

Monitoraggio delle strutture tramite tecniche topografiche innovative e tradizionali

A. PELLEGRINELLI e P. RUSSO

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

La ricerca ha riguardato lo studio e l'applicazione di strumenti topografici digitali di ultima generazione di elevata precisione metrica (stazioni totali, *laser scanner* terrestri (TLS), livelli digitali automatici, ricevitori satellitari GPS/GNSS), nell'ambito del monitoraggio di edifici/strutture e manufatti in genere. Particolare attenzione è stata dedicata all'integrazione tra le differenti strumentazioni topografiche; integrazione analizzata studiando le potenzialità degli strumenti sia in termini di precisione, sia in termini di tipologia e quantità d'informazioni deducibili dai rilievi ripetuti nel tempo.

Come "laboratorio di monitoraggio", si è scelto il "Baluardo di Sant'Antonio" (nel seguito Baluardo): un complesso monumentale di epoca medioevale facente parte della cinta muraria della città di Ferrara (Fig. 1). Si tratta di un imponente apparato difensivo che manifesta già da alcuni anni un importante quadro fessurativo e sensibili deformazioni del paramento murario (i primi rilievi sono iniziati da parte del Comune di Ferrara poco dopo gli eventi sismici che hanno interessato il territorio nel 2012). Nel caso specifico si è voluto rilevare sia la presenza di deformazioni/cedimenti localizzati (di entità di pochi mm/anno o inferiori), sia la presenza di un movimento complessivo (di roto-traslazione 3D) dell'intera struttura o di sue parti. Da qui la necessità di progettare e realizzare un sistema di monitoraggio basato sull'integrazione di diversi strumenti topografici, con rilievi ripetuti durante l'intero periodo dello studio ed anche oltre. In questo modo è stato possibile valutare le potenzialità delle diverse tecniche e della loro integrazione, ma anche le precisioni raggiungibili ed i tempi di rilievo con i diversi approcci. I



Fig. 1 - Baluardo di Sant'Antonio, parte della cinta muraria della città di Ferrara (a); dettagli delle maggiori fessurazioni presenti (b) e (c).

risultati e le conclusioni dello studio sono finalizzati, non tanto a valutare lo “stato di salute” del Baluardo monitorato, ma soprattutto all’analisi critica delle tecniche topografiche utilizzate.

2. Metodologia

Per determinare i movimenti verticali e orizzontali del Baluardo nel suo insieme o nelle sue parti, è stato istituito/utilizzato un impianto di monitoraggio “pilota”, e sono state realizzate diverse tecniche e campagne di misura descritte sinteticamente nel seguito:

- Rete di livellazione geometrica di alta precisione per la determinazione puntuale, con precisione millimetrica, della componente verticale di spostamento; tale rete è costituita da 20 caposaldi toroidali murati alla base del Baluardo (da C1 a C20 in Fig. 2) più 2 caposaldi toroidali di riferimento esterni al Baluardo (Rif1 e Rif2 in Fig. 2). La rete di caposaldi è stata materializzata e rilevata nel 2012 per conto del Comune di Ferrara. Nel presente studio sono state realizzate numerose campagne di misura con livello digitale Leica DNA03 e stadie con codice a barre su nastro in INVAR. Durante ogni ripetizione sono state eseguite misure sovrabbondanti (schemi ad anello eseguiti in andata e ritorno) elaborate tramite procedure di compensazione ai minimi quadrati, mantenendo invariato il dislivello tra i caposaldi di riferimento, e con valutazione dell’affidabilità dei risultati di ogni campagna tramite analisi di pre- e di post-compensazione. Ad ogni ripetizione sono state rispettate le norme e le indicazioni tecniche della livellazione geometrica di alta precisione. Con tale procedura, per tutti i caposaldi e per ogni campagna, è stata ottenuta la quota ed il relativo

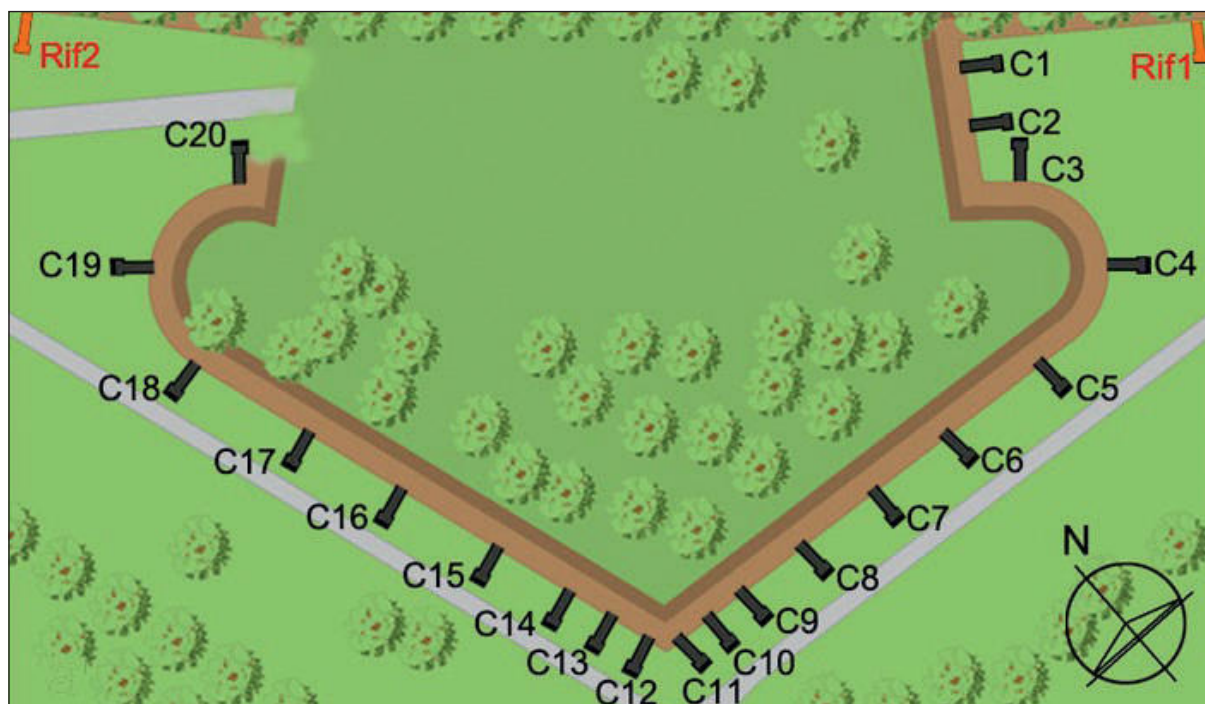


Fig. 2 - Rete di livellazione geometrica di alta precisione; schema dei caposaldi toroidali presenti alla base del Baluardo di Sant’Antonio (da C1 a C20) e dei caposaldi di riferimento (Rif1 e Rif2) esterni al Baluardo.

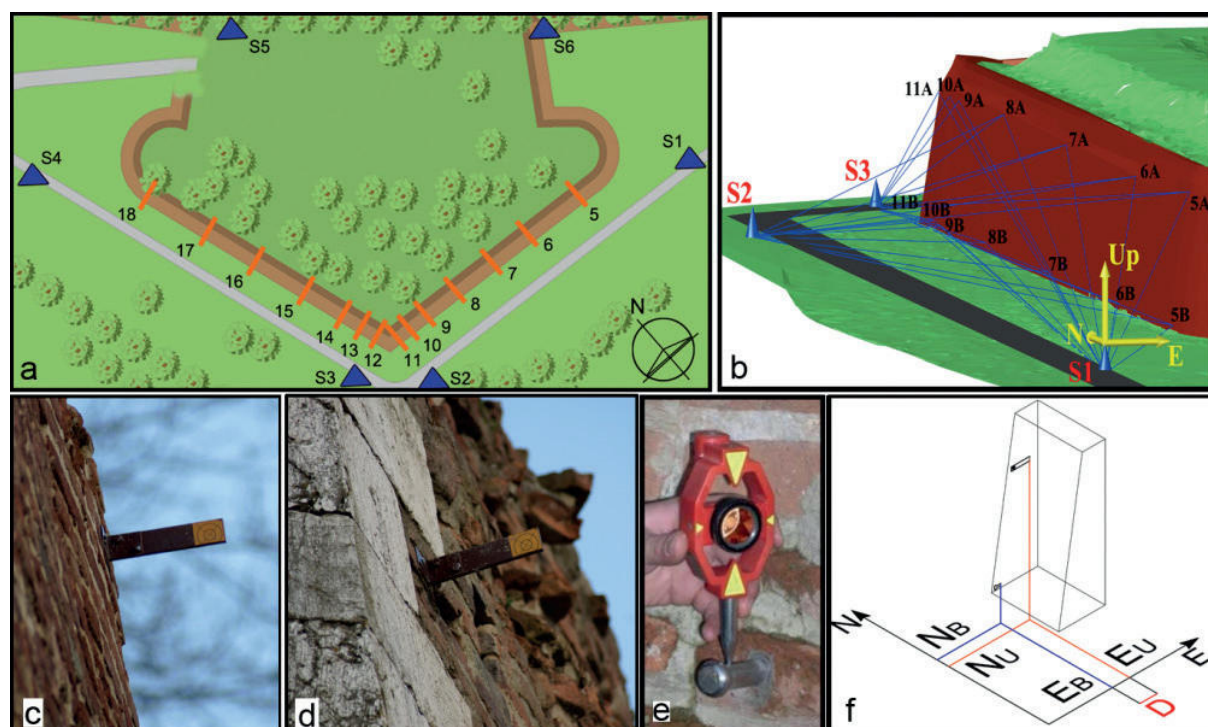


Fig. 3 - a) Schema dei punti rilevati con stazione totale (6 vertici di inquadramento da S1 a S6 e 14 mire da 5 a 18); b) schema delle misure (rilievo per polari) e sistema di riferimento locale; c) e d) mire infisse nella parte sommitale del Baluardo (a circa 5 m di altezza dal suolo); e) caposaldo rilevato tramite mini-prisma (a circa 0.5 m di altezza dal suolo); f) esempio di componente scalare monitorata nel tempo tra sommità e base del Baluardo (differenza coordinate Est).

scarto quadratico medio (sqm): l'eventuale variazione significativa di quota nel tempo rappresenta una zona di deformazione del Baluardo.

- In corrispondenza dei caposaldi dal C5 al C18, ma sulla fascia alta delle mura, sono state appositamente realizzate 14 mire su profili di acciaio infissi nel Baluardo (da 5 a 18 in Fig. 3a) con lo scopo di determinare una variazione di posizione dell'area sommitale del Baluardo rispetto alla fascia di base: mire in sommità e corrispondenti caposaldi alla base definiscono sostanzialmente una linea retta, la cui posizione può essere monitorata nel tempo; in Fig. 3f, ad esempio, si evidenzia la differenza D in componente Est tra la mira di sommità (E_U) ed il caposaldo alla base (E_B). Le mire ed i caposaldi sono stati rilevati tramite stazione totale Leica TCR802 con lo schema di rilievo per polari da due distinti punti di stazione (quindi con doppia determinazione; Fig. 3b). Le mire nella parte alta del Baluardo (Figg. 3c e 3d) sono state dotate di pellicola catarifrangente (per una più precisa misura della distanza con la stazione totale in modalità *reflectorless*), mentre i caposaldi sono stati rilevati collimando un miniprisma di volta in volta posizionato su di essi (Fig. 3e). I vertici (da S1 a S6 in Fig. 3a ed in Fig. 4a) su cui si è messo in stazione lo strumento costituiscono una rete di inquadramento, appositamente materializzata e rilevata tramite un primo rilievo di precisione eseguito con la stazione totale, con misure sovrabbondanti e compensazione ai minimi quadrati, ottenendo ellissi di errore standard sub-centimetrici (Fig. 4b). Le quote dei vertici sono state invece ottenute sempre tramite livellazione geometrica di precisione inquadrata tramite i due caposaldi di riferimento Rif1 e Rif2. Nel corso del presente studio

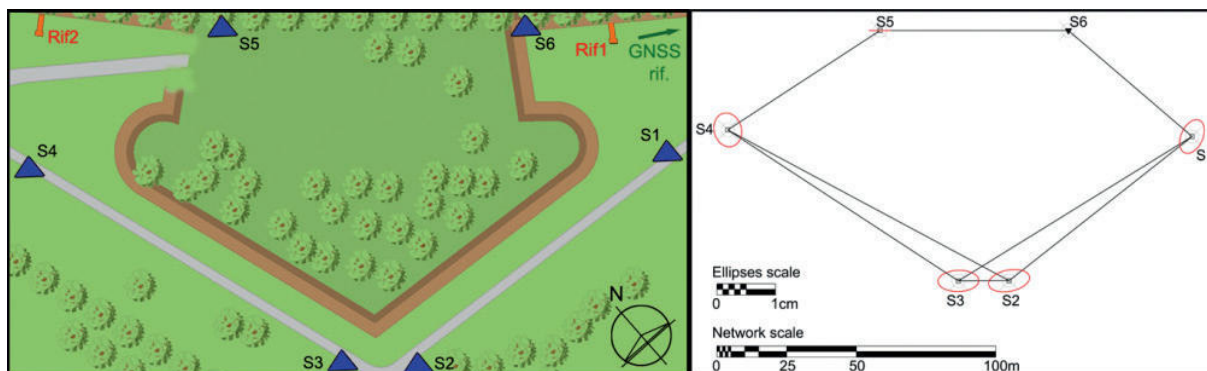


Fig. 4 - a) Posizione dei caposaldi di riferimento (Rif1, e Rif2) e vertici della rete di inquadramento (S1-S6); b) ellissi di errore standard ottenuti dalla compensazione ai minimi quadrati.

il rilievo delle 14 mire e dei caposaldi con stazione totale è stato realizzato tre volte.

- 4 punti di controllo GNSS sul coronamento (da P1 a P4 in Fig. 5a), per la valutazione dei movimenti della struttura in un sistema di riferimento globale (ETRS89-ETRF2000), più un punto esterno al Baluardo (GNSS Rif. in Fig. 5a) da utilizzare come vertice *master* (o base) di riferimento nella modalità statica di rilievo GNSS. Il rilievo GNSS è stato realizzato solo una volta nell’ambito del presente lavoro utilizzando una coppia di ricevitori GNSS geodetici a doppia frequenza, mod. Topcon GR3 (Fig. 5b), con tempi di stazionamento di 1 ora.
- Come ultimo strumento/tecnica di monitoraggio di tipo topografico, è stato utilizzato il *laser scanner terrestre (TLS)* per un rilievo complessivo 3D del Baluardo e quindi per la valutazione globale delle variazioni morfologiche del paramento murario. Il TLS utilizzato è stato il Leica P30 (Fig. 6) posto in stazione direttamente sui vertici da S1 a S6 della rete riportata in Fig. 3a (la stessa materializzata per il rilievo con la stazione totale), eseguendo da ogni punto di stazione un numero di scansioni sufficienti a rilevare l’intero Baluardo insieme ad un tratto di mura adiacente. La registrazione delle scansioni è avvenuta utilizzando direttamente le coordinate dei vertici suddetti, verificando, di volta in volta, che i residui di orientamento 3D presentassero valori di pochi mm. Con questa procedura il rilievo TLS è stato automaticamente inquadrato, già nelle fasi di campagna, nel sistema di

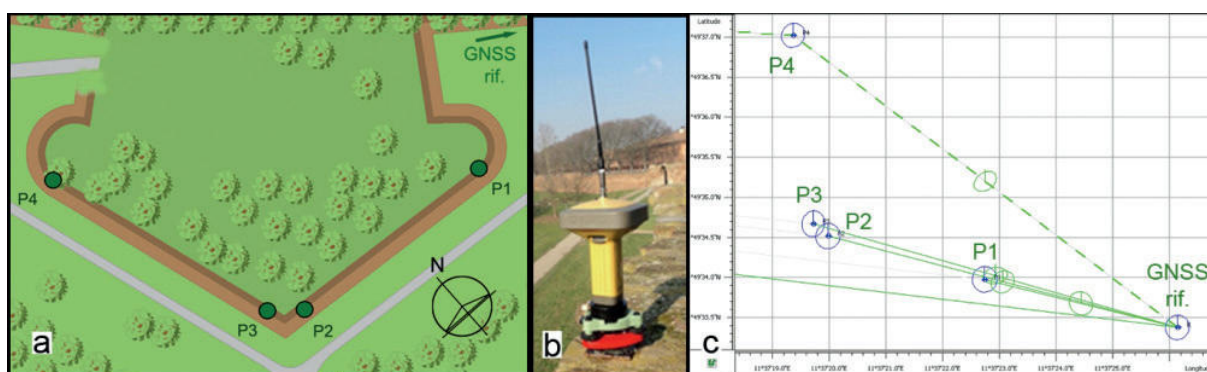


Fig. 5 - a) Vertici della rete GNSS; b) ricevitore GNSS mod. Topcon GR3; c) risultati dell’elaborazione della rete GNSS, modalità statica.

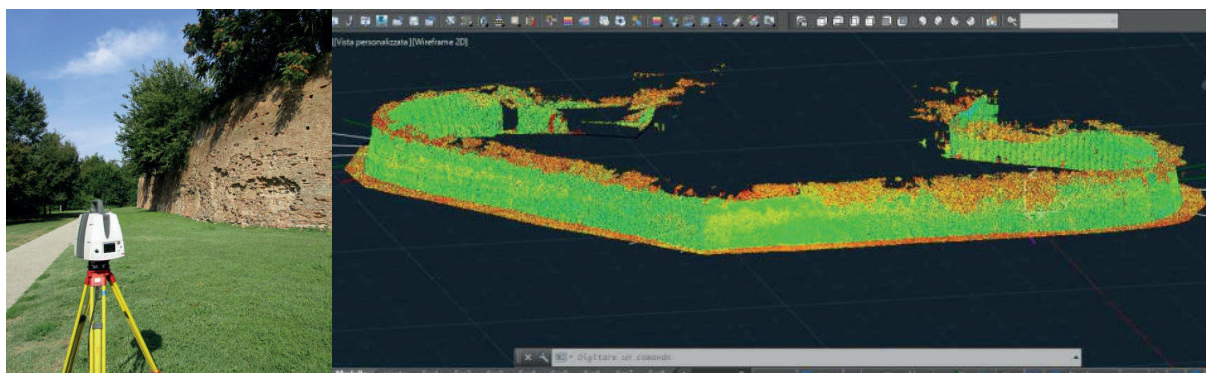


Fig. 6 - *Laser scanner* terrestre Leica P30 e modello 3D ottenuto dalla registrazione complessiva delle nuvole di punti realizzate con le scansioni *laser scanner*.

riferimento locale materializzato e rilevato con la stazione totale descritta precedentemente, agevolando in tal modo, le fasi di confronto dei risultati ottenuti. Tutte le scansioni sono state elaborate con apposito *software* 3D Leica Cyclone, tramite il quale è stato possibile gestire un unico modello globale tridimensionale visualizzato in Fig. 6; da tale modello si possono facilmente ricavare sezioni verticali del Baluardo e confrontare le stesse sezioni nel tempo (nei modelli ottenuti nei vari rilievi *laser scanner*) per evidenziare cedimenti/deformazioni nell'area del piano di sezione.

- Infine, nell'ottica dell'integrazione tra diverse strumentazioni/sensori, il Comune di Ferrara ha posizionato 4 basi deformometriche a cavallo delle lesioni principali; questi sensori, non strettamente topografici, consentono di realizzare un monitoraggio senza soluzione di continuità della larghezza delle lesioni più importanti. Allo stato attuale questi dati non sono ancora disponibili.

3. Principali risultati

Le diverse tecniche di rilievo topografico hanno permesso di individuare i cedimenti/deformazioni che hanno interessato il Baluardo di Sant'Antonio, dal primo periodo post eventi sismici del 2012 fino al settembre del 2017. La livellazione geometrica di alta precisione eseguita sulla rete di caposaldi infissi alla base del Baluardo (Fig. 2) si è dimostrata essere (come d'altronde atteso) la tecnica più affidabile e accurata, con errori di chiusura sempre di pochi millimetri ed ha permesso di mettere in evidenza cedimenti dell'ordine di 1 mm/anno. Si tratta però di una tecnica che fornisce informazioni puntuali (sul caposaldo monitorato), informazioni non sempre estendibili all'intera struttura; inoltre, può essere utilizzata solo per caposaldi accessibili con una stadia da livellazione: difficile pensare quindi al monitoraggio con livellazione geometrica per parti alte delle strutture come la sommità del Baluardo. Per queste ragioni sono state realizzate ed installate apposite mire nella fascia sommitale del Baluardo, mire rilevate con la stazione totale tramite la tecnica del rilievo per polari. Purtroppo, nonostante gli strumenti di alta precisione utilizzati e la massima attenzione durante le fasi operative, la sovrabbondanza delle misure e la loro ripetizione nel tempo hanno mostrato un'accuratezza di rilievo ritenuta insufficiente (differenze di 1-2 cm). Questo risultato è molto probabilmente da attribuire da un lato alla difficoltà di mettere

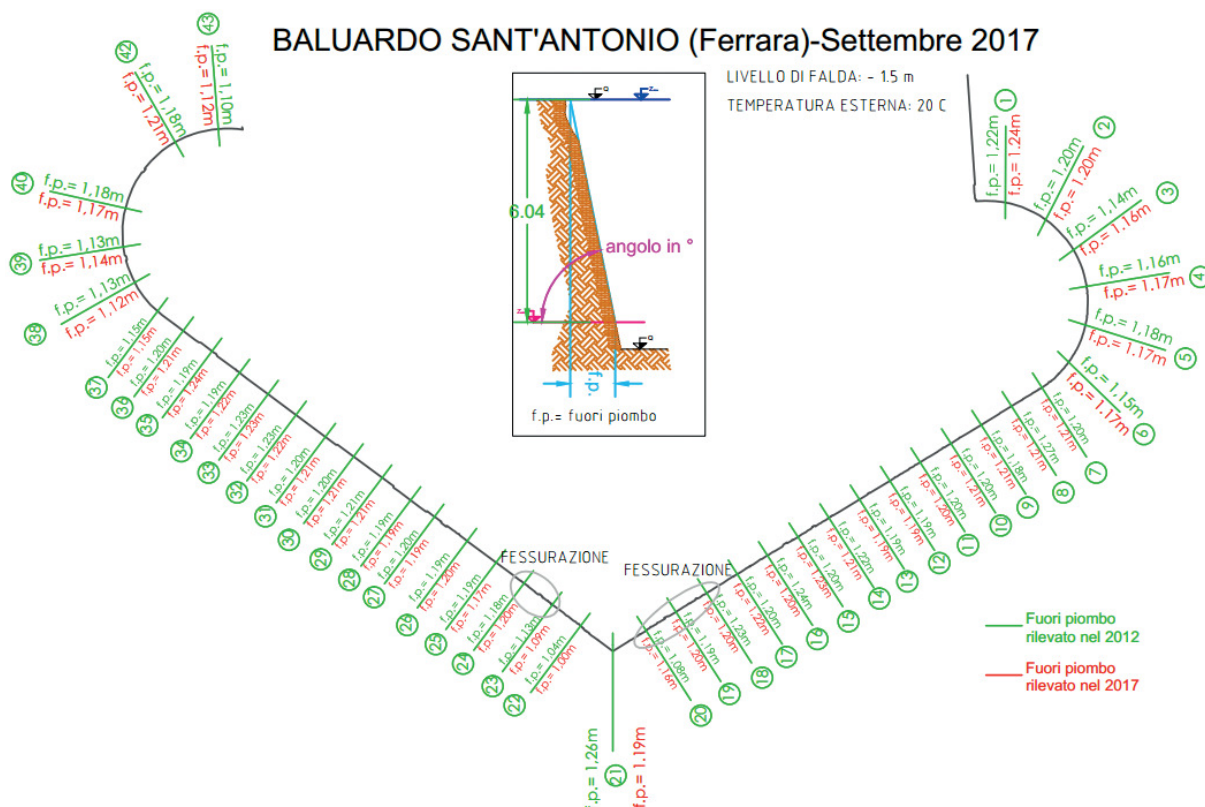


Fig. 7 - Analisi dei “fuori piombo” (f.p.) ottenuti dai rilievi *laser scanner* del 2017 (in rosso) e del 2012 (in verde): una diminuzione dei valori di fuori piombo segnala una rotazione verso l'esterno mura della corrispondente porzione di Baluardo.

in stazione lo strumento con errore millimetrico e dall'altro alle imprecisioni di determinazione delle coordinate del *target* catarifrangente incollato alle mire (Figg. 3c e 3d). Per risolvere queste problematiche sarebbe necessario realizzare dei pilastri con centramento forzato dello strumento (per eliminare l'errore di messa in stazione) e sostituire le mire con dei miniprismi “a perdere” da installare permanentemente nei punti da monitorare (l'errore di collimazione del centro dei miniprismi e la misura elettronica della distanza strumento-prisma risulterebbero migliori).

Per il monitoraggio della parte sommitale del Baluardo, invece, o comunque per monitorare con buona precisione un manufatto nel suo insieme (al posto di un monitoraggio puntuale), è risultato molto attendibile il rilievo realizzato con il *laser scanner* terrestre nelle modalità descritte e la sua ripetizione nel tempo. Sezionando infatti con lo stesso piano verticale i modelli ottenuti con il *laser scanner* terrestre in due o più epoche successive è stato possibile valutare la presenza di movimenti in atto in specifiche zone del Baluardo. Un parametro che può ad esempio essere utilizzato in questo caso è il fuori piombo ricavato dalla sezione verticale (f.p. in Fig. 7): una variazione significativa del fuori piombo nel tempo rileva un cedimento/movimento della struttura in corrispondenza della sezione stessa. In Fig. 7 si riportano i valori dei fuori piombo rilevati in corrispondenza di 43 sezioni verticali ottenute nel rilievo *laser scanner* del 2012 (eseguito per conto del Comune di Ferrara) e nell'ultimo rilievo del 2017. Una diminuzione del valore dei fuori piombo evidenzia una rotazione del Baluardo verso l'esterno delle mura spiegabile con una spinta della parte superiore del terreno e delle piante contenute all'interno del Baluardo. I valori

maggiori sono stati rilevati tra le sezioni 18 e 24 di Fig. 7, che in effetti corrispondono alla “punta” del Baluardo dove si evidenziano anche le maggiori fessurazioni. Per quello che riguarda il rilievo GNSS, come si è detto, al momento è stata realizzata una sola campagna di misura (“rilievo di zero”). Successive campagne di rilievo potranno consentire di valutare con precisione l’eventuale presenza di movimenti dell’intero baluardo dovuto, ad esempio, a fenomeni di subsidenza locale.

4. Conclusioni

La ricerca realizzata ha permesso di studiare le potenzialità degli strumenti topografici di elevata precisione (tradizionali ed innovativi) nel monitoraggio di un manufatto soggetto a cedimenti/deformazioni. I risultati, per quanto non possano essere considerati del tutto esaustivi, sono di sicuro interesse, in quanto forniscono importanti indicazioni su tipologia di strumenti e tecniche topografiche di monitoraggio utilizzare in casi analoghi al Baluardo di Sant’Antonio parte delle mura antiche della città di Ferrara. Livellazione geometrica di alta precisione e *laser scanner* terrestri con punti di scansione di coordinate note (in un opportuno sistema di riferimento locale) sono risultate le tecniche che, se integrate, consentono di ottenere le principali informazioni riguardanti gli eventuali fenomeni deformativi e di movimento in atto.

BIBLIOGRAFIA

- Beraldin J.A., 2004, *Integration of laser scanning and close-range photogrammetry: the last decade and beyond*, Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Vol. 35, part B, Istanbul, Turkey, 972-983.
- Guarnieri A., Milan N., Vettore A., 2013, *Monitoring of Complex Structure for Structural Control Using Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Photogrammetry*, International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis and Restoration, 7:1, 54-67.
- Park H.S., Lee H.M., Adeli H., 2007, *A new approach to health monitoring of structures: terrestrial laser scanning*, Computer-Aided Civil Infrastructure Eng. 22 (1), 19-30.
- Pellegrinelli A., Furini A., Russo P., 2014, *Earthquakes and ancient leaning towers: Geodetic monitoring of the bell tower of San Benedetto Church in Ferrara (Italy)*, Journal of Cultural Heritage, DOI: 10.1016/j.culher.2013.12.005.
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M., Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., 2012, *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations. Moment tensors and magnitudes*, Annals of Geophysics, 55, 4, 549-559, doi: 10.4401/ag-6159.