

## **Prove sperimentali su stazioni totali motorizzate di precisione per il monitoraggio di deformazioni**

Gino Centi (\*), Donatella Dominici (\*\*), Michael Elaiopoulos (\*\*),  
Fabio Radicioni (\*), Aurelio Stoppini (\*)

(\*) DICA, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia,  
Via G. Duranti 93, 06125 Perugia

(\*\*) DAU, Dipartimento di Architettura e Urbanistica, Università degli Studi dell'Aquila

### **Riassunto**

Si presentano i risultati di una serie di test su due stazioni totali motorizzate di alta precisione aventi diverse caratteristiche: una la cui progettazione risale ad alcuni anni fa (Leica TCA2003), ed una molto più recente (Leica TS30). I test sono stati eseguiti in condizioni effettive di impiego, nell'ambito di un sistema integrato di monitoraggio di edifici e manufatti storici monumentali, con stazioni su pilastri a centramento forzato. Le misure sono state tutte eseguite su miniprismi, date le ridotte distanze in gioco e l'esigenza di limitare l'impatto estetico-ambientale tenendo conto delle caratteristiche dei siti da monitorare. Per entrambi gli strumenti è stata utilizzata la funzione di riconoscimento automatico della mira (ATR). I risultati ottenuti con i due strumenti in condizioni sperimentali identiche vengono posti a confronto esaminando separatamente le misure angolari e quelle di distanza, e valutando quindi l'accuratezza delle posizioni tridimensionali ottenute in funzione delle esigenze specifiche dei progetti di monitoraggio in oggetto.

### **1. Caratteristiche del sito, materializzazioni e mire utilizzate**

I test in oggetto sono stati eseguiti nella rete di monitoraggio delle mura monumentali di Amelia (TR). Per maggiori informazioni su tale rete e sul sistema integrato di monitoraggio delle mura di Amelia si fa riferimento a Brigante et al. (2008) e Brigante et al. (2009).



*Figura 1. Stazione su pilastro per il monitoraggio delle mura di Amelia.*

Le misure vengono eseguite da vertici di stazione materializzati su pilastri di calcestruzzo armato rivestiti in muratura, fondati su pali. Il centramento è di tipo forzato su piastre in acciaio inox. Le mire sono tutte costituite da miniprismi Leica GMP101 ancorati al paramento murario.

Ogni stazione controlla un certo numero di prismi sulle mura ed è orientata su ulteriori prismi posti su strutture stabili esterne al complesso murario. Tutti i prismi sono orientati verso la stazione in modo da renderne agevole la collimazione fine automatica e poter eseguire il rilievo beneficiando delle caratteristiche (rapidità, affidabilità, ripetibilità) delle stazioni totali motorizzate che vengono utilizzate.

## 2. Strumentazione e metodologia di misura

Le misure a cui fa riferimento il presente lavoro sono state eseguite da 4 vertici di stazione della rete di Amelia utilizzando in immediata sequenza i due seguenti strumenti:

- stazione totale automatica **Leica TCA 2003** (strumento impiegato anche in tutte le campagne precedenti eseguite sulla stessa rete);
- stazione totale automatica **Leica TS30**, più recente ed avente caratteristiche più avanzate.

Le caratteristiche prestazionali più importanti dei due strumenti, come dichiarate dalla ditta produttrice, sono riassunte sinteticamente nella tabella 1. Per ulteriori e più dettagliate informazioni si rimanda alla documentazione presente nel sito web di Leica.

*Tabella 1. Principali caratteristiche dei due strumenti testati.*

<b>MISURE ANGOLARI</b>	<b>TCA 2003</b>	<b>TS30</b>
Deviazione standard ISO 17123-3 azimutale	0.3 mgon	0.15 mgon
Deviazione standard ISO 17123-3 zenitale	0.3 mgon	0.15 mgon
Metodo di lettura	Assoluto, continuo, diametrico	Assoluto, continuo, quadruplo
<b>MISURE DI DISTANZA</b>	<b>TCA 2003</b>	<b>TS30</b>
Deviazione standard ISO 17123-4 (su prisma standard, modo preciso)	1 mm + 1 ppm (3 s)	0.6 mm + 1 ppm (7 s)
Portata su prisma standard (condizioni atmosferiche medie)	2500 m	3500 m
Portata su target	200 m	250 m
Portata senza riflettore	Non possibile	1000 m
<b>MOTORIZZAZIONE</b>	<b>TCA 2003</b>	<b>TS30</b>
Velocità di rotazione	50 gon/s	200 gon/s

Le misure angolari sono state eseguite applicando la regola di Bessel ed effettuando 6 strati, utilizzando sempre la modalità di collimazione automatica (ATR).

Le distanze sono state misurate nella modalità più accurata disponibile per ciascuno degli strumenti. La posa in stazione degli strumenti è stata eseguita con basette Leica a due viti mobili e una fissa in modo da mantenere costante l'altezza strumentale, con cilindro e o-ring di centramento sulla piastra fissata al pilastro.



Figura 2. Leica TCA 2003 (sin.) e TS 30 (ds.).

Sulle misure “grezze” scaricate dallo strumento sono state eseguite le medie delle reiterazioni angolari e delle distanze, la calibrazione dell’orientamento azimutale sui prismi esterni di orientamento e della correzione atmosferica sulle distanze note rispetto agli stessi prismi esterni. Sono state infine calcolate le coordinate dei punti osservati (miniprismi) nei sistemi locali definiti dai vertici di stazione e prismi di orientamento. Ogni sistema locale è definito in modo da evidenziare le componenti *longitudinale* (parallela al paramento murario), *trasversale* (perpendicolare al paramento) e *altimetrica* di eventuali movimenti.

### 3. Confronto tra i risultati

Sono state poste a confronto le misure eseguite in sequenza sugli stessi punti con i due diversi strumenti. Un primo confronto ha riguardato le direzioni angolari azimutali (riportate a un’origine comune), gli angoli zenitali e le distanze. Gli scarti tra i due strumenti e la relativa distribuzione sono riportati negli istogrammi che seguono (figg. 3, 4, 5) accompagnati dalle curve di frequenza cumulativa percentuale (tracciate in rosso).

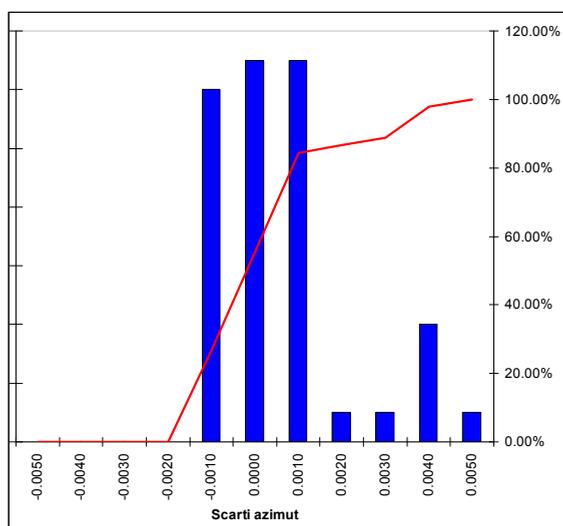


Figura 3. Istogramma e frequenza cumulativa degli scarti sulle direzioni azimutali (valori in gon).

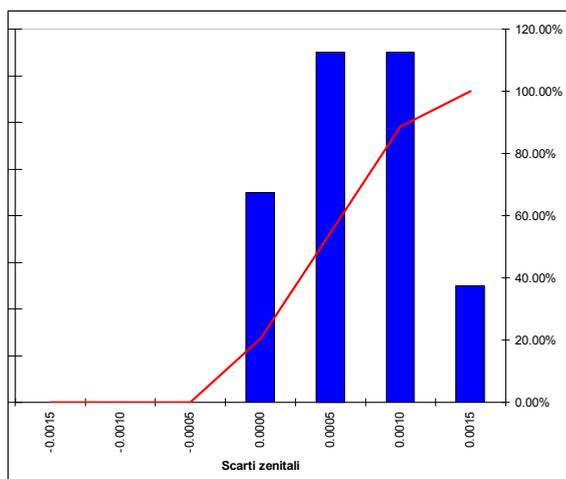


Figura 4. Istogramma e frequenza cumulativa degli scarti sugli angoli zenitali (valori in gon).

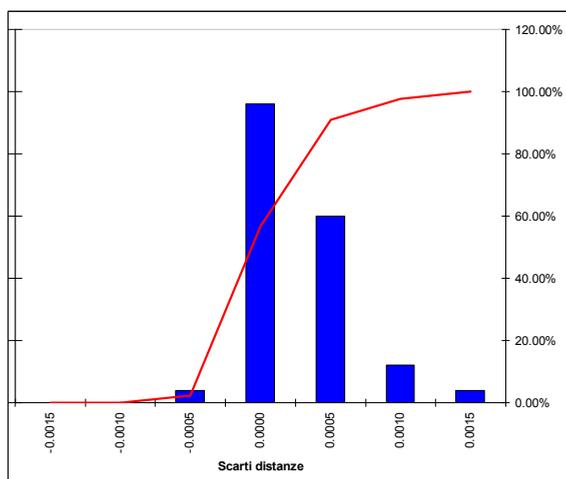


Figura 5. Istogramma e frequenza cumulativa degli scarti sulle distanze (valori in metri).

I principali parametri statistici degli scarti di cui sopra sono riassunti nella seguente tabella (valori in gon per direzione azimutale e zenitale, in metri per la distanza):

	$\Delta H_z$	$\Delta V$	$\Delta D$
<b>media</b>	0.0002	0.0004	0.0000
<b>RMS</b>	0.0015	0.0006	0.0003
<b>max</b>	0.0041	0.0013	0.0011
<b>min</b>	-0.0018	-0.0004	-0.0006

Si può osservare come si abbia un'ottima congruenza sulle distanze, per le quali la distribuzione degli scarti è a media nulla e i valori sono tutti compresi nell'intervallo  $\pm 1$  mm. Per gli angoli zenitali si nota un sistematismo di circa 4 secondi centesimali ma la quasi totalità degli scarti sono compresi entro i 5 secondi positivi o negativi.

Un po' più alti gli scarti dei valori azimutali, dei quali però i valori più alti si raggruppano in una delle quattro aree sottoposte a monitoraggio. Se si esclude tale sottorete (zona B) si ottiene il grafico che segue, che è in linea con quello relativo ai valori zenitali, con scarti compresi entro i 15 secondi centesimali in più o in meno:

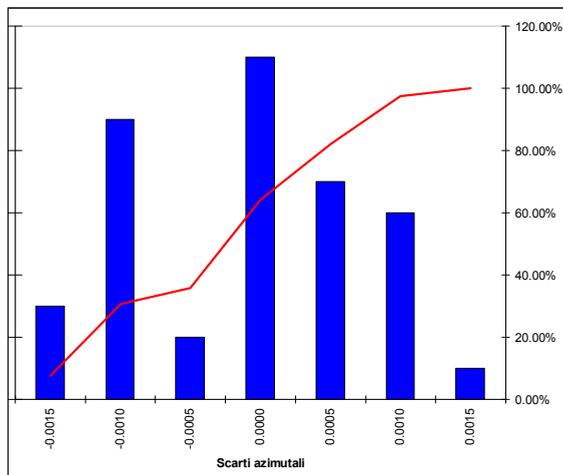


Figura 6. Istogramma e frequenza cumulativa degli scarti sulle direzioni azimutali (valori in gon) Campione dei dati depurato dalla zona B.

Passando dal confronto tra le misure a quello sulle coordinate ottenute nei sistemi locali di ciascuna stazione (X = direzione parallela al paramento murario, Y = direzione perpendicolare, Z = quota) le differenze tra i valori ottenuti con i due diversi strumenti hanno i parametri statistici riassunti dalla seguente tabella:

	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
<b>media</b>	-0.0001	0.0000	-0.0001
<b>RMS</b>	0.0005	0.0003	0.0002
<b>max</b>	0.0005	0.0007	0.0001
<b>min</b>	-0.0009	-0.0008	-0.0004

La tabella fa riferimento all'intero set di misure, comprese quelle della zona B escluse per il grafico di figura 6. Si nota come, date le piccole distanze in gioco (poche decine di metri tra le stazioni e i prismi sul paramento murario) le variazioni sui valori angolari, in particolare quelli azimutali, abbiano un effetto contenuto che si traduce in differenze tra i valori delle coordinate tridimensionali che restano sempre contenuti, anche nei valori estremi), entro il millimetro.

Si ritiene quindi di poter concludere affermando che i due strumenti posti a confronto hanno garantito accuratzeze tali da portare a differenze sulle coordinate finali inferiori al valore di un millimetro che costituisce la soglia di sensibilità per il monitoraggio tridimensionale di un manufatto come quello in oggetto.

## **Bibliografia**

Dominici D., Fastellini G., Radicioni F., Stoppini A., 2008: An integrated monitoring system for the monumental walls of Amelia. Proc. of "Measuring the Changes", 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis - 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbon, 2008

Brigante R., Dominici D., Fastellini G., Radicioni F., Stoppini A., 2008: Test di accuratezza e ripetibilità di posizionamenti NRTK su sessioni di lunga durata. Atti della XII Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila, 2008

Brigante R., Dominici D., Fastellini G., Radicioni F., Stoppini A., 2009: Confronto e integrazione fra tecniche geomatiche per la documentazione e il monitoraggio dei beni culturali. Atti della XIII Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 2009