

Metodologia per la determinazione con alta precisione del dislivello esistente tra due punti nell'attraversamento di zone impraticabili

Gabriele Bitelli (*), Gianfranco Roncari (**), Maria Alessandra Tini (*), Luca Vittuari (*)

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna
Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, e-mail: [gabriele.bitelli; mariaalessandra.tini; luca.vittuari] @unibo.it

(**) ENI s.p.a.

Riassunto

L'avvento sul mercato di stazioni totali topografiche di alta precisione, caratterizzate da incertezze nominali nelle misure angolari di $\pm 0.5''$ e precisioni del distanziometro di $\pm (0.6 \text{ } 1.0 \text{ mm} + 1 \text{ p.p.m})$, consente oggi di effettuare, mediante idonee metodologie di rilevamento, collegamenti altimetrici con precisioni che possono essere quasi paragonabili a quelle ottenibili con la livellazione geometrica di alta precisione su linea. Tale caratteristica è in particolare di grande interesse laddove non sia possibile procedere alla livellazione geometrica per motivi logistici o di altro tipo: un esempio è rappresentato dai collegamenti altimetrici che devono superare aree impraticabili, per esempio nell'attraversamento di corsi d'acqua richiesto dallo sviluppo di lunghe linee di livellazione realizzate per il controllo dei movimenti del suolo. Attualmente tali collegamenti altimetrici in aree impraticabili vengono effettuati principalmente mediante l'impiego di livelli ottico-meccanici usati in modo reciproco, con una procedura che presenta tuttavia alcune difficoltà. Nel presente lavoro sono mostrati i risultati raggiunti in alcune sperimentazioni condotte nell'attraversamento di bracci di mare o bocche di porto, di larghezza compresa tra i 71 metri e circa un chilometro. In particolare viene descritta la sperimentazione effettuata mediante l'impiego principale di due stazioni totali robotiche di alta precisione (Leica Geosystems modelli TS30 e TCA2003), utilizzate in misure simultanee e reciproche presso le rive opposte, sia su di un poligono di test realizzato ad hoc che in condizioni di reale produzione.

Introduzione

Nell'ambito delle misure di controllo dei movimenti verticali del suolo su vaste aree, talvolta è necessario effettuare l'attraversamento di corsi d'acqua o di aree impraticabili, nelle quali non possono essere utilizzate le usuali metodologie di rilevamento su linea mediante livellazione geometrica dal mezzo. Storicamente tali collegamenti altimetrici sono stati realizzati principalmente mediante l'impiego di livelli accoppiati di tipo ottico-meccanico, nella metodologia descritta ad esempio in Gubellini, (1972) per l'attraversamento delle bocche di porto a Venezia (Chioggia, Malamocco, Lido). In quella sperimentazione vennero utilizzate due coppie di autolivelli muniti di un particolare dispositivo ottico a cuneo rotante, in sostituzione dell'usuale micrometro a lamina piano parallela (sistema di quattro autolivelli Zeiss Ni2 e mire realizzato appositamente dalla Società Zeiss per l'attraversamento dei corsi d'acqua).

Secondo questa metodologia ciascuna coppia di autolivelli viene posta in stazione su di un unico treppiede per mezzo di una rigida piastra di appoggio dotata di livella sferica. Al fine di eliminare l'errore residuo di orizzontalità della linea di mira i due autolivelli accoppiati vengono adattati all'infinito e posti in posizione di collimazione reciproca. In questa posizione infatti le linee di mira della coppia di strumenti risultano parallele tra loro, inclinate della stessa quantità rispetto all'orizzontale, ma una volta che i due strumenti vengono ruotati in posizione di lettura, una linea di mira punterà verso l'alto e l'altra verso il basso della stessa quantità. La stabilità di tale angolo è

affidata, nel breve periodo necessario per la lettura, alla sensibilità del compensatore pendolare, che per questi livelli è di $\pm 0.2''$. La media delle due letture eseguite con gli strumenti accoppiati risulterà quindi equivalente a quella eseguita da un unico strumento con linea di mira quasi perfettamente orizzontale. Le letture alle stadiie verrebbero però eseguite in questo modo a stima; al fine di poter effettuare invece una collimazione di precisione mediante coincidenza di immagini, si agisce sulla regolazione del cuneo posto davanti all'obiettivo di ciascun livello, rotante mediante una vite micrometrica. Attraverso questa operazione di inclinazione controllata della linea di mira viene realizzata la collimazione di una coppia di mire di grandi dimensioni, appositamente realizzate per le lunghe distanze, messe in stazione sulla riva opposta dell'attraversamento e disposte sulla verticale grazie ad un apposito supporto. Il sostegno è realizzato in modo tale da poter scegliere la posizione reciproca dei segnali secondo tre possibili valori di dislivello (20-40-60 cm) con una precisione di tali valori al decimo di mm. Il collegamento altimetrico tra la mira inferiore e il caposaldo di livellazione è poi eseguito localmente, mediante una serie di letture ad una stadia posta in stazione sul caposaldo di riferimento.

In modo analogo e contemporaneo sono effettuate le misure dall'altra riva, compensando così anche l'effetto indotto dalla rifrazione simmetrica dell'aria, quindi come sorgente residuale di errore dell'intero metodo resta principalmente l'effetto della rifrazione asimmetrica.

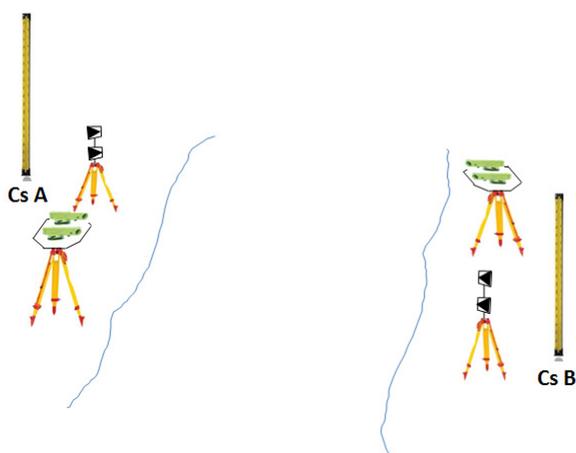


Figura 1 – Schema della configurazione strumentale necessaria per l'esecuzione di misure di collegamento altimetrico attraverso aree impraticabili, tramite l'impiego di livelli accoppiati.

Tale metodo fu adottato anche dall'IGM nel 1968 quando effettuò le misure per conto del Magistrato alle Acque di Venezia, per l'attraversamento delle bocche di porto. Dalla sperimentazione effettuata in quegli anni venne dimostrato che questo metodo di misura può consentire precisioni paragonabili, in termini di errore chilometrico, con quelle raggiungibili mediante livellazione geometrica dal mezzo di alta precisione su linea.

Presso la Facoltà di Ingegneria di Bologna furono realizzate negli anni '70 numerose sperimentazioni di tale metodo (Gubellini, 1972, De Sanctis et al, 1973) evidenziandone il limite di applicabilità a distanze massime di 2-3 km e raggiungendo precisioni chilometriche fino a $\pm 0.5 \text{ mm} \cdot \sqrt{d(\text{km})}$. Purtroppo però, questo metodo non consente oggi una larga diffusione perché richiederebbe una strumentazione opportunamente realizzata ormai non più commercializzata.

Gatti e Tomassi (1990) sperimentarono una versione semplificata del metodo suddetto basato sull'impiego simultaneo e reciproco della livellazione geometrica su lunga distanza. In questo caso i livelli ottico-meccanici impiegati sono soltanto due (uno per parte) e le letture avvengono

direttamente alle stadiе tramite l'applicazione di una mira scorrevole di grandi dimensioni applicata direttamente alla struttura scatolare esterna della stadia stessa (Fig. 2).

Questo metodo grazie alla sua semplicità di impiego e alla possibilità di raggiungere comunque in condizioni di rettifica strumentali ottimali la precisione chilometrica nella stima del dislivello di $\pm 5\text{mm}/\sqrt{d(\text{km})}$, è entrato a far parte delle specifiche tecniche adottate da ENI S.p.A. per le misure altimetriche attraverso le aree impraticabili. La rettifica strumentale però diventa molto importante, in quanto le variazioni nell'orizzontalità della linea di mira dovute alle diverse condizioni di temperatura dei due strumenti modificano la stima del dislivello. Gli autori della metodologia indicano pertanto come necessaria la verifica delle calibrazioni strumentali prima e dopo le misure stesse e prevedono lo scambio degli strumenti a metà di ciascuna sessione di misura della mattina e/o del pomeriggio.



Figura 2 – Da sinistra a destra schema semplificato di attraversamento mediante livelli in posizione reciproca ed esempio di mira collegata alla stadia per le letture da grandi distanze.

Livellazione Trigonometrica

La livellazione trigonometrica (LT) è anch'essa una tecnica di rilievo topografico per la misura dei dislivelli, è stata ampiamente studiata dalla comunità scientifica ed è tuttora frequentemente utilizzata nelle operazioni di rilevamento topografico. La LT si basa sulla misura degli angoli zenitali, oggi giorno contestuali alle misure di distanza in quanto effettuate in genere mediante stazioni totali topografiche.

In particolare, la descrizione delle tecniche di rilevamento di angoli zenitali simultanei e reciproci è largamente trattata in letteratura, ad es. Jordan et al. (1956), Inghilleri (1974), Kahmen & Faig (1988), Schofield & Breach (2007), Tsoulis et al. (2008). Alcuni interessanti studi sono stati fatti per la individuazione di metodologie, alternative alla livellazione geometrica, nella misura dei dislivelli con alta precisione e tra queste tecniche si trova sicuramente la livellazione trigonometrica utilizzata in modalità simultanea e reciproca e differenziale (Gubellini & Unguendoli, 1987).

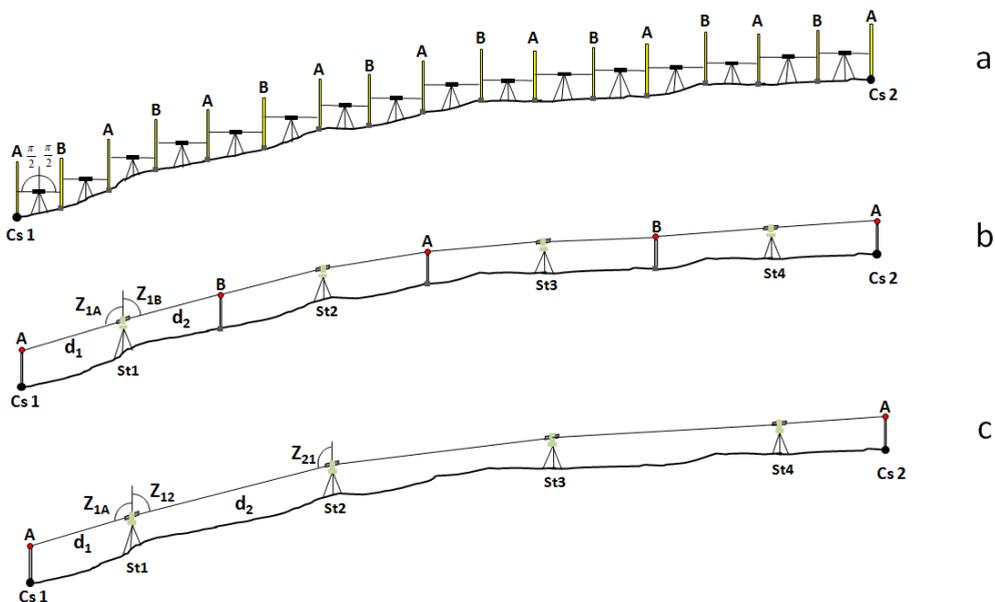


Figura 3 – Schema di utilizzo delle tecniche di livellazione geometrica per la misura di un dislivello esistente tra due capisaldi Cs1 e Cs2 (a), messo a confronto con la LT differenziale (leap-frog) su linea (b) e con una LT simultanea e reciproca adattata per le misure su linea (c).

La LT è stata per lungo tempo relegata a tecnica speditiva per la misura dei dislivelli, utile su grandi distanze, ma non adatta ad essere impiegata nelle reti altimetriche di alta precisione e nel controllo dei movimenti del suolo.

Grazie all'avvento dei distanziometri elettronici negli anni '70 ed ora a maggior ragione grazie alla presenza sul mercato di stazioni totali di alta precisione, la LT può essere considerata una tecnica alternativa che può raggiungere con idonee metodologie di rilievo precisioni dell'ordine di $\pm 1.5 \text{ mm} \cdot \sqrt{d(\text{km})}$ anche su terreni ondulati. La LT presenta inoltre alcuni indubbi vantaggi rispetto alla livellazione geometrica, non solo per la rapidità di esecuzione (soprattutto in presenza di forti pendenze o terreni accidentati), ma anche per la migliore disposizione delle linee di mira rispetto alla stratificazione dell'aria vicino al suolo. Questo effetto, particolarmente evidente in estate sulle strade asfaltate, può causare una incurvatura della linea di mira differente per le due letture, a causa della rifrazione dell'aria indotta dal gradiente termico verticale (figura 4). Per tali motivi alcuni autori suggeriscono l'impiego della LT al posto della livellazione geometrica su linea nella misura delle reti altimetriche di prim'ordine (Zhang, 2005).

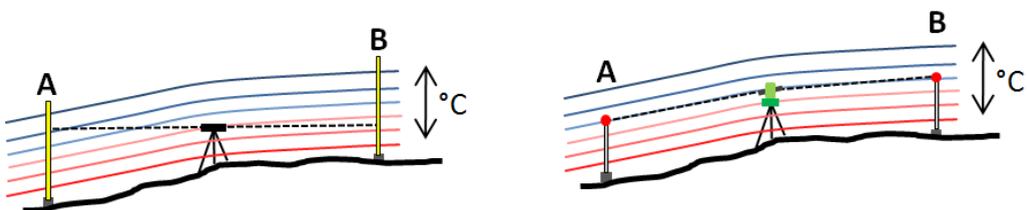


Figura 4 – diversa incidenza degli effetti del gradiente di temperatura verticale sulla linea di mira, nel caso della livellazione geometrica (sinistra) e nel caso della livellazione trigonometrica differenziale (destra).

In realtà le due tecniche sopradescritte non devono essere viste come contrapposte, anche perché in termini di rapidità di rilevamento anche la livellazione geometrica si può avvalere oggi dei rapidissimi livelli digitali, ma anzi si tratta di metodologie di rilevamento complementari, come ad esempio può avvenire nel caso degli attraversamenti delle aree impraticabili.

La LT differenziale e reciproca nell'attraversamento di aree impraticabili

Nell'ottica di voler utilizzare la LT nell'attraversamento di aree impraticabili devono essere fatte alcune considerazioni circa le precisioni raggiungibili. Dal punto di vista strumentale, per l'alta precisione il compensatore di un autolivello è caratterizzato da una precisione leggermente superiore rispetto a quello fornita da una stazione totale: in genere $\pm(0.2'' + 0.4'')$ nel caso dei livelli e $\pm 0.5''$ nel caso delle stazioni totali più evolute.

Nella nostra sperimentazione in particolare sono state utilizzate due stazioni totali Leica (modelli TCA2003 e TS30 in dotazione presso il DICAM) e per un breve periodo anche il modello Leica TM30 gentilmente reso disponibile dalla società Leica Geosystems S.p.A.

Per tutti questi tipi di strumenti la risoluzione della lettura ai cerchi verticali è analoga alla precisione del compensatore ed è di $\pm 0.5''$. Nella misura della distanza il modello TCA2003 presenta una precisione di $\pm(1\text{mm} + 1\text{p.p.m.})$, mentre i modelli TS30 e TM30 sono caratterizzati da un EDM con tecnologia Leica PinPoint con precisione nominale di $\pm(0.6\text{mm} + 1\text{p.p.m.})$.

Considerando un collegamento altimetrico mediante la livellazione trigonometrica differenziale il valore del dislivello può essere ottenuto dalla semplice relazione:

$$\Delta_{12} = D_2 \cos(\varphi_2) - D_1 \cos(\varphi_1) + \frac{1-k_1}{2R} (D_2 \sin(\varphi_2))^2 - \frac{1-k_2}{2R} (D_1 \sin(\varphi_1))^2 + l_{m1} - l_{m2} \quad (1)$$

Dove D_1 e D_2 sono le distanze inclinate alle quali sono state applicate le correzioni atmosferiche e le eventuali correzioni per le costanti dei prismi e delle eccentricità, k_1 ed k_2 sono i coefficienti di rifrazione, φ_1 e φ_2 sono gli angoli zenitali apparenti, R il raggio della sfera locale e l_{m1} ed l_{m2} sono le altezze delle mire (generalmente uguali tra loro o misurate accuratamente con precisioni superiori al decimo di millimetro).

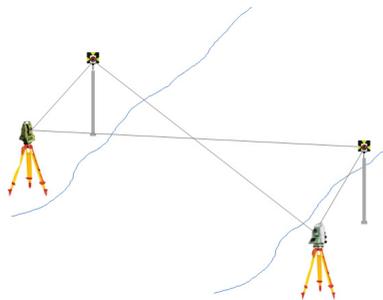


Figura 5 – Schema elementare di attraversamento mediante la misura simultanea e reciproca di due stazioni di livellazione trigonometrica differenziale.

Considerando per ciascuna stazione le distanze orizzontali S_1 e S_2 e considerando simmetrico il coefficiente di rifrazione per le due letture alle mire, il termine di correzione della rifrazione e della curvatura terrestre può essere compattato in: $\frac{1-k}{2R} (S_2^2 - S_1^2)$ e avremo quindi la relazione:

$$\Delta_{12} = S_2 \cotg(\varphi_2) - S_1 \cotg(\varphi_1) + \frac{1-k}{2R} (S_2^2 - S_1^2) + l_{m1} - l_{m2} \quad (2)$$

dalla quale si può osservare che, qualora lo strumenti si trovasse in posizione equidistante rispetto alle mire, il termine di rifrazione e curvatura diverrebbe nullo.

Applicando la legge di propagazione della varianza alla stima di ciascuno dei due dislivelli si ottiene quindi:

$$\sigma_h^2 = \left[\cotg(\varphi_2) + S_2 \frac{(1-k)}{R} \right]^2 \sigma_{S_2}^2 + \left[\cotg(\varphi_1) - S_1 \frac{(1-k)}{R} \right]^2 \sigma_{S_1}^2 + \left[\frac{S_2^2}{\sin^2(\varphi_2)} + \frac{S_1^2}{\sin^2(\varphi_1)} \right] \sigma_\varphi^2 + \left(\frac{S_2^2 - S_1^2}{2R} \right)^2 \sigma_k^2 + 2\sigma_i^2 \quad (3)$$

Come si può vedere dalla figura 5, una delle due distanze di battuta è molto corta (10-15m), mentre la seconda dipenderà dalla lunghezza dell'attraversamento. Quindi mentre per la prima l'errore associato alla misura di distanza sarà valutabile con il solo errore di base del distanziometro, per la seconda inciderà anche il termine proporzionale alla distanza.

Considerando quindi gli errori strumentali: $\pm (0.6+1.0 \text{ mm} + 1 \text{ p.p.m})$ per gli EDM, $\pm 0.5''$ per la misura degli angoli, un errore complessivo di verticalizzazione delle aste e di stabilità dei treppiedi considerato nel termine σ_i uguale a $\pm 0.3 \text{ mm}$ e un errore sul coefficiente di rifrazione $\sigma_k = \pm 0.01$, si ottengono i valori di precisione nella stima dei dislivelli riportati in tabella 1. Per quanto concerne la precisione della stima del coefficiente di rifrazione k, si deve considerare che esso è stato stimato in realtà dalle misure simultanee e reciproche (in genere su distanze di diverse centinaia di metri) e quindi con un'ottima precisione. Come valore di simulazione per gli angoli zenitali è stato utilizzato 100 gon poiché è la condizione solitamente presente negli attraversamenti progettati per la livellazione geometrica.

Tabella 1 – Stima a priori delle precisioni raggiungibili (espresse in mm) nella determinazione del dislivello a partire dalle misure di LT differenziale da una singola stazione, al variare della lunghezza dell'attraversamento (una volta stimato il coefficiente di rifrazione mediante l'ausilio dei dati provenienti dalla seconda stazione simultanea). In rosso sono indicati i casi in cui le precisioni della LT differenziale non rispettano la tolleranza specificata.

Dist.	100m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m	900m	1000m
LT diff.	± 0.49	± 0.65	± 0.85	± 1.07	± 1.30	± 1.54	± 1.79	± 2.05	± 2.31	± 2.59
$\pm 2\sqrt{d}$	± 0.63	± 0.89	± 1.10	± 1.26	± 1.41	± 1.55	± 1.67	± 1.79	± 1.90	± 2.00
$\pm 2.5\sqrt{d}$	± 0.79	± 1.12	± 1.37	± 1.58	± 1.77	± 1.94	± 2.09	± 2.24	± 2.37	± 2.50
$\pm 3\sqrt{d}$	± 0.95	± 1.34	± 1.64	± 1.90	± 2.12	± 2.32	± 2.51	± 2.68	± 2.85	± 3.00

Come si può osservare le precisioni attese fino a circa 600 m di lunghezza dell'attraversamento sono contenute entro una tolleranza equivalente all'alta precisione su linea di $\pm 2\text{mm}\cdot\sqrt{d(\text{km})}$, mentre aumentando la lunghezza fino al km la precisione scende nell'intervallo $\pm 2.5\text{mm}\cdot\sqrt{d(\text{km})}$.

A partire da questi limiti di precisione, che risultano comunque migliorativi rispetto alla soglia di $\pm 5\text{mm}\cdot\sqrt{d(\text{km})}$, sopradescritta, si è pertanto deciso di intraprendere una sperimentazione della metodologia su di una serie di attraversamenti di prova.

Sperimentazione della metodologia e risultati ottenuti

Le motivazioni che hanno suggerito la sperimentazione della metodologia basata sulla LT sono connesse al miglioramento della precisione di misura dei dislivelli in aree impraticabili ed a una ottimizzazione delle attività di rilevamento, con vantaggi quali:

- garantire una elevata invariabilità della posizione della linea di mira al variare della temperatura dello strumento, grazie all'impiego di strumentazione in grado di effettuare serie di letture coniugate;
- permettere per quanto possibile una collimazione di tipo automatico, riducendo i margini di variabilità delle collimazioni legate al singolo operatore;
- utilizzo di mire di collimazione appositamente progettate per l'alta precisione su distanze fino ad 1 km;
- possibilità di una verifica delle reali precisioni raggiunte mediante l'analisi di misure sovrabbondanti;
- rendere rapide ed efficienti le operazioni di rilievo di campagna consentendo una facile estensione del metodo verso tecniche di monitoraggio semi-automatiche.

La sperimentazione è stata effettuata mediante l'impiego delle stazioni totali di alta precisione sopradescritte, accoppiate a due aste porta prisma di altezza calibrata e verificata in laboratorio già complete del prisma retro-direttivo prescelto. Alla sommità di tali aste sono stati infatti installati dei prismi retro-direttivi con struttura metallica compatibili con l'alta precisione e a costante nulla per le stazioni totali utilizzate.

Le stazioni totali sono state sottoposte preventivamente ad una verifica dello stato di calibrazione presso i laboratori della Leica Geosystems, successivamente sono state eseguite in campagna le verifiche di calibrazione dei sistemi di collimazione automatica (ATR) presenti nelle diverse macchine. Uno dei vantaggi principali dell'impiego dell'ATR è una precisione più costante nel corso della giornata rispetto alle letture manuali, che garantisce quindi risultati maggiormente coerenti (Haag et al., 1997). Un inconveniente è tuttavia dato dall'eventuale errore residuo di rettifica tra centro del reticolo e posizione di riferimento del sistema ATR. Tale effetto infatti non viene eliminato dalle letture in posizione coniugata (Leica, 2003). Pertanto, l'uso del sistema ATR richiede una verifica della calibrazione (operazione in realtà molto rapida, grazie alla procedura prevista nel firmware strumentale).

Per poter effettuare le correzioni atmosferiche nelle misure di distanza sono state registrate in continuo con cadenza di un minuto le temperature dell'aria e la percentuale di umidità relativa agli estremi dell'attraversamento. Manualmente sono state invece registrate le letture effettuate dei valori di pressione atmosferica attraverso l'impiego di due barometri aneroidi. Tali osservazioni sono servite per calcolare l'indice di rifrazione dell'aria per la lunghezza d'onda dei distanziometri utilizzati, applicando il modello adottato dall'International Association of Geodesy (Ciddor, 1996; Ciddor & Hill, 1999).

Gli esperimenti sono stati eseguiti su attraversamenti appositamente scelti, in quanto rappresentativi di un'ampia casistica di reali condizioni operative. Le lunghezze sono state comprese tra i 71m ed il chilometro. Per alcuni di essi sono state eseguite contemporaneamente misure di livellazione geometrica simultanea. Per altri ancora è stato utilizzato un poligono di prova costituito da due dighe, poste una di fronte all'altra, ma raggiungibili e collegabili via terra tramite un percorso di livellazione geometrica su linea di alta precisione.



Figura – Asta porta prisma.

Nella tabella 2 sono indicati a titolo esemplificativo alcuni risultati ottenuti per distanze comprese tra 71m e 942m, mentre nella tabella 3 sono indicati alcuni risultati ottenuti mediante il confronto con la livellazione geometrica su linea e la livellazione geometrica simultanea e reciproca.

Tabella 2 – Esempio di valori ottenuti nella stima di dislivelli per distanze via via crescenti, utilizzando la tecnica di LT differenziale, con due stazioni simultanee e reciproche.

Distanza	Andata	Ritorno	Chiusura	Valore medio
71	-0.3973	0.3976	0.0003	-0.3975
127	-1.1613	1.1606	-0.0006	-1.1609
571	-0.7563	0.7577	0.0013	-0.7570
691	-0.6510	0.6497	-0.0013	0.6503
942	0.1177	-0.1214	-0.0037	0.1196

Tabella 3 – Esempio di valori ottenuti nella stima di dislivelli per distanze medio lunghe, utilizzando la tecnica di LT differenziale, con due stazioni simultanee e reciproche, messi a confronto con la livellazione geometrica dal mezzo di alta precisione su linea effettuata con livello digitale e con la livellazione con livelli ottici reciproci.

Distanza	Livellazione geometrica dal mezzo	Livellazione con livelli ottici reciproci	Livellazione trigonometrica di precisione
520	0.5663	0,5691	0.5660
610	-0.1023	n.d.	-0.1028
691	n.d.	0.6552	0.6503
750	0.0350	n.d.	0.0365
770	0.1597	n.d.	0.1586
942	n.d.	0.1155	0.1196
990	0.4066	0.4049	0.4082
1260	0.0673	n.d.	0.0647

Conclusioni e sviluppi futuri della ricerca

In conclusione si può affermare che tutti gli obiettivi posti alla base della sperimentazione sono stati raggiunti, sia in termini di precisione e affidabilità delle misure sia, in modo particolare, per quanto riguarda le tempistiche di acquisizione delle misure, per le quali possono essere stimati tempi inferiori alle due ore per ogni attraversamento, riducendo sensibilmente il tempo di stazionamento e di conseguenza la criticità di rilievi effettuati in condizioni climatiche e logistiche spesso severe.

In particolare, i risultati ottenuti sono in linea con le precisioni attese per le singole coppie simultanee e reciproche di determinazioni e un ulteriore miglioramento potrebbe avere luogo mediante un irrobustimento dello schema geometrico delle misure, passando quindi da collegamenti isolati ad una vera e propria struttura a rete. Questo approccio di rilevamento è stato in realtà già sperimentato per gli attraversamenti più lunghi (figura 7), anche se l'analisi dei risultati è ancora in corso.

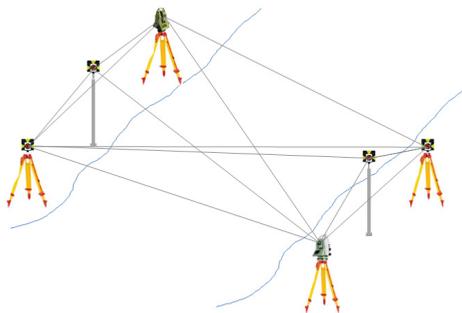


Figura 7 – Schema a rete sperimentato negli attraversamenti di lunghezza superiore ai 500 m.

Per questo tipo di analisi è infatti richiesta una ottimizzazione delle procedure di calcolo, al fine di considerare in modo corretto le letture zenitali simultanee e reciproche in fase di compensazione delle osservazioni.

Ulteriori approfondimenti riguarderanno inoltre lo studio della deviazione della verticale nei punti di stazione e l'impiego di queste tecniche di rilievo automatiche per lo studio dell'influenza della rifrazione dell'aria. Il metodo sperimentato si presta, infatti, a studi di notevole interesse scientifico sulle variazioni del coefficiente di rifrazione nell'arco della giornata e nel breve periodo, proprio grazie alla possibilità di eseguire serie di letture simultanee e reciproche in posizioni coniugate dei cerchi con modalità pressoché automatiche.

Bibliografia

- 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, pp.1663–1667
- De Sanctis R., Folloni G., Gubellini A. (1973) Alcune esperienze di livellazione reciproca con livelli accoppiati. *Bollettino SIFET*, 2, 1973, pp.12.
- Gatti M, Tomassi G. (1990) La livellazione geometrica di precisione su lunghe distanze: un esempio di applicazione. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, Anno XLIX, 1, 1990, pp.29-48.
- Gubellini A. (1972) L'impiego dei livelli doppi nello studio dei movimenti del suolo. Rapporto tecnico 53, CNR – Laboratorio per lo studio della dinamica delle grandi masse, pp.25.
- Gubellini A., Unguendoli M. (1987) Nota sulla livellazione trigonometrica. *Bollettino SIFET*, 3/4, 1987, pp. 14.
- Haag, R., G. Bayer, M. Zimmermann, and R. Scherrer (1997), Vermessen mit der automatischen Feinzielung des TCA1800 von Leica, *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 7/97, pp. 6.
- Inghilleri G. (1974) Topografia generale, UTET.
- Jordan, W., O. Eggert, and M. Kneissl (1956), *Handbuch der Vermessungskunde Band III, J.B. Metzler'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart*, pp. 410 – 435.
- Kahmen, H., and W. Faig (1988), *Surveying, Walter de Gruyter, Berlin, New York.*
- Leica, (2003), *TPS Info – Calibration – 01/2003, Leica Geosystems, Herbrugg, Switzerland.*
- Schofield, W. and M. Breach (2007), *Engineering Surveying – 6th Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford.*
- Tsoulis, D., S. Petrovic, and N. Kilian (2008), Theoretical and numerical aspects of the geodetic method for determining the atmospheric refraction coefficient using simultaneous and mutual zenith observations, *Journal Surveying Engineering* 134(1), pp. 3 – 12.
- Xiong Wei Sun Qinghua Wang lei Zou Yongqiang - Trigonometric Leveling Precision Analysis of TCA2003 Total Station, 2009
- Zhang Z., Zhang K., Deng Y., Luo C. (2005) Research on Precise Trigonometric Leveling in Place of First Order Leveling. *Geo-Spatial Information*, Volume 8, Issue 4, December 2005, pp. 235-239.