

Utilizzo del laser scanner per i beni culturali: analisi dell'assetto geometrico strutturale e di specifiche anomalie geometriche

Bertacchini E. (*), Capra A. (*), Castagnetti C. (*), Dubbini M. (**),
Rivola R. (*), Toschi I. (*)

(*) DIMeC, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile, Università di Modena e Reggio Emilia
Strada Vignolese 905, 41125 Modena

(**) DiDiSAG, Dipartimento di Discipline Storiche, Antropologiche e Geografiche, Università di Bologna
Via Zamboni 33, 40126 Bologna

Riassunto

La tecnologia Laser Scanner Terrestre (LST) permette di ottenere il modello tridimensionale complessivo di qualsiasi oggetto con elevata accuratezza e, per questo motivo, risulta oggi sempre più applicata in ambito architettonico. E' tuttavia necessario identificare l'approccio più adeguato in relazione alla tipologia di oggetto e allo scopo finale del rilievo, intendendo con questo sia la scelta della strumentazione da utilizzare sia l'adozione di specifiche tecniche per il trattamento dei dati.

Il presente lavoro si propone di sperimentare l'applicazione della tecnologia LST a strutture di elevato pregio architettonico – culturale: la Torre degli Asinelli e la Torre Garisenda (Bologna).

Entrambe richiedono un'attenta analisi strutturale in quanto il loro prevalente sviluppo verticale, denotato da altezza e snellezza significative, le rende una tipologia costruttiva particolarmente delicata. In entrambi i casi il rilievo, eseguito con un laser scanner distanziometrico ad impulsi, ha permesso di ottenere il modello complessivo della struttura con risoluzione sub-centimetrica. Nello specifico, lo studio applicato alla Torre degli Asinelli è stato volto alla determinazione di informazioni generali sull'assetto geometrico della struttura: sono stati infatti ricavati l'altezza della Torre, lo sviluppo del suo asse longitudinale e lo strapiombo. Le analisi relative alla Garisenda hanno invece interessato la fascia selenitica della Torre: all'analisi geometrica delle sezioni orizzontali è stata affiancata quella relativa al fenomeno di "spanciamento" particolarmente evidente su uno dei quattro lati. Le scelte adottate per l'esecuzione del rilievo e l'estrazione delle informazioni hanno permesso un'analisi limitata allo stato di fatto; in futuro verranno messe in campo strategie atte a permettere la ripetibilità nel tempo delle misure e delle successive analisi, al fine di porre le basi per un monitoraggio strutturale. A tale scopo, sarà necessario sperimentare un'adeguata e proficua integrazione tra differenti tecniche e strumentazioni, inquadrando tutte le future sperimentazioni e misure nel medesimo sistema di riferimento assoluto.

Abstract

Terrestrial Laser Scanning Technology (TLS) allows to obtain the overall three-dimensional model of the investigated object with high accuracy. For this reason, such a technology is now increasingly applied in architecture as well. However, strongly fundamental is the choice of the most appropriate approach depending on the type of the object and the final purpose of the survey. Both the choice of the most suitable instrumentation and the use of specific data processing strategies are of concern.

This paper aims to test the use of TLS for studying structures with high value from architectural and cultural points of view: Asinelli Tower and Garisenda Tower (located in Bologna-Italy).

Both structures require to be carefully analyzed for controlling stability because of their dominant vertical dimension along with their significant slenderness. Those details make them particularly

sensitive. The survey was performed with a time-of-flight (pulsed laser) laser scanner and resulted in the overall model of the structure with sub-centimeter resolution. For the Asinelli Tower, the goal was the identification of general information about the geometry of the structure such as the height of the tower, the development of its longitudinal axis and its overhang. Furthermore, for the Garisenda Tower, the analysis was mainly focused on the selenitic area located at the base of the Tower: both the geometry of horizontal sections and the phenomenon of the "belly flops" were investigated. This last one is particularly evident on the East side.

All the analyses allowed to extract information about the actual geometry and attitude of the structure at the present. Strategies to enable repeatability of measurements and deeper analyses are planned for the future. This plan could put the base for a future structural monitoring, that requires the integration of different techniques with measurements referred to the same reference frame.

Introduzione

La tecnologia Laser Scanner Terrestre (LST) sfrutta il principio su cui si basano tutti gli strumenti a scansione, ovvero la possibilità di convertire la forma fisica di un oggetto in un elevato numero di punti di coordinate note. Le potenzialità offerte sono interessanti, soprattutto se confrontate con quelle tipiche di un rilievo metrico tradizionale: basti pensare alla rapidità e sostanziale facilità con cui è possibile ottenere, tramite LST, un modello 3D quasi continuo di qualsiasi superficie e a qualsiasi scala, dall'ambito architettonico fino a quello ambientale. Tali vantaggi, però, perdono il proprio valore se non vengono affiancati da un rigoroso approccio metrico, per il quale il concetto di accuratezza è determinante e deve essere commisurato alle finalità del rilievo in ciascuna sua fase, dalla scelta della strumentazione all'analisi finale del dato estratto. Questa prerogativa risulta imprescindibile soprattutto se l'oggetto del rilievo è costituito da strutture particolarmente delicate, come quelle a prevalente sviluppo verticale: esse richiedono un'attenta analisi strutturale e un appropriato monitoraggio nel tempo (Bertacchini et al., 2009).

A tal proposito, il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile (DIMEC) dell'Università di Modena ha avviato una proficua attività di ricerca applicata alle Torri degli Asinelli e della Garisenda (Bologna), le quali rappresentano due esempi concreti di questa problematica. Lo studio, ancora in itinere, ha come obiettivo principale quello di mettere a punto una metodologia di rilievo specifica e ripetibile nel tempo, a partire dalla definizione di un sistema di riferimento assoluto rispetto al quale svolgere anche le sperimentazioni future. Per entrambe le Torri è stata scelta la tecnologia Laser Scanner Terrestre come metodologia di base; essa è però stata finalizzata ad analisi geometriche condotte a due scale differenti: per la Torre degli Asinelli la sperimentazione è stata indirizzata all'estrazione di informazioni geometriche sull'assetto globale della struttura (quota e strapiombo), per la Garisenda, invece, l'obiettivo peculiare era rappresentato dall'analisi del comportamento anomalo assunto dalla fascia inferiore della Torre.

1. Acquisizione dei dati LST

Il rilievo delle Torri è stato eseguito nel mese di Luglio 2009 tramite lo strumento HDS ScanStation 2 di Leica Geosystems (Figura 1). Si tratta di un Laser Scanner Terrestre ad impulsi con campo di vista panoramico e in grado di acquisire decine di migliaia di punti al secondo con portata massima di 300 m. Per garantire la correzione automatica dell'errore di verticalità su entrambe le letture angolari, lo strumento è inoltre dotato di un compensatore bi-assiale ad alta precisione (risoluzione 1").

Per entrambe le Torri la fase di acquisizione è stata preceduta da un'accurata definizione delle posizioni di presa che, sulla base della geometria dell'opera e dell'accessibilità dei luoghi, ha portato all'adozione dello schema di Figura 2. In particolare, per acquisire dati sull'intero sviluppo verticale della Torre degli Asinelli sono state eseguite 15 stazioni di scansione, comprensive di punti di presa in quota (simboli in ciano, verde e fucsia). Da ciascuno di essi, le nuvole di punti sono state acquisite con passo di campionamento sulla superficie di interesse pari a 8 mm, uniforme



Figura 1 – Il Laser Scanner utilizzato: Scan Station 2.

in orizzontale e verticale. Le scansioni della Torre Garisenda sono state invece effettuate da tre punti di presa (simboli in rosso), senza prevedere stazioni in quota: in questo caso, infatti, l'attenzione è stata volta principalmente a studiare il comportamento dei primi quattro metri circa di altezza della struttura, corrispondenti alla zona ricoperta di lastre in gesso selenitico. Il passo di scansione è stato scelto in modo tale da acquisire una nuvola di punti in grado di descrivere tale porzione strutturale con sufficiente densità di informazioni (risoluzione spaziale di 1 cm circa). Infine, da ogni punto di stazione sono state acquisite le immagini, con la fotocamera integrata della ScanStation2, per la texturizzazione del modello 3D a punti.

La registrazione delle nuvole di punti acquisite da ciascuna stazione di presa è stata condotta primariamente utilizzando dei target retro-riflettenti che fungessero da punti omologhi facilmente riconoscibili dai software per l'elaborazione dei dati. Per quanto riguarda la Torre degli Asinelli, sono stati posizionati sulle pareti della struttura e sugli edifici

limitrofi 44 target da 3 pollici di carta retro-riflettente 3M di colore blu (Figura 3): per permettere l'esatta identificazione del punto centrale, essi sono stati inoltre dotati di un marker bianco avente diametro di 2.5 cm. Allo scopo di inquadrare il modello 3D della Torre in un sistema di riferimento assoluto esterno, si prevede inoltre la futura realizzazione di una rete topografica con l'acquisizione dei markers suddetti tramite strumentazione ad alta precisione. L'allineamento delle scansioni della Garisenda è stato realizzato mediante 6 target, tutti disposti esternamente rispetto alla struttura; sulla base di quanto già realizzato con successo per gli Asinelli, si applicheranno alle pareti delle mire idonee a resistere nel tempo, ma tali da non danneggiare le superfici murarie. Esse saranno oggetto di idonei rilievi topografici per poter effettuare in futuro dei controlli puntuali con un grado di accuratezza decisamente superiore a quello ottenibile da semplici scansioni delle facciate della Torre.



Figura 2 – Lo schema di acquisizione della Torre degli Asinelli (punti di presa in ciano, verde, fucsia) e della Garisenda (punti di presa in rosso).



Figura 3 – L'applicazione dei target retro-riflettenti alle pareti della Torre degli Asinelli.

2. Elaborazione dei dati LST

L'elaborazione dei dati relativi alla Torre degli Asinelli è stata condotta utilizzando il software Cyclone 6.0 di Leica Geosystems e si è articolata in varie fasi successive. Inizialmente, ogni nuvola di punti è stata filtrata manualmente per eliminare i dati ridondanti e/o non appartenenti alla struttura; le nuvole "pulite" sono state quindi allineate in un unico sistema di riferimento, generando

infine il modello 3D complessivo della Torre (Figura 4 a sinistra). Quest'ultimo è risultato costituito da oltre 150 milioni di punti e tale da descrivere in modo integrale ed accurato tutte le principali componenti strutturali. L'errore massimo di registrazione, inteso quale distanza tra le posizioni del medesimo vertice in nuvole di punti distinte, è sempre stato contenuto al di sotto del centimetro.

Il modello 3D della Garisenda (Figura 4 a destra) è stato invece ottenuto elaborando i dati con il software JRC 3D Reconstructor di Gexcel. Le nuvole grezze sono state pre-processate e pre-allineate utilizzando i target esterni, andando poi a perfezionarne la registrazione tramite l'algoritmo di ICP (*Iterative Closest Point*) del software. L'ICP ha innescato un processo iterativo che, ricercando in modo automatico le coppie di punti omologhi nella zona di sovrapposizione tra due scansioni, ne è andato a correggere la posizione relativa, fin tanto che le distanze tra i vertici scelti non risultassero inferiori all'errore massimo prestabilito. In questo modo, è stata ottenuta una precisione media di registrazione pari a 1.2 mm, valore ritenuto accettabile anche in relazione alla risoluzione spaziale delle scansioni. Si è quindi proceduto al filtraggio manuale del modello 3D a punti, andando ad eliminare rumore e *outliers*; infine è stato generato il modello a superfici continue della Torre (*Digital Surface Model*), adottando una modellazione multi-risoluzione a maglia triangolare. Tale algoritmo di *Meshing* ha creato delle superfici triangolari semplificate nelle aree più regolari, andando invece a descrivere le zone più complesse dal punto di vista geometrico tramite la creazione di mesh più dense.

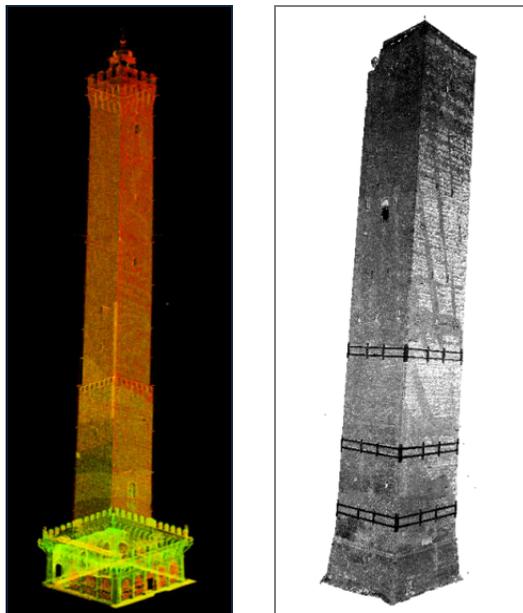


Figura 4 – Il modello 3D degli Asinelli (sinistra) e della Garisenda (destra).

3. Analisi dei dati LST

I modelli 3D generati hanno rappresentato il punto di partenza per estrarre le informazioni geometriche di interesse per entrambe le Torri. L'analisi dei dati relativi agli Asinelli è stata indirizzata alla determinazione dell'assetto geometrico globale della struttura, andando a valutare nello specifico sia l'altezza che lo sviluppo verticale del suo asse longitudinale.

Per quanto riguarda il primo dato, l'altezza della Torre degli Asinelli è stata misurata direttamente sul modello 3D ed è risultata pari a 97.38 m, intesi come distanza lungo l'asse longitudinale della torre tra il piano di calpestio in corrispondenza dell'ingresso e la base della sfera posizionata sulla sommità della cupola. La valutazione dello strapiombo, invece, è stata eseguita dopo aver esportato

delle sottili *slices* orizzontali dal modello 3D. Esse sono state quindi vettorializzate e analizzate in ambiente CAD (Figura 5), così da poter determinare la posizione del baricentro di ciascuna sezione.

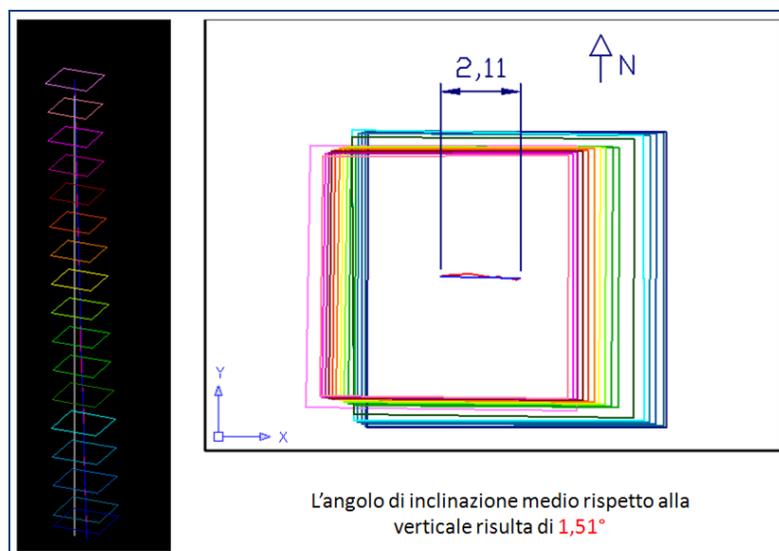


Figura 5 – Lo strapiombo della Torre degli Asinelli tra quota 10 m e la sommità.

La struttura è stata suddivisa in tre tronchi di piramide, per ciascuno dei quali è stato ricavato l'andamento dell'asse baricentrico mediante regressione lineare (Capra et al., 2011). La Torre è risultata significativamente inclinata solo verso Ovest, con un angolo di inclinazione medio rispetto alla verticale pari a 1.51°, a cui è corrisposto un fuori centro complessivo pari a 2.38 m. Se in modulo tali valori, confrontati anche con quelli pubblicati dal Cavani (Cavani, 1912-13-17-19), non sono stati giudicati pericolosi allo stato attuale per la stabilità statica della struttura, essi hanno comunque fornito un'ulteriore motivazione alla predisposizione di un sistema di monitoraggio degli eventuali spostamenti e/o deformazioni strutturali, soprattutto in virtù dell'altezza e della snellezza da cui è caratterizzata la Torre. Il primo passo in questa direzione sarà rappresentato dal rilievo topografico dei markers applicati alle pareti, così da effettuare controlli puntuali "inquadri" all'interno un sistema di riferimento assoluto rispetto al quale saranno elaborati tutti i dati futuri.

Il modello 3D della Torre Garisenda è stato analizzato per indagare nello specifico il comportamento assunto dalla fascia selenitica inferiore della struttura; in particolare, dato che la Torre è caratterizzata da un'accentuata inclinazione verso Est, si è voluto valutare l'eventuale effetto di "spanciamento" presente sul lato orientale. Come è già stato precisato, sulla struttura non sono tuttora presenti dei target: nonostante se ne preveda l'applicazione per il monitoraggio nel tempo della Torre, il primo problema che è stato affrontato nel presente studio è stato quello di individuare un sistema di riferimento assoluto "richiamabile" anche in futuro. A tale scopo, sono stati individuati tre punti sulla facciata Est, in corrispondenza degli spigoli esterni della catena di contenimento inferiore (Figura 6): essendo ritenuti solidali alla struttura e privi di movimenti relativi significativi, essi sono infatti stati utilizzati per definire il sistema di riferimento per le future analisi. La terna di coordinate destrorsa (Figura 7) è stata scelta con origine nel punto 1, asse z secondo la verticale strumentale, asse x appartenente al piano passante per i tre punti e asse y univocamente determinato di conseguenza.

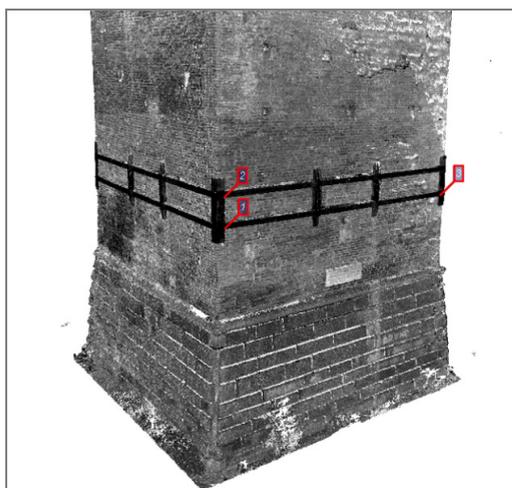


Figura 6 – Lo spigolo Sud-Est della Garisenda con l'indicazione dei tre punti scelti.

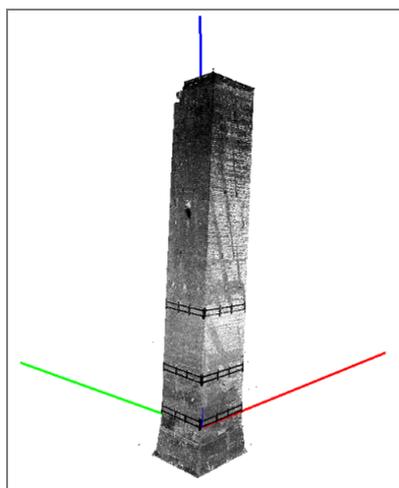


Figura 7 – Lo spigolo Sud – Est della Garisenda con il sistema di riferimento adottato.

Come per gli Asinelli, dal modello 3D sono state estratte delle sezioni orizzontali a diverse quote: in questo caso, però, sono stati sezionati solo i primi 4 m di altezza, estraendo 40 *slices* orizzontali con passo 10 cm l'una dall'altra. Inoltre è stata evitata la fase di vettorializzazione: le sezioni orizzontali sono infatti state esportate in ambiente CAD direttamente come polilinee 3D. Tale analisi ha evidenziato un comportamento singolare assunto dal lato orientale della fascia selenitica, effetto particolarmente apprezzabile se confrontato con l'assetto geometrico dei lati esposti a Nord, Ovest e Sud. Mentre questi ultimi presentano, procedendo dal basso verso l'alto, una costante ed omogenea inclinazione della propria parete verso l'interno della struttura, il lato orientale assume un'inclinazione decisamente minore e non omogenea su tutta la lunghezza della facciata.

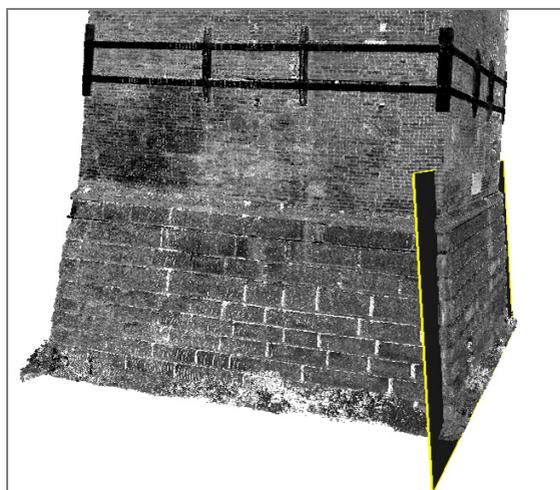


Figura 8 – Il piano di best fit del lato Est.

Si è dunque voluto procedere con un'indagine più approfondita di tale effetto e a questo scopo è stato utilizzato l'algoritmo di *inspection* del software JRC 3D Reconstructor. Esso è in grado di calcolare le distanze relative tra una nuvola di punti e una superficie di riferimento, distanze misurate lungo la normale a ciascun triangolo della mesh. Nel caso in esame, per ciascun lato della Torre sono stati individuati quattro punti in corrispondenza degli spigoli della fascia selenitica e, a partire da essi, è stato generata una superficie piana: come è evidente dalla Figura 8, tale piano risulta approssimare l'andamento complessivo di ciascuna parete. I quattro piani di *best fit* sono stati quindi traslati parallelamente a se stessi di 50 cm verso l'interno della Torre e

assunti quali superfici di riferimento, rispetto alle quali effettuare l'*inspection* delle nuvole di punti corrispondenti alle quattro facciate. Tali punti sono stati quindi colorati in base alle distanze misurate, sempre positive in seguito alla traslazione del piano, e secondo la medesima scala

cromatica: si è assunto 50 cm come distanza minima (colore blu) e 70 cm come massima (colore rosso). Il colore blu evidenzia quindi i punti che si trovano lungo il piano di *best fit* della parete, mentre procedendo verso la colorazione rossa vengono evidenziati eventuali fenomeni geometricamente anomali rispetto a tale piano.

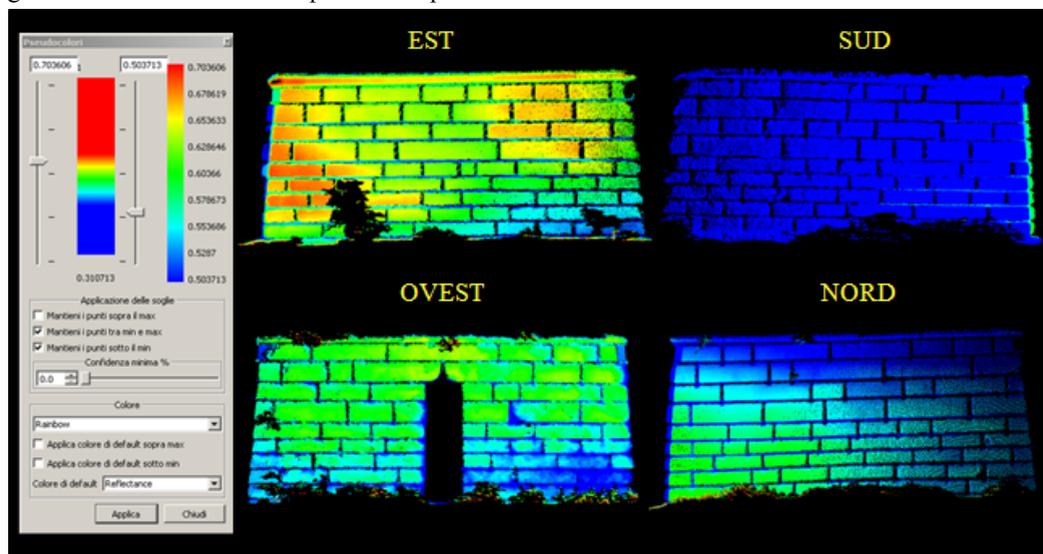


Figura 9 – I risultati dell’inspection: le quattro facciate della fascia selenitica sono colorate in base alla distanza dal proprio piano di riferimento, dal blu (distanza di 50 cm) al rosso (distanza di 70 cm).

Analizzando i risultati riportati in Figura 9 è stato confermato il comportamento anomalo del lato Est della fascia selenitica: la colorazione, molto meno omogenea rispetto a quella degli altri lati, ha evidenziato la presenza di scostamenti dal piano di riferimento con picchi massimi dell’ordine di 20 cm (colore rosso) in corrispondenza dello spigolo Sud-Est e della parte alta verso Nord. Tali due zone sono quindi risultate oggetto di un significativo fenomeno di “rigonfiamento”, inteso come anomalia geometrica rispetto ad un assetto teorico, la cui entità suggerisce anche per questa Torre la predisposizione di un idoneo sistema di monitoraggio futuro.

Conclusioni

La sperimentazione posta finora in essere ha dimostrato che l’utilizzo della tecnologia Laser Scanner Terrestre può essere correttamente finalizzato all’estrazione di informazioni relative all’assetto geometrico strutturale, a patto però che l’approccio adottato risulti metricamente rigoroso. Ciò appare imprescindibile soprattutto se si ha a che fare con strutture alte e snelle, come le Torri degli Asinelli e della Garisenda, oggetto del presente studio. Sia l’analisi geometrica globale applicata alla prima, che quella relativa alla fascia selenitica della seconda, hanno infatti evidenziato la necessità di predisporre un adeguato sistema di monitoraggio che controlli nel tempo il “comportamento” strutturale. Tali osservazioni dovranno, in particolare, registrare le variazioni di strapiombo della Torre degli Asinelli e l’andamento degli spancamenti presenti sul lato orientale della Garisenda, in corrispondenza della sua fascia inferiore, che possono essere letti come anomalie geometriche rispetto ad assetti teorici. La presente ricerca è dunque stata un interessante punto di partenza e dovrà proseguire nella direzione di una proficua integrazione di tecniche e strumentazioni differenti, inquadrando tutte le analisi future nel medesimo sistema di riferimento. A questo scopo, e per effettuare controlli puntuali ad alta precisione, saranno utilizzati i marker a parete presenti sugli Asinelli e ne saranno posizionati di analoghi sulla superficie della Garisenda.

Bibliografia

- Bertacchini, E., Boni, E., Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M. (2010), "Terrestrial laser scanner for surveying and monitoring middle age towers", *Proceedings of XXIV FIG International Congress 2010* (ISBN 978-87-90907-87-7)
- Bertacchini, E., Boni, E., Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M. (2009), "Rilievo laser scanner per lo studio e l'analisi di strutture a sviluppo prevalentemente verticale: Torre Asinelli (Bologna), Torre Ghirlandina e della Sagra di Carpi (Modena)", *Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA09*
- Bertacchini, E., Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M. (2008), "Il Monitoraggio della Torre civica di Modena detta della 'Ghirlandina'", *Atti Convegno Nazionale SIFET08*
- Bertacchini, E., Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M. (2008), "Il rilievo laser scanner 3D della Torre Campanaria della Pieve di Santa Maria in Castello, detta La Sagra", *Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA08*
- Capra A., Bertacchini E., Castagnetti C., Dubbini M., Rivola R., Toschi I. (2011), "Rilievi Laser Scanner per l'analisi geometrica delle torri degli Asinelli e della Garisenda", *INARCOS*, 719: 35-42
- Castagnetti C., Bertacchini E., Boni E., Capra A., Dubbini M. (2011), "Il laser scanning terrestre per l'analisi di edifici di interesse storico ed artistico", *Geomatica – Le radici del futuro, Tributo a Sergio Dequal e Riccardo Galetto*, 99-107 (ISBN 88-901939-6-4)
- Castagnetti, C., Cielo, R. (2009), "Il rilievo laser scanner 3D della villa romana di Montegibbio (Sassuolo, MO)", *Collana Quaderni di Archeologia dell'Emilia Romagna* (ISSN 1593-2680)
- Cavani F. (1912), *Sulla pendenza e sulla stabilità della torre degli Asinelli di Bologna*, Bologna
- Cavani F. (1913), *Movimenti della sommità rispetto alla base della torre degli Asinelli*, Bologna
- Cavani F. (1917), *Sulla pendenza delle principali torri di Bologna, Modena e Pisa*, Bologna
- Cavani F. (1919), *Su alcune questioni relative alla pendenza delle torri*, Bologna