

Il laser scanner per uso diagnostico: dallo studio morfometrico all'analisi delle deformazioni delle Torri di San Gimignano

Alessia Nobile

Libera professionista, Architetto e Dottore di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Elettronici
Firenze, alessianobile@gmail.com

Riassunto

La ricerca, avviata nel 2011 e focalizzata sulla definizione di una banca dati tridimensionale a supporto della valutazione del rischio sismico delle Torri di San Gimignano, è stata condotta prevalentemente con sistemi a scansione 3D.

Il presente contributo, sviluppato in occasione della tesi di Dottorato della scrivente (Nobile A., 2013), ha portato alla consapevolezza che, a partire dalla banca dati 3D, sempre aggiornabile e interrogabile, è possibile modulare l'elaborazione in funzione degli obiettivi interdisciplinari condivisi. Si è proposto, pertanto, un utilizzo diagnostico della tecnica di rilievo laser scanning: l'attenzione non si pone soltanto sugli elementi artistici e architettonici ma anche sugli elementi costitutivi e costruttivi, su eventuali testimonianze di fessurazioni e deformazioni critiche per l'effettiva stabilità della struttura.

Le Torri di San Gimignano costituiscono un patrimonio di valore riconosciuto dall'umanità e, come tale, non possono essere esaminati soltanto singolarmente ma richiedono una documentazione integrativa alla scala urbana: ogni torre, infatti, è strettamente relazionata alle altre per schema tipologico e caratteri costruttivi, costitutivi e distributivi. Nello specifico, per la documentazione alla scala urbana si è ritenuto fondamentale garantire la comune referenziazione di tutti le torri; per la documentazione alla scala dell'edificio si è rilevata la geometria con l'obiettivo di individuarne il baricentro geometrico, i fuori piombo per definirne lo stato di salute e le dinamiche di eventuali dissesti. Si riportano, a titolo esemplificativo, lo studio diagnostico sulle torri binate delle due famiglie più importanti, i guelfi Salvucci e i ghibellini Ardinghelli.

Abstract

The research, started in 2011 and focused on the identification of San Gimignano Towers' seismic risk, was carried out mainly with 3D scanning systems.

This paper, developed during the author's PhD thesis (Nobile A., 2013), raised the awareness that, on the basis of the 3D data set, which can be updated and queried at any time, it's always possible to adjust the processing phase according to the fixed interdisciplinary goals. It is therefore proposed a diagnostic use of the laser scanning surveying technique: attention is not only given to the artistic and architectural elements but also to the constituent and constructive elements, on any evidence of cracks and deformations which may weaken the stability of the structure.

The San Gimignano Towers represent an urban environment unique in the world and, such as, must be documented both at the scale of the building to the urban one: each tower is, in fact, closely related to each other by typological scheme and constructive, constituent and distributive characters. Specifically, to document the urban scale, all towers have been referenced in a local system; to document the scale of the building, I surveyed the external geometry of each tower with the aim to locate the geometric centre of gravity, the out of plumb to define the conservation status and to interpret the structural behaviour through a successive numerical modelling.

Below is shown, as an example, the diagnostic study on the twin towers of the two most important families, the Guelphs Salvucci and the Ghibellines Ardinghelli.

Introduzione

Il centro storico di San Gimignano è stato scelto come sito pilota perché rappresenta un contesto urbano singolare nel panorama mondiale per le sue emergenze monumentali fortemente “a rischio” nel caso di eventi sismici.

Il territorio si trova in un’area di pericolosità sismica relativamente ridotta, con il massimo evento registrato nel 1869 di intensità pari al VII grado della scala Mercalli. Gli effetti, sebbene non disastrosi, sono comunque rappresentativi di un quadro di danneggiamento diffuso e particolarmente intenso sul patrimonio monumentale: ne consegue l’importanza di una stima dello scuotimento atteso in occasione di futuri eventi sismici, scossa potenzialmente pericolosa per questa tipologia di manufatti a prevalente sviluppo verticale.

La più antica formazione del nucleo abitato di San Gimignano risale almeno al III secolo a.C. come testimoniano i numerosi ritrovamenti archeologici nel territorio circostante.

Nel 1199, nel pieno del suo splendore economico, il paese guadagna la propria indipendenza comunale ma non mancano le lotte intestine tra guelfi e ghibellini. Nasce un ceto aristocratico urbano che esprime la propria supremazia politica e sociale nella costruzione di 72 torri. Oggi ne restano soltanto 16, con altre scapitozzate intravedibili nel tessuto urbano.

Acquisizione digitale

Il rilievo con tecnica laser scanning è stato realizzato dall’autrice, dal 2011 al 2012, nell’ambito di un assegno di ricerca universitario presso il Laboratorio GeCo dell’Università degli Studi di Firenze.

Per consentire una documentazione sia delle torri che del contesto urbano nel quale sono inserite si è adottato un approccio multiscala con una comune referenziazione dei dati.

Il lavoro on-site, condotto in cinque campagne di misura (*Figura 1*), è stato realizzato con laser scanner distanziometrico a differenza di fase (HDS6000, Leica Geosystems): 41 postazioni di scansione per un totale di 44 GB di dati grezzi.

I dati acquisiti sono stati allineati prevalentemente tramite punti omologhi e referenziati in un sistema locale coincidente con una delle posizioni di scansione. La registrazione è stata risolta con un residuo dell’ordine del centimetro. Il modello tridimensionale complessivo è costituito da oltre 1.5 miliardo di punti.



Figura 1. Pianta di riferimento del centro storico di San Gimignano con indicazione delle torri acquisite per ogni campagna di misura.

La documentazione metrica

Il modello 3D ha permesso, da un lato, la possibilità di realizzare una cartografia all'interno della quale contestualizzare i singoli edifici; dall'altro, la lettura dei rapporti che legano le torri fra loro: schema tipologico e caratteri costruttivi, costitutivi e distributivi.

Per la documentazione alla scala dell'edificio si è rilevata la geometria esterna di ogni torre con l'obiettivo di definire lo stato di conservazione e consentire la realizzazione di un supporto metrico per l'interpretazione del comportamento strutturale attraverso successive modellazioni numeriche.

In particolare, è stato previsto a scala urbana:

- l'acquisizione metrica tridimensionale con laser scanner degli esterni di tredici torri: Salvucci, Pettini, Chigi, Collegiata, Propositura, Grossa, Rognosa, Ardinghelli, Becci, Cugnanesi, Coppi – Campatelli (*Figura 2*).

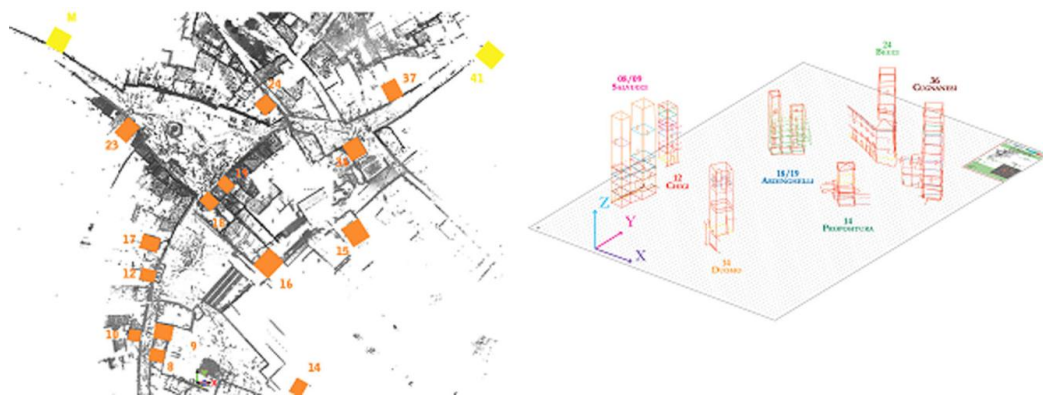


Figura 2. A sinistra, vista zenitale del modello complessivo di punti. In arancione, le torri acquisite. A destra, vista dei modelli 3D wireframe degli esterni delle torri.

La documentazione strutturale e diagnostica

A scala dell'edificio, considerando come caso studio le torri binate delle due famiglie più importanti, i guelfi Salvucci e i ghibellini Ardinghelli:

- l'analisi della geometria per individuare il baricentro geometrico;
- l'analisi delle trasformazioni costruttive;
- il calcolo delle deformazioni.

Analisi sulla geometria del modello 3D: L'uso diagnostico del laser scanner, soprattutto nell'ambito strutturale, risulta evidente quando è possibile effettuare analisi sulla geometria, a partire dalla nuvola di punti, per estrarre parametri ed informazioni utili ai fini della valutazione della stabilità della struttura. Un dato significativo è l'individuazione dell'eventuale strapiombo, particolarmente importante nel caso di strutture snelle.

L'analisi di verticalità delle coppie di torri è stata inizialmente eseguita esportando delle slices del modello di spessore ridotto (1 cm). La doppia simmetria della struttura ha permesso di definire il baricentro geometrico di ogni sezione nello spazio 3D. L'andamento dell'asse, ottenuto collegando i baricentri, ha evidenziato:

- per le Torri Salvucci, uno sbandamento trascurabile in direzione Nord-Sud (distanza massima inferiore ai 2 cm per la torre nord; 4 cm per la torre sud); mentre nella direzione Est è stato riscontrato, per la torre sud, un lieve scostamento dalla verticalità (distanza massima 8 cm), per la torre nord uno scostamento poco superiore a 18 cm (*Figura 3*). Il fuori piombo così misurato rappresenta la distanza planimetrica tra il baricentro della prima sezione orizzontale (quota di 9 m) e la sommità delle torri (42.38 m per la nord e 44.24 m per la sud).

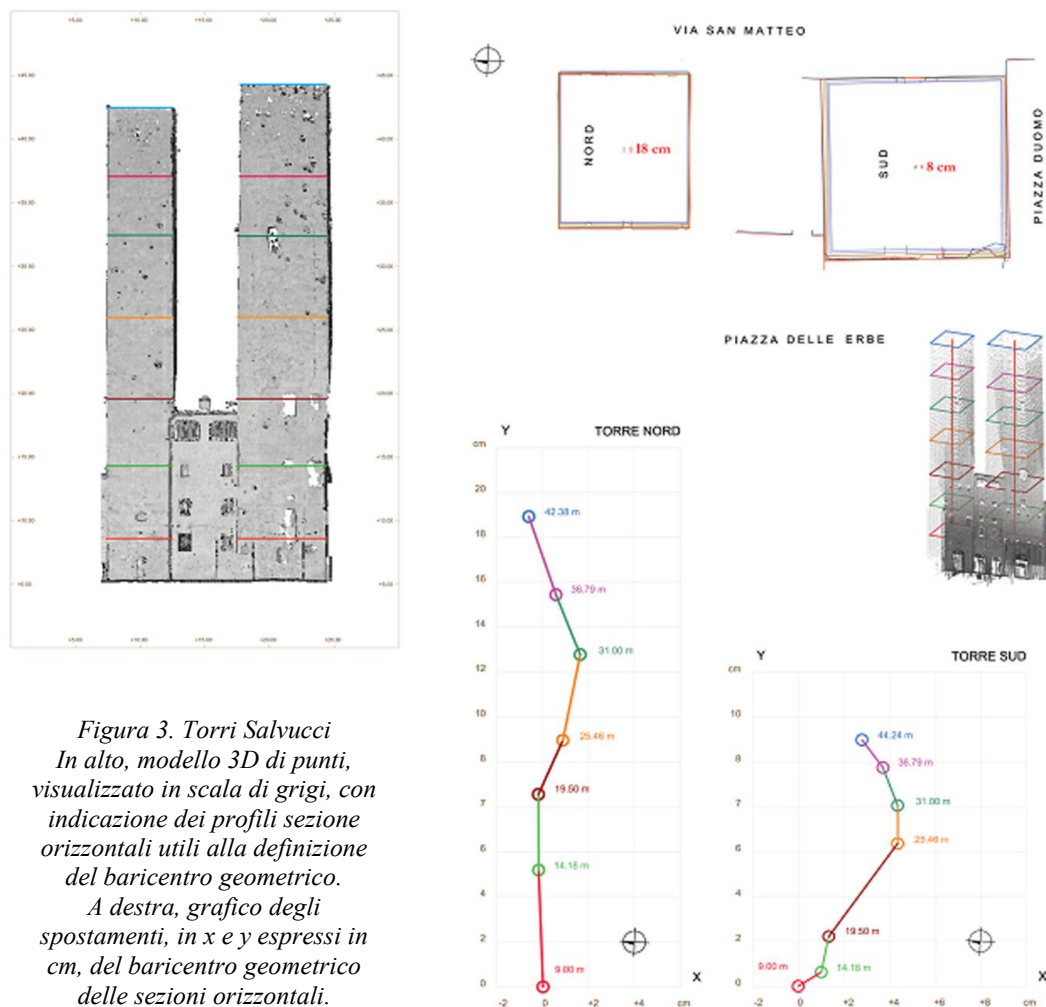


Figura 3. Torri Salvucci
 In alto, modello 3D di punti, visualizzato in scala di grigi, con indicazione dei profili sezione orizzontali utili alla definizione del baricentro geometrico.
 A destra, grafico degli spostamenti, in x e y espressi in cm, del baricentro geometrico delle sezioni orizzontali.

- per le Torri Ardinghelli, uno sbandamento trascurabile in direzione Est-Ovest (distanza massima inferiore ai 6 cm); mentre, nella direzione Nord-Sud, è stato riscontrato un notevole scostamento dalla verticalità per entrambe le torri, ma in verso opposto: per la torre sud uno scostamento poco superiore ai 18 cm in direzione sud; per la torre nord uno scostamento poco superiore ai 26 cm in direzione nord (Figura 4). Il fuori piombo così misurato rappresenta la distanza planimetrica tra il baricentro della prima sezione orizzontale (quota di 3.73 m) e la sommità delle torri (30.76 m per la nord e 23.77 m per la sud escluse le falde del tetto).

In rapporto ai brevi tempi di rilievo (20% del totale) ed elaborazione (80% del totale), tale metodo di indagine e restituzione delle caratteristiche geometriche permette un'analisi accurata della quota e dell'inclinazione (accuratezza centimetrica) di strutture caratterizzate da un'altezza elevata e quindi non rilevabili con altre tecniche in modo semplice.

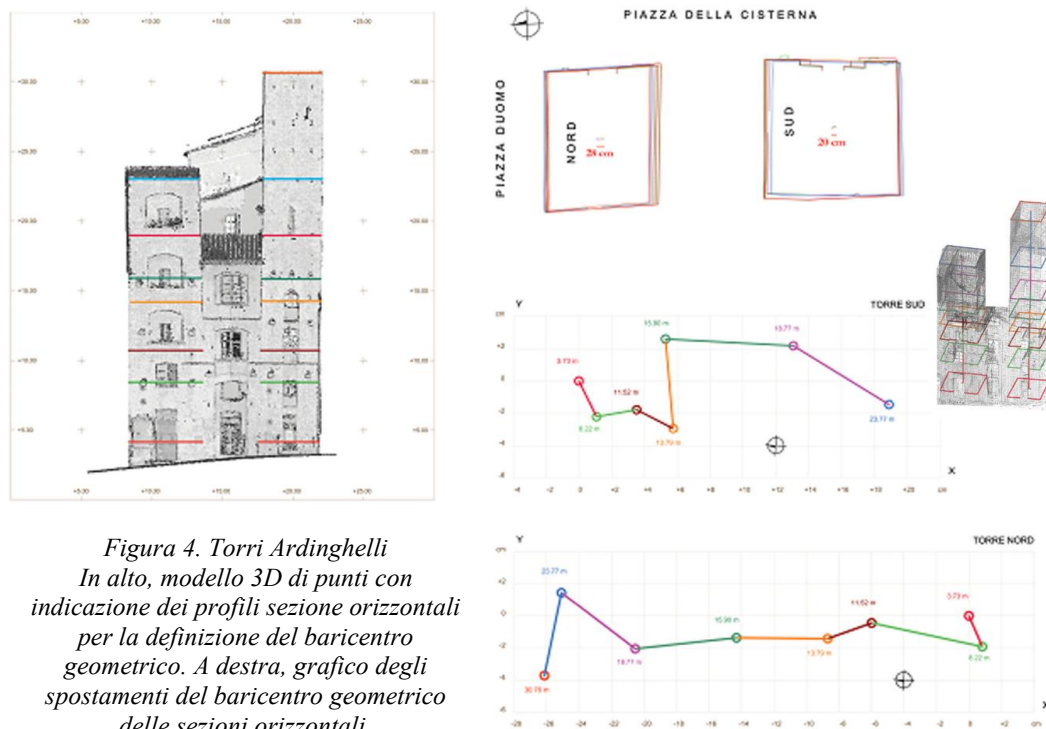


Figura 4. Torri Ardinghelli
 In alto, modello 3D di punti con indicazione dei profili sezione orizzontali per la definizione del baricentro geometrico. A destra, grafico degli spostamenti del baricentro geometrico delle sezioni orizzontali.

Analisi delle trasformazioni costruttive: Gli elaborati grafici hanno permesso di evidenziare le trasformazioni costruttive che hanno investito le quattro torri. Mentre le Torri Salvucci sono state oggetto di lievi cambiamenti dovuti soprattutto al cambio di destinazione d'uso (attività commerciali al piano terreno di via San Matteo e abitazione ai livelli superiori); le Torri Ardinghelli hanno subito modifiche strutturali determinanti. Il primo intervento significativo si ha nel 1870 quando, a seguito del terremoto del 26 settembre 1869, le torri sono state ridotte alla stessa quota.



Figura 5. Torri Ardinghelli. A sinistra, le torri nella loro struttura originaria (De Fleury, 1874). Al centro, foto del 1915-1920 con vista della torre nord prima del rialzamento (Archivio storico Alinari). A destra, foto dello stato attuale.

E' probabilmente a causa di questo evento sismico, il massimo registrato nella cittadina, che le torri hanno assunto l'attuale assetto di divaricamento.

Questa evidente conformazione fuori piombo non impedì, tuttavia, la costruzione di un sopralzo della torre nord intorno al 1920 circa (Figura 5).

Il calcolo delle deformazioni: A partire dalla banca dati 3D, sulle torri Ardinghelli è stata effettuata una valutazione delle deformazioni attraverso il confronto dei prospetti con due piani di riferimento: uno verticale, per osservare le grandi deviazioni della torre, principalmente dovute all'inclinazione; uno interpolante, per evidenziare le irregolarità e le deformazioni rispetto ad una situazione non alterata.

Non disponendo, come accade spesso, di rilievi precedenti caratterizzati dalla stessa precisione e densità di informazione, rispetto ai quali calcolare la deformazione come spostamento differenziale, le differenze tra i punti rilevati ed il piano di riferimento, cioè le deviazioni, sono state intese come deformazioni, o meglio, come deformazioni compressive rispetto ad una condizione di ipotetica regolarità della struttura (Doglioni, Mazzotti, 2007).

Le variazioni effettive dei quattro prospetti di entrambe le torri (Figure 6 - 8) rispetto al piano di riferimento verticale, avvalorano i risultati ottenuti dall'analisi geometrica del modello 3D: la torre sud presenta un notevole scostamento dalla verticalità sul fronte nord (pendenza di 0.87° , fuori piombo di 31 cm) e, di contro, la torre nord presenta un uguale scostamento dalla verticalità, in direzione opposta, sul fronte sud (pendenza 0.85° , fuori piombo di 41 cm, nell'ipotesi di unico tronco deformato; pendenza di 0.86° della porzione antica e 0.83° della porzione novecentesca nell'ipotesi di due tronchi).

E' interessante notare come la sopraelevazione della torre nord, a partire dalla quota di circa 23 m, abbia un'inclinazione in verso opposto (1.97° verso sud) rispetto a quella della sottostante struttura medioevale (1.15° verso nord) sul fronte nord, mentre inclinazione dello stesso verso (0.86° e 0.83° verso nord) sul fronte sud (Figura 7).

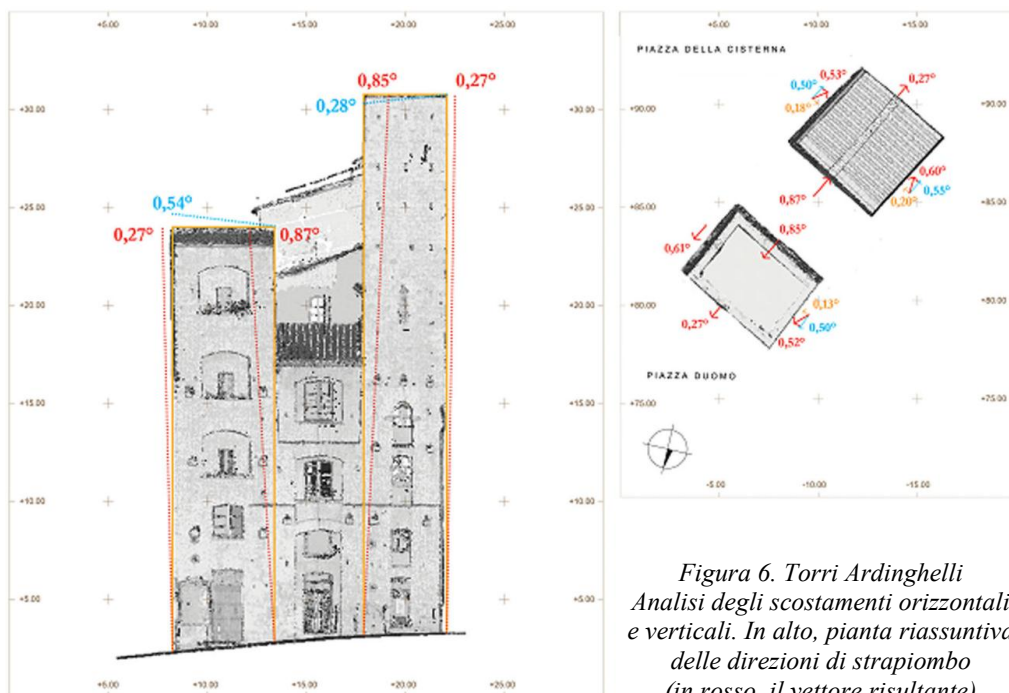


Figura 6. Torri Ardinghelli
 Analisi degli scostamenti orizzontali
 e verticali. In alto, pianta riassuntiva
 delle direzioni di strapiombo
 (in rosso, il vettore risultante).

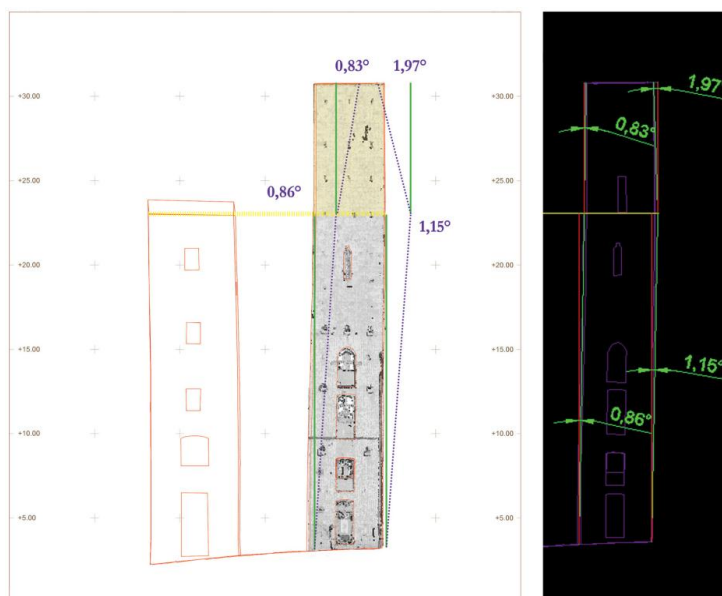


Figura 7. Torri Ardinghelli. Analisi degli scostamenti verticali misurati sulla torre nord. La pendenza è calcolata suddividendo la torre in due tronchi: il I costituito dalla struttura medioevale e il II dall'aggiunta novecentesca.

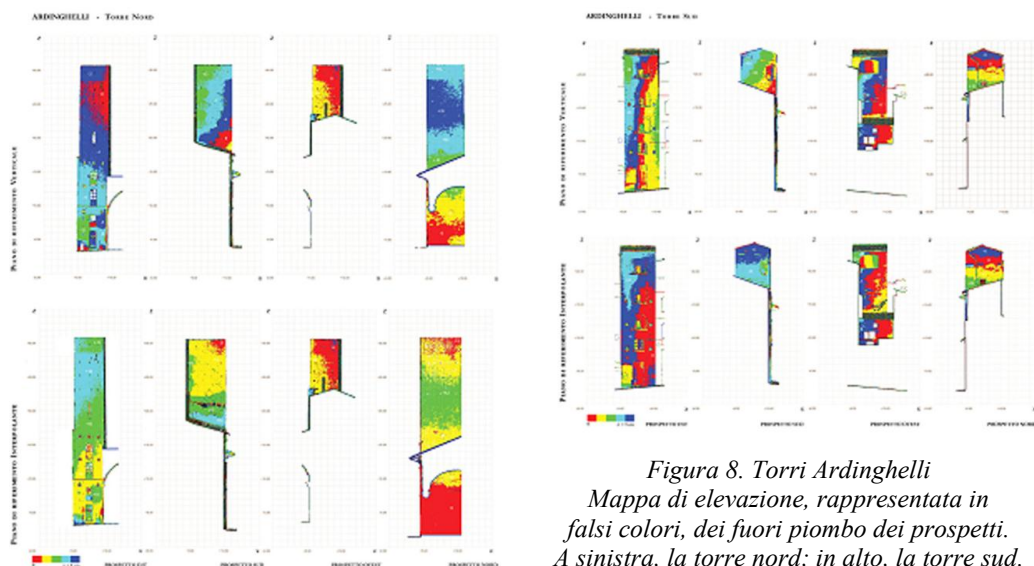


Figura 8. Torri Ardinghelli
Mappa di elevazione, rappresentata in falsi colori, dei fuori piombo dei prospetti. A sinistra, la torre nord; in alto, la torre sud.

L'analisi delle deformazioni, rispetto al piano di riferimento interpolante, ha evidenziato continui cambiamenti di regime, con alternanza di bombature e rigonfiamenti. In particolare, per la torre nord (Figura 8, sinistra), si osservano scostamenti dal piano di riferimento:

- dall'alto verso il basso, nei prospetti nord e sud interessati dalla maggiore inclinazione, con un rigonfiamento dell'ordine di 5-6 cm nella porzione limitrofa alla linea di giunzione tra la muratura antica medioevale e quella ricostruita nel secondo decennio del '900 (quota di circa 23 m, coincidente con l'altezza della torre sud);

- in direzione sud-nord, nei prospetti est e ovest, in modo tale da seguire il verso della pendenza (nord, appunto) con una distribuzione che suggerisce un assetto dovuto a fenomeni di torsione.

Allo stesso modo, ma in verso opposto, per la torre sud (*Figura 8, destra*), si osservano discostamenti dal piano di riferimento:

- dall'alto verso il basso, nei prospetti nord e sud interessati dalla maggiore inclinazione;

- in direzione nord-sud, nei prospetti est e ovest, in modo tale da seguire il verso della pendenza (sud, appunto) con una distribuzione che suggerisce un assetto dovuto a fenomeni di torsione.

Questo rivela che i prospetti sono arcuati e segmentati e comunque molto alterati rispetto ad una condizione ideale.

Le osservazioni fornite, se inserite in un quadro di studio generale che comprende analisi che confermano uno stato di "affaticamento" di parte della muratura dovuta all'effetto del peso stesso della torre, possono risultare di estremo interesse e dovrebbero essere prese in considerazione per valutazioni in merito alla stabilità della struttura (Pesci et al., 2011).

Conclusioni

Il modello tridimensionale anche nella fase più grezza, ovvero quando è ancora costituita da punti rilevati, può essere una valida fonte di informazioni da cui estrarre indicazioni circa i comportamenti dei singoli elementi costitutivi al fine di evidenziare se vi sono spostamenti differenziali, deformazioni pregresse ed ipotizzare la presenza di eventuali carichi aggiuntivi che incrementano le sollecitazioni imposte. Questi risultati diventano fondamentali per valutare interventi di consolidamento e messa in sicurezza della struttura. Ciò conferma la grande utilità del laser scanner come strumento di diagnostica ai fini di un'analisi strutturale.

Ringraziamenti

Le operazioni di rilievo sono state sviluppate nell'ambito del progetto "Rischio Sismico negli Edifici Monumentali (RISEM)" finanziato dalla Regione Toscana e coordinato dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze (coordinatore, prof. Gianni Bartoli).

L'autrice ringrazia il prof. Carlo Atzeni per la disponibilità e il prezioso sostegno nella stesura della tesi, e la prof.ssa Grazia Tucci per il supporto tecnico e logistico.

Bibliografia

Archivio Storico Alinari, Edizioni Brogi, Id Number BGA-F-013553-0000

De Fleury R. (1874), *La Toscane au moyen âge, lettres sur l'architecture civile et militaire en 1400*, A. Morel, Paris, France

Doglion F., Mazzotti P. (2007), *Codice di pratica per gli interventi di miglioramento sismico nel restauro del patrimonio architettonico*, Edizione Regione Marche, Ancona, ISBN 88-9026-690-2

Nobile A. (2013), *I Sistemi a scansione 3D per la documentazione metrica e lo studio diagnostico dei Beni Culturali. Dalla scala edilizia alla scala urbana: i casi studio della Basilica dell'Umiltà di Pistoia e delle Torri di San Gimignano*, Tesi di Dottorato, Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Elettronici, Curriculum in Tecnologie per i Beni Culturali (XXV ciclo), Università degli Studi di Firenze

Pesci A., Bonali E., Casula G., Boschi E. (2011), "Le informazioni estraibili dal dato laser scanner per lo studio di edifici storici", *Archeomatica*, A&C2000 srl, Roma, n. 3/2011, ISSN 2037-2485, pp. 12-16