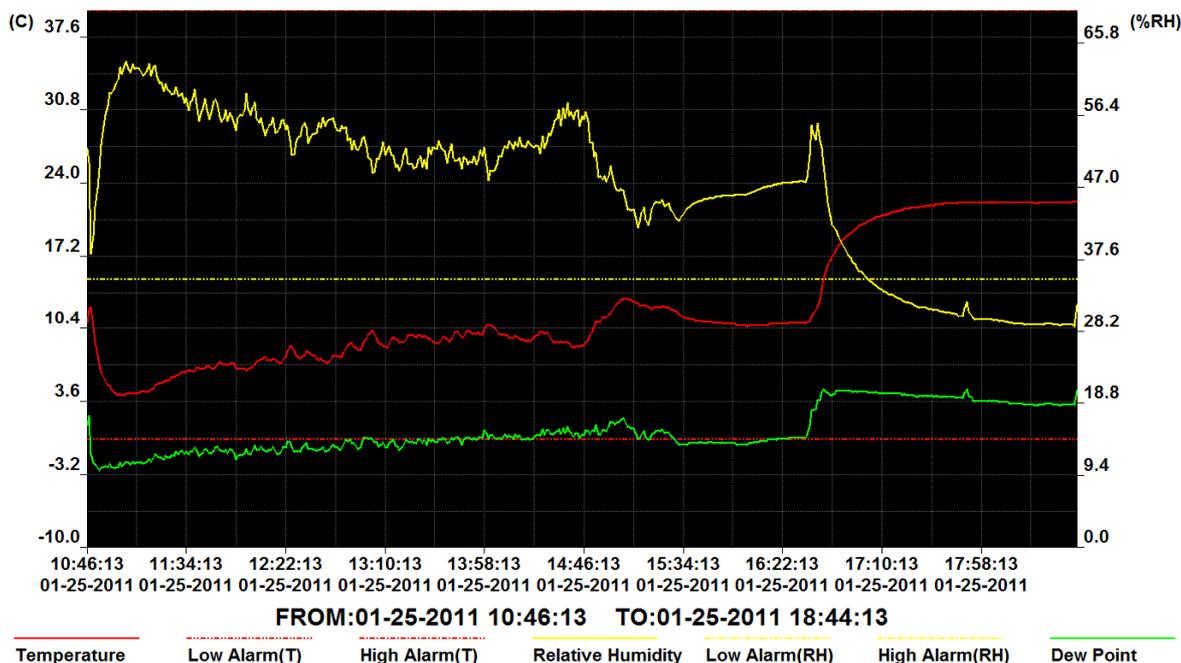


St.	Punto Coll.	Dist. orig.	ppm	Dist. corr.	ng
0	2	43.7906	-11.3471	43.7901	
0	3	158.3653	-10.6081	158.3636	
0	4	345.2849	-9.2696	345.2817	
0	5	496.0538	-8.7221	496.0495	
0	6	574.4832	-8.2123	574.4785	
0	7	580.5599	-8.3511	580.5551	
1	7	579.0611	-7.9578	579.0565	
1	6	572.9844	-7.7507	572.9800	
1	5	494.5547	-7.9989	494.5507	
1	4	343.7863	-7.4088	343.7838	
1	3	156.8662	-7.3518	156.8650	
1	2	42.2919	-7.2871	42.2915	
2	4	301.5287	-5.3723	301.5271	
2	5	452.2970	-5.2533	452.2946	
2	6	530.7263	-5.5076	530.7234	
2	7	536.8029	-5.5826	536.7999	
2	3	114.6086	-5.0282	114.6080	
3	5	337.7223	-5.5003	337.7204	
3	6	416.1516	-5.1163	416.1495	
3	7	422.2286	-5.0970	422.2265	
3	4	186.9538	-4.9098	186.9529	
4	6	229.2316	-4.4030	229.2306	
4	7	235.3090	-4.3068	235.3080	
4	5	150.8022	-4.7143	150.8015	
5	7	84.5410	-5.1865	84.5405	
5	6	78.4637	-5.2930	78.4633	
6	7	6.1112	-4.6889	6.1112	
1	7	579.0257	-5.8100	579.0224	
1	6	572.9486	-5.0470	572.9457	
1	5	494.5191	-1.6252	494.5183	
1	4	343.7511	-1.1850	343.7507	
1	3	156.8317	-1.6513	156.8314	
1	2	42.2577	-1.8018	42.2576	

Per quanto riguarda i valori da attribuire alla pressione, temperatura ed umidità relativa necessari per effettuare le correzioni, durante la sperimentazione è stato registrato su un foglio di campagna l'intervallo temporale di acquisizione delle diverse misure di distanza.

Quindi grazie ai dati registrati su di un file dagli psicrometri installati prima dell'inizio delle misure, si è attribuito ad ogni misura di distanza un valore medio dei tre parametri in questione. In particolare, si è fatto riferimento allo psicrometro posizionato sulla stazione 4, cioè quello in posizione centrale, perché è stato ritenuto il più affidabile in quanto è rimasto per tutto il periodo delle misure in condizioni di insolazione costante. Nella figura sottostante possiamo vedere il grafico restituito dallo psicrometro della temperatura (in ordinata sx) e dell'umidità relativa (in ordinata dx) in funzione del tempo.

10018139



Oltre al grafico lo psicrometro fornisce un file di testo sotto riportato da cui sono stati tratti i valori di umidità relativa e temperatura relative al periodo di acquisizione di ogni singola misura di distanza.

```

File Modifica Formato Visualizza ?
>>Logging Name:10018139
>>FROM:01-25-2011 10:46:13 TO:01-25-2011 18:44:13
>>Sample Points:479
>>Sample Rate:60 sec.
>>Temperature Unit:Celsius
>>Temperature(LowAlarm:0.0-HighAlarm:40.0) Relative Humidity
-----

```

NO.	DATE	TIME	TEMPERATURE	RELATIVE-HUMIDITY
1	01-25-2011	10:46:13	10.9	52.1
2	01-25-2011	10:47:13	12.3	50.2
3	01-25-2011	10:48:13	12.4	38.4
4	01-25-2011	10:49:13	10.6	40.7
5	01-25-2011	10:50:13	9.1	44.6
6	01-25-2011	10:51:13	8.0	46.9
7	01-25-2011	10:52:13	7.0	49.5
8	01-25-2011	10:53:13	6.3	52.6
9	01-25-2011	10:54:13	5.8	55.0
10	01-25-2011	10:55:13	5.5	56.5
11	01-25-2011	10:56:13	5.1	57.7
12	01-25-2011	10:57:13	5.0	59.3
13	01-25-2011	10:58:13	4.7	59.3
14	01-25-2011	10:59:13	4.5	59.8
15	01-25-2011	11:00:13	4.3	60.5
16	01-25-2011	11:01:13	4.2	61.2
17	01-25-2011	11:02:13	4.3	62.6
18	01-25-2011	11:03:13	4.2	61.8
19	01-25-2011	11:04:13	4.2	62.8
20	01-25-2011	11:05:13	4.3	63.4
21	01-25-2011	11:06:13	4.4	62.4
22	01-25-2011	11:07:13	4.3	62.1
23	01-25-2011	11:08:13	4.3	63.1
24	01-25-2011	11:09:13	4.3	62.5
25	01-25-2011	11:10:13	4.3	62.6
26	01-25-2011	11:11:13	4.4	62.5
27	01-25-2011	11:12:13	4.5	62.2

5.3.3 Allineamento

Per riportare le misure sull'allineamento passante per la prima (stazione 1) e l'ultima stazione (stazione 7), sono state utilizzate relazioni geometriche sfruttando le anche le misure angolari registrate.

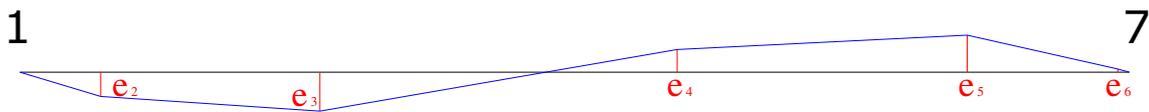
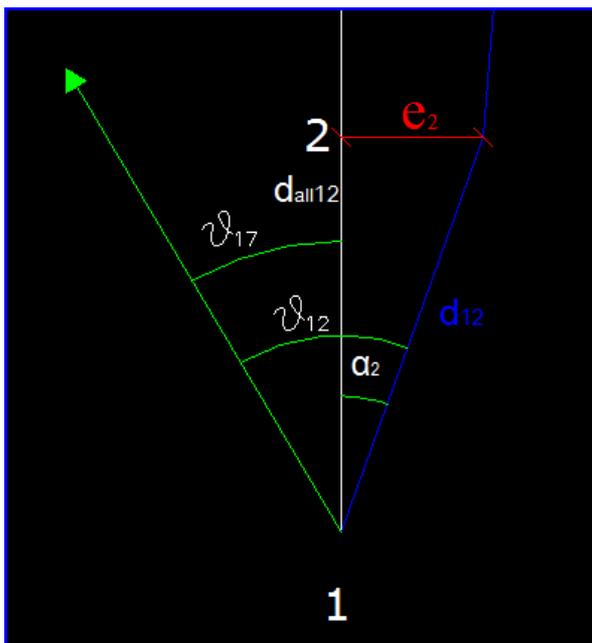


Fig.1 In blu sono riportate le distanze non allineate, da riportare sull'allineamento 1-7, mentre in rosso sono riportate le eccentricità relative alle stazioni 2, 3, 4, 5, 6.

Di seguito vengono riportati alcuni conti relativi alle operazioni di allineamento.

- Calcolo della distanza 1-2 sull'allineamento.



Si calcola l'angolo α_2 come differenza tra i due angoli azimutali ϑ_{12} e ϑ_{17} misurati:

$$\alpha_2 = \vartheta_{12} - \vartheta_{17}.$$

Noto α_2 è possibile calcolare la distanza sull'allineamento d_{all1-2} e l'eccentricità e_2 :

$$d_{all1-2} = d_{1-2} \cos \alpha_2$$

$$e_2 = d_{1-2} \sin \alpha_2$$

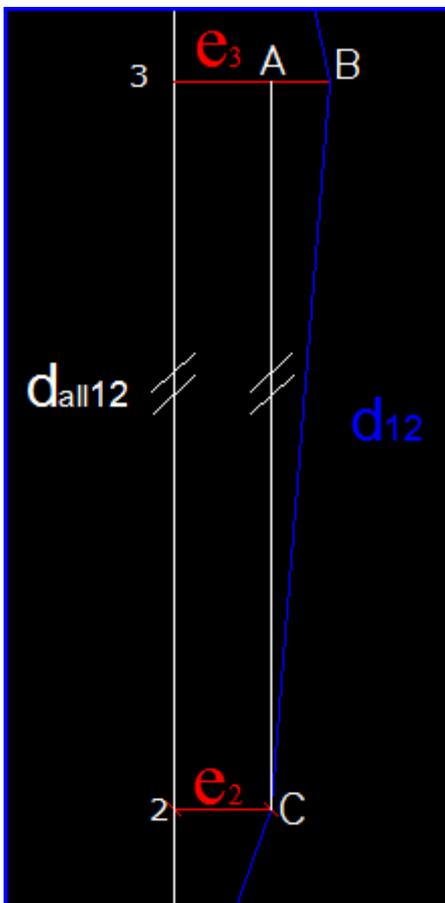
Effettuando lo stesso procedimento per le distanze d_{13} , d_{14} , d_{15} , d_{16} , si calcolano le rispettive distanze sull'allineamento e tutte le eccentricità, i cui valori sono riportati nella tabella sottostante:

$e_2 = 0,157232m$
$e_3 = 0,249669m$
$e_4 = -0,14425m$
$e_5 = -0,23993m$
$e_6 = -0,02232m$

Note tutte le eccentricità il calcolo delle distanze intermedie sull'allineamento è stato effettuato tramite il teorema di Pitagora.

Di seguito viene riportato un esempio relativo al calcolo della distanza sull'allineamento tra la stazione 2 e la stazione 3.

- Calcolo della distanza 2-3 sull'allineamento:



Note le eccentricità e_2 ed e_3 , facendo la differenza $e_3 - e_2$ si calcola il cateto AB del triangolo rettangolo ABC riportato in figura.

Quindi la distanza 1-2 sull'allineamento viene calcolata tramite il teorema di Pitagora come:

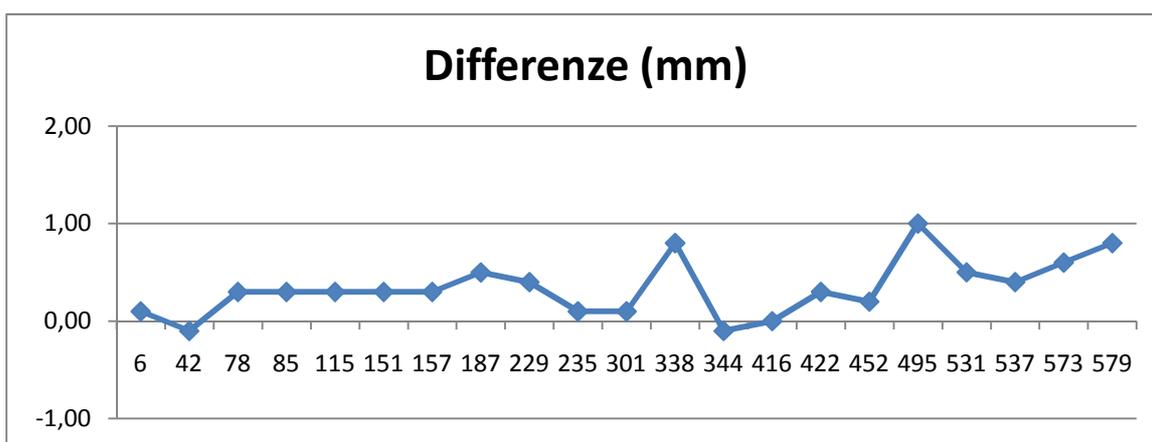
$$d_{all12} = \sqrt{d_{12}^2 - (e_3 - e_2)^2}$$

Questa procedura è stata effettuata per tutte le misure di distanza di entrambe le stazioni totali utilizzate.

Effettuato l'allineamento si sono ottenute le distanze corrette dagli effetti sistematici precedentemente descritti, e quindi il set di misure da utilizzare nella calibrazione che viene riportato nella tabella sottostante:

	tca2003	ts30	ts30-tca (differenze)
1-2	42,2572	42,2571	-0,1
1-3	156,8308	156,8311	0,3
1-4	343,7498	343,7497	-0,1
1-5	494,5166	494,5176	1,0
1-6	572,9460	572,9466	0,6
1-7	579,0225	579,0233	0,8
2-3	114,5740	114,5743	0,3
2-4	301,4929	301,4930	0,1
2-5	452,2604	452,2606	0,2
2-6	530,6894	530,6899	0,5
2-7	536,7659	536,7663	0,4
3-4	186,9185	186,9190	0,5
3-5	337,6860	337,6868	0,8
3-6	416,1154	416,1154	0,0
3-7	422,1924	422,1927	0,3
4-5	150,7675	150,7678	0,3
4-6	229,1966	229,1970	0,4
4-7	235,2740	235,2741	0,1
5-6	78,4290	78,4293	0,3
5-7	84,5062	84,5065	0,3
6-7	6,0772	6,0773	0,1
0-2	43,7558	43,7558	0,0
0-3	158,3294	158,3304	1,0
0-4	345,2477	345,2499	2,2
0-5	496,0154	496,0177	2,3
0-6	574,4445	574,4462	1,7
0-7	580,5211	580,5217	0,6

Una prima operazione che è possibile effettuare è quella di calcolare le differenze tra le misure di distanza effettuate con le due stazioni totali che vengono riportate in grafico nella figura sottostante. Come è possibile osservare, le misure si scostano al massimo di 1 mm sulla distanza 1-4 (494,5166-494,5176= 1 mm), come da attendersi date le precisioni degli strumenti utilizzati.



5.4 CALCOLO DEI PARAMETRI DI CALIBRAZIONE

5.4.1 Calcolo della costante additiva secondo norma ISO 17123-4.

Come descritto al paragrafo 3.1.4.3 sul calcolo della costante additiva e della lunghezza della baseline che viene assunta incognita, di seguito verranno riportati i risultati relativi a questo metodo applicato su entrambe le stazioni totali.

Come già detto in questo metodo i parametri sconosciuti sono le sei distanze “vere” $\bar{x}_{1,2}, \bar{x}_{2,3}, \dots, \bar{x}_{6,7}$ e la correzione del punto zero δ (costante additiva). Di seguito vengono riportati i calcoli realizzati mediante un foglio di calcolo Excel:

Ts30

	dist misurate	residui (mm)	Distanze compensate	Residui (m)	residui ²
1-2	42,25710748	0,04	42,2568	0,0000	1,51535E-09
1-3	156,8311013	0,01	156,8308	0,0000	6,56321E-11
1-4	343,7496697	0,14	343,7495	0,0001	1,87686E-08
1-5	494,5176418	-0,18	494,5171	-0,0002	3,26294E-08
1-6	572,9465996	-0,12	572,9462	-0,0001	1,43722E-08
1-7	579,0233	0,12	579,0231	0,0001	1,35707E-08
2-3	114,5742627	0,02		0,0000	2,75342E-10
2-4	301,4930493	-0,07		-0,0001	5,27028E-09
2-5	452,2606256	0,01		0,0000	3,00592E-11
2-6	530,6898696	-0,22		-0,0002	4,8404E-08
2-7	536,766277	0,31		0,0003	9,57638E-08
3-4	186,9189849	0,03		0,0000	8,28839E-10
3-5	337,6868451	-0,18		-0,0002	3,1307E-08
3-6	416,1154111	0,28		0,0003	7,59276E-08
3-7	422,1927262	-0,10		-0,0001	1,05487E-08
4-5	150,7677696	0,20		0,0002	4,04547E-08
4-6	229,1969676	0,02		0,0000	4,72138E-10
4-7	235,2740558	-0,13		-0,0001	1,68146E-08
5-6	78,42929811	0,04		0,0000	1,35124E-09
5-7	84,5064594	-0,19		-0,0002	3,52376E-08
6-7	6,077259014	-0,01		0,0000	3,429E-11

CALCOLO PARAMETRI A	
a4	0,000
a5	-0,001546033
a6	-0,001381878

CALCOLO PARAMETRI B	
b1	312,7608
b2	270,5039
b3	155,9298
b4	-30,9890
b5	

b6	-260,1858	
b7	-266,2629	
COSTANTE ADDITIVA C		
c	-0,0003	-0,32
	m	mm
DEVIAZIONE STANDARD SPERIMENTALE DELLE MISURE DI DISTANZA DISTANZA		
s	0,00018	0,18
	m	mm
DEVIAZIONE STANDARD DELLA COSTANTE ADDITIVA		
s_c	0,00008	0,08
	m	mm

Al fine dell'interpretazione dei risultati sono raccomandati alcuni test statistici che consentono di valutare l'attendibilità dei valori calcolati.

I test statistici devono essere effettuati utilizzando la deviazione standard sperimentale (s) di una distanza misurata sull'allineamento, la correzione la correzione del punto zero (C) e sua deviazione standard sperimentale (Sc), al fine di stabilire se la deviazione standard sperimentale calcolata (s) sia più piccola del corrispondente valore contenute nelle specifiche tecniche dello strumento (σ) e se la costante additiva sia nulla così come dichiarato dal costruttore (tabella 1).

Per effettuare i test viene assunto un livello di confidenza pari ad $1-\alpha=95\%$ e, secondo il progetto dello schema delle misure, un numero di gradi di libertà pari a $n=14$.

DOMANDA	IPOTESI NULLA	IPOTESI ALTERNATIVA
a)	$s \leq \sigma$	$s > \sigma$
b)	$C = C_0$	$C \neq C_0$

Tabella 1-Test statistici

- a) L'ipotesi nulla afferma che la deviazione standard sperimentale s , è inferiore o uguale al valore teorico fornito dalla casa costruttrice (σ); si accetta l'ipotesi nulla se è soddisfatta la seguente condizione:

$$s \leq \sigma \sqrt{\frac{23.68}{14}}$$

$$s \leq \sigma \times 1.3$$

- b) L'ipotesi di uguaglianza delle costanti additive è accettata se è soddisfatta la seguente condizione :

$$|C - C_0| \leq \frac{s}{\sqrt{5}} \times 2.14$$

Altrimenti l'ipotesi nulla viene respinta in entrambi i casi.

Ora applichiamo i due test statistici sui dati sperimentali:

$$a) s \leq \sigma \times 1.3 \quad 0.18 \leq 0.6 \times 1.3$$

$$0.18 \leq 0.78 \rightarrow \text{quindi } s \leq \sigma$$

$$b) |C - C_0| \leq \frac{s}{\sqrt{5}} \times 2.14 \rightarrow 0.32 \leq \frac{0.18}{\sqrt{5}} \times 2.14$$

$$0.32 \leq 0.17$$

TCA2003

	distanze misurate	residui (mm)	distanze compensate	residui	residui²
1-2	42,25720772	-0,27	42,2567	-0,0003	7,47479E-08
1-3	156,8308013	0,04	156,8306	0,0000	1,90537E-09
1-4	343,7497697	-0,29	343,7493	-0,0003	8,64104E-08
1-5	494,5166418	0,24	494,5167	0,0002	5,5738E-08
1-6	572,9459996	-0,07	572,9457	-0,0001	4,85838E-09
1-7	579,0225	0,36	579,0227	0,0004	1,27677E-07
2-3	114,5739627	0,15		0,0001	2,16802E-08
2-4	301,4929493	-0,21		-0,0002	4,34713E-08
2-5	452,2604256	-0,28		-0,0003	7,99383E-08
2-6	530,6893696	-0,17		-0,0002	3,05414E-08
2-7	536,765877	0,25		0,0002	6,01966E-08
3-4	186,918485	0,35		0,0003	1,19126E-07
3-5	337,6860451	0,19		0,0002	3,50214E-08
3-6	416,1154111	-0,13		-0,0001	1,61015E-08
3-7	422,1924262	-0,21		-0,0002	4,60114E-08
4-5	150,7674696	0,13		0,0001	1,73668E-08
4-6	229,1965676	0,09		0,0001	7,36738E-09
4-7	235,2739558	-0,37		-0,0004	1,40568E-07
5-6	78,42899824	0,25		0,0003	6,40384E-08
5-7	84,50615953	0,02		0,0000	3,69417E-10
6-7	6,077159242	-0,03		0,0000	1,05387E-09

CALCOLO PARAMETRI A

a4	-0,001
a5	-0,000646267
a6	-0,000782563

CALCOLO PARAMETRI B

b1	312,7604
b2	270,5036
b3	155,9297
b4	-30,9890
b5	
b6	-260,1856
b7	-266,2626

COSTANTE ADDITIVA C		
c	-0,0002	-0,20
	(m)	(mm)
DEVIAZIONE STANDARD SPERIMENTALE DELLA DISTANZA		
s	0,00027	0,27
	(m)	(mm)
DEVIAZIONE STANDARD DELLA COSTANTE ADDITIVA		
sc	0,00012	0,12
	(m)	(mm)

Test statistici:

$$a) s \leq \sigma \times 1.3 \quad 0.27 \leq 1 \times 1.3$$

$$0.27 \leq 1.3$$

$$b) |C - C_0| \leq \frac{s}{\sqrt{5}} \times 2.14 \rightarrow 0.2 \leq \frac{0.27}{\sqrt{5}} \times 2.14$$

$$0.2 \leq 0.26$$

In questo caso, poiché in entrambi i casi, si possono accattare le ipotesi nulle, i test confermano le certificazioni fornite dal costruttore.

5.4.2 Calcolo della costante additiva e della correzione di scala per distanziometro TCA2003 su allineamento con lunghezze note.

Questo procedimento viene descritto al paragrafo 3.4.2.2 sul calcolo della costante additiva e della correzione di scala (che sono le uniche due incognite) su allineamento con lunghezze note.

Con questo procedimento vengono calcolati i due parametri incogniti tramite una regressione lineare, ed assumendo come “vere” le distanze misurate con la stazione TS30, essendo di recente acquisto e con

precisione maggiore, si calcolano i parametri di calibrazione relativi alla stazione totale TCA2003. Di seguito vengono riportati i calcoli effettuati mediante un foglio di calcolo Excel:

Distanze note (TS30)	Distanze misurate (TCA2003)				
x	y	x ²	xy	a+bx-y	(a+bx-y) ²
42,25710748	42,25720772	1785,663133	1785,6674	-0,00025	6,07979E-08
156,8311013	156,8308013	24595,99432	24595,947	6,8E-05	4,6186E-09
343,7496697	343,7497697	118163,8354	118163,87	-0,00047	2,22547E-07
494,5176418	494,5166418	244547,698	244547,2	0,000516	2,65771E-07
572,9465996	572,9459996	328267,806	328267,46	5,69E-05	3,23722E-09
579,0233	579,0225	335267,9819	335267,52	0,000252	6,36822E-08
114,5742627	114,5739627	13127,26168	13127,227	9,96E-05	9,91718E-09
301,4930493	301,4929493	90898,05875	90898,029	-0,00024	5,76815E-08
452,2606256	452,2604256	204539,6735	204539,58	-0,00025	6,39515E-08
530,6898696	530,6893696	281631,7377	281631,47	-1,2E-05	1,32533E-10
536,766277	536,765877	288118,0361	288117,82	-0,00012	1,34687E-08
186,9189849	186,918485	34938,70692	34938,613	0,000245	6,02376E-08
337,6868451	337,6860451	114032,4053	114032,14	0,000433	1,87275E-07
416,1154111	416,1154111	173152,0354	173152,04	-0,00043	1,81354E-07
422,1927262	422,1924262	178246,698	178246,57	-0,00013	1,70039E-08
150,7677696	150,7674696	22730,92036	22730,875	7,25E-05	5,26051E-09
229,1969676	229,1965676	52531,24994	52531,158	0,000114	1,29719E-08
235,2740558	235,2739558	55353,88132	55353,858	-0,00019	3,63477E-08
78,42929811	78,42899824	6151,154802	6151,1313	0,000126	1,59997E-08
84,5064594	84,50615953	7141,34168	7141,3163	0,000122	1,48694E-08
6,077259014	6,077159242	36,93307713	36,932471	-2E-05	3,80804E-10

$y=a+bx$	$IC=-a+(1-b)x$
----------	----------------

N=21

$\sum x$	6272,275281
$\sum x^2$	2575259,073
$(\sum x)^2$	39341437,2

Σxy	2575256,428
Σy	6272,268182
$\Sigma (a+bx-y)^2$	1,29751E-06

a = -0,000114743
b = 0,999999252

Deviazione standard della singola misura di distanza		
S₀	0,261323061	mm
Deviazione standard della costante additiva		
S_a	0,10923307	mm
Deviazione standard della correzione di scala		
S_b	0,311927256	ppm

Intervallo di confidenza;
si moltiplica s_a ed s_b per
2,093



⇒ 0,228625

⇒ 0,652864

$$IC = 0.1\text{mm} + 0.75 (D/1000)$$

5.4.3 Calcolo della costante additiva e della correzione di scala tramite regressione lineare su schema di Hobart.

Trattandosi di una prima occasione di sperimentazione sulla calibrazione di EDM, si è deciso provare la metodologia basata sullo schema di Hobart (paragrafo 3.1.3) materializzando anche una stazione ausiliaria (stazione 0) posta ad 1,5 m prima della stazione 1. Questo schema permette di determinare la costante additiva e la correzione di scala con semplici regressioni lineari (paragrafo 3.4.2.2), assumendo anche in questo caso come “vere” distanze quelle relative alla stazione TS30. Di

seguito vengono riportati i calcoli effettuati mediante un foglio di calcolo

Excel:

	distanze note (ts30)	distanze misurate (tca2003)					
	x	y	x ²	xy	a+bx-y	(a+bx-y) ²	residui (mm)
1-2	42,25710748	42,25720772	1785,663133	1785,6674	-0,00037	1,35044E-07	-0,36748
1-3	156,8311013	156,8308013	24595,99432	24595,947	-0,00018	3,12216E-08	-0,1767
1-4	343,7496697	343,7497697	118163,8354	118163,87	-0,00092	8,4325E-07	-0,91829
1-5	494,5176418	494,5166418	244547,698	244547,2	-9,4E-05	8,80687E-09	-0,09384
1-6	572,9465996	572,9459996	328267,806	328267,46	-0,00064	4,06005E-07	-0,63719
1-7	579,0233	579,0225	335267,9819	335267,52	-0,00045	2,00965E-07	-0,44829
0-2	43,75581741	43,75581763	1914,571557	1914,5716	-0,00027	7,30114E-08	-0,27021
0-3	158,3304031	158,3294031	25068,51655	25068,358	0,000521	2,70988E-07	0,520565
0-4	345,2498699	345,2476699	119197,4726	119196,71	0,001379	1,90156E-06	1,378972
0-5	496,017742	496,015442	246033,6004	246032,46	0,001203	1,4482E-06	1,203414
0-6	574,4461996	574,4444996	329988,4362	329987,46	0,00046	2,11668E-07	0,460074
0-7	580,5217	580,5211	337005,4442	337005,1	-0,00065	4,2384E-07	-0,65103

$y=a+bx$	$IC=-a+(1-b)x$
----------	----------------

N=12

$\sum x$	4387,647152
$\sum x^2$	2111837,02
$(\sum x)^2$	19251447,53
$\sum xy$	2111832,327
$\sum y$	4387,636852
$\sum (a+bx-y)^2$	5,95457E-06

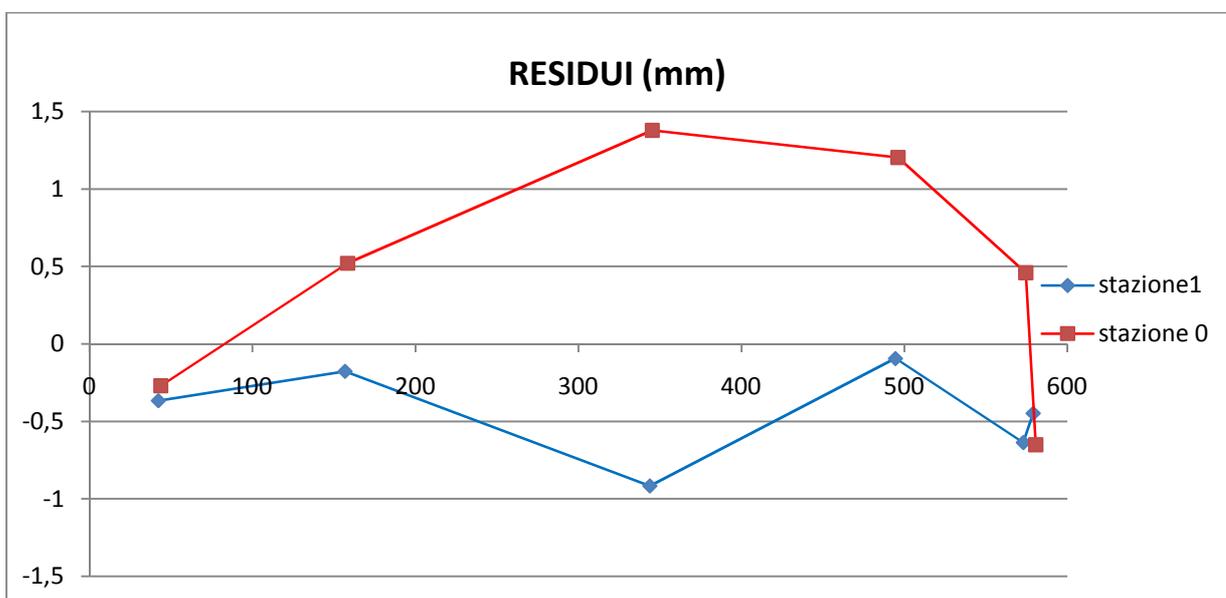
a	-0,000190015
b	0,999998172

S₀	0,771658463	mm
S_a	0,45438648	mm
S_b	1,083143067	ppm

Intervallo di confidenza
0,951031
2,267018

$$IC = 0.2\text{mm} + 1.83 (D/1000)$$

Nel grafico sottostante vengono visualizzati i residui relativi alla stazione 0 e quelli relativi alla stazione 1, in funzione della distanza.



5.4.4 Risultati

In questo paragrafo vengono riportati a confronto i vari risultati ottenuti dalle diverse metodologie di calcolo utilizzate nella sperimentazione.

- I. Per quanto riguarda il calcolo della costante additiva secondo norma ISO 17123-4, la lunghezza dell'allineamento viene assunta incognita, quindi si ottengono risultati indipendenti tra i due distanziometri utilizzati, che vengono di seguito riportati:

	TS30	TCA2003
Costante Additiva	-0.32 mm	-0.2 mm
Deviazione Standard Distanze	0.18 mm	0.27 mm
Deviazione Standard Costante Additiva	0.08 mm	0.12 mm

- II. Nel calcolo della costante additiva e della correzione di scala per il distanziometro TCA2003 su allineamento con lunghezze note, sono state assunte come “vere” le distanze misurate con la stazione TS30 essendo di precisione strumentale maggiore e di acquisto più recente. Si sono ottenuti i seguenti risultati:

	TCA2003
Costante Additiva	0.1 mm
Correzione di Scala	0.75 ppm
Deviazione Standard Distanze	0.26 mm
Deviazione Standard Costante Additiva	0.11 mm
Deviazione standard della correzione di scala	0.32 ppm

III. Nel calcolo della costante additiva e della correzione di scala tramite regressione lineare su schema di Hobart abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

	TCA2003
Costante Additiva	0.2 mm
Correzione di Scala	1.83 ppm
Deviazione Standard Distanze	0.77 mm
Deviazione Standard Costante Additiva	0.45 mm
Deviazione standard della correzione di scala	1.08 ppm

CONCLUSIONI

I risultati ottenuti devono essere confrontati con le precisioni strumentali dichiarate dalla casa costruttrice per le distanze, ossia di:

- (0.6 mm + 1 ppm) per la stazione totale Leica TS30,
- (1 mm + 1 ppm) per la stazione totale Leica TCA2003.

In generale possiamo affermare che i due strumenti utilizzati per la sperimentazione rispettano tali precisioni, in quanto per i primi due metodi utilizzati, ossia il calcolo della costante additiva secondo norma ISO 17123-4 e nel calcolo della costante additiva e della correzione di scala per il distanziometro TCA2003 su allineamento con lunghezze note, sia la costante additiva che la correzione di scala rientrano nelle precisioni strumentali.

Nello schema di Hobart invece abbiamo che la correzione di scala per la stazione TCA2003 è pari a 1.83 ppm, quindi maggiore di 1 ppm dichiarato dalla casa costruttrice, ma dobbiamo tener conto del fatto che questo metodo risulta meno ridondante (quindi meno affidabile) degli altri due in quanto dispone soltanto di dodici misure di distanza. Sempre riguardo a questo dato si deve considerare inoltre il fatto che siano state assunte, quali distanze note, quelle rilevate con la stazione più precisa (la stazione Leica TS30); in realtà anch'essa presenta una indeterminazione nominale sulla distanza di 0.6 mm, quale errore di base più una componente proporzionale di 1mm/km. Per tale motivo il valore riscontrato per la correzione di scala, anche con il metodo di Hobart è di poco superiore alla significatività della stima stessa, a causa della propagazione della varianza nella determinazione congiunta delle due misure.

Ricordiamo inoltre che si è optato per una materializzazione semplice con chiodi infissi nella pavimentazione stradale prevedendo di stazionare sui vertici con treppiede, mentre sarebbe stata sicuramente preferibile, anche se non praticabile nell'ambito di questa tesi, la realizzazione di pilastri in calcestruzzo per il centramento forzato in quanto stiamo operando su precisioni inferiori al millimetro.

Per quanto riguarda la stima dell'errore ciclico sono state effettuate delle prove sui dati relativi allo schema di Hobart in quanto dispone di misure dalla stazione 1 e dalla stazione 0 (posta ad 1,5 m prima della stazione 1, cioè metà unità di lunghezza dello strumento) e quindi praticamente in opposizione di fase rispetto a tale effetto. Il numero limitato di campionamenti offerti da tale metodo però non permettono una robusta valutazione della componente ciclica. Per una corretta stima dell'errore ciclico si devono pertanto predisporre ulteriori poligoni di calibrazione materializzati ad hoc, oppure utilizzare specifici test di laboratorio attraverso misure interferometriche, possibili solo presso alcuni laboratori di ricerca specialistici non disponibili in Italia.

BIBLIOGRAFIA

- Bayoud Fadi A. 2006 “Leica’s Pinpoint EDM Technology with Modified Signal Processing and Novel Optomechanical Features” Proceedings FIG Meeting – Munich, 2006
- Ciddor P. E. 1996 “Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared”. *Appl. Opt.* 35, 1566–1573
- Ciddor P. E. , Hill R. J. 1999 “ Refractive Index of Air. 2. Group Index”. *Applied Optics (Lasers, Photonics and Environmental Optics)*, 38, 1663–1667
- Deaking, R. 1983 “A Guide to EDM Calibration” Department of Surveying, Royal Melbourne Institute of Technology. INTERNATIONAL FEDERATION OF SURVEYORS (FIG) 1994 “Recommended Procedures for Routine Checks of Electro-Optical Distance Meters” Technical Monograph No.9 1994, 17 pages.
- Leica-Geosystems –Leica TCA2003 (TPS System 1000) User Manual
- Leica-Geosystems –Leica TS30 and TM30 Technical data
- Leica-Geosystems –Leica TS30 and TM30 White paper
- Leica-Geosystems – Manuale di utilizza della stazione totale di alta precision TS30
- Rüeger, J.M., 1977. Design and Use of Baselines for the Calibration of EDM Instruments. Proc., 20th Australian Survey Congress, Darwin, 175-189
- Rüeger, J.M., 1980. Legal Requirements for the Calibration of EDM-Instruments. Proc., 22nd Australian Survey Congress, Hobart, 1980, 10-1 - 10-10.
- Rüeger, J. M., 1991. Legal Calibration of Electronic Distance Meters in Australia. *The Australian Surveyor*, 36(3): 195-212.
- Rüeger, J. M., 1996. Electronic Distance Measurement - An Introduction. Fourth corrected edition. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, xix+276 pages.
- Rüeger, J. M. 2003. *Electronic Surveying Instruments - A Review of Principles, Problems and Procedures*, 1st ed. School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales, Sydney, Australia, x + 156 pages.
- Shofield W., Breach M. 2007 “Engineering Surveying”, Sixth Edition, Elsevier, 637 pp.
- Sprent, A, Zwart P.R. 1978 “EDM Calibration - A Scenario” *The Australian Surveyor Vol 29 No. 3 September 1978 pp. 157-169.*
- L. Vittuari, P. Sarti, P. Sillard, P. Tomasi, M. Negusini, Surveying the GPS-VLBI Eccentricity at Medicina: Methodological Aspects and Practicalities, in: , *IERS Technical Note, FRANKFURT, BERND RICHTER, WOLFGANG SCHWEGMANN, 2005, pp. 38 – 48.*