

LE INFORMAZIONI ESTRAIBILI DAL DATO LASER SCANNER PER LO STUDIO DI EDIFICI STORICI

DEFORMAZIONI E STUDIO STRATIGRAFICO

di Arianna Pesci, Elena Bonali, Giuseppe Casula, Enzo Boschi

La disciplina del restauro costituisce un ponte di collegamento fra le materie di carattere umanistico e quelle di carattere tecnico che si integrano le une alle altre nell'obiettivo comune di perpetuare i valori storici e architettonici di cui il monumento è depositario. Uno studio completo non può che essere effettuato mediante l'applicazione e l'integrazione di una vasta gamma di tecniche di rilievo, distruttive e non, mirate all'analisi delle strutture, allo studio dei terreni di fondazione e del suolo, senza tralasciare la valutazione degli effetti ambientali. Coniugando la tecnica avanzata del rilievo eseguito con il laser scanner con le indagini tematiche che si sviluppano attraverso la lettura stratigrafica verticale si conseguono risultati importanti per comprendere la complessità storico-costruttiva del monumento e quindi utili per il progetto di conservazione.

Il laser scanning è una nota tecnica di rilievo che permette di acquisire una densa informazione geometrica e radiometrica sulle superfici scansate. Gli strumenti laser a scansione terrestre caratterizzati da una lunga portata, generalmente superiore ad 1 km, sono spesso utilizzati nei rilievi ambientali per il monitoraggio di cave, frane, aree vulcaniche, ecc., ma risultano eccellenti anche nelle applicazioni urbanistiche ed architettoniche. In particolare, proprio le peculiarità legate alla lunghezza d'onda ed alla potenza degli impulsi emessi, che influiscono in maniera determinante sulle distanze raggiungibili dal segnale, nonché il rapporto tra il passo di campionamento e la divergenza del fascio laser, che sono congiuntamente responsabili della risoluzione effettiva di un rilievo (Pesci et al., 2011a), rendono anche i *very long range* laser scanner estremamente adatti a fornire, in modo non invasivo, il quadro deformativo delle strutture analizzate oltre ad informazioni utili alla lettura strutturale, fondamentali per comprendere la complessità storico-costruttiva del monumento e quindi utili per il progetto di conservazione.

Le esperienze di rilievo architettonico maturate dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia sul territorio bolognese sono state condotte utilizzando lo scanner ILRIS ER (Optech) ed hanno riguardato una notevole varietà di edifici storici medievali, primi tra tutti le Due Torri, simbolo indiscusso della città e Palazzo d'Accursio, sede storica del Comune.

RILIEVO LASER SCANNER DELLE DUE TORRI

La torre degli Asinelli, costruita nel XII sec. è la torre più alta di Bologna (97 m), è famosa per la sua snellezza (l'altezza è undici volte la base) e per la notevole pendenza, corrispondente ad un fuori piombo pari a 2,5 m verso ovest e 0,25 m verso nord. La coeva torre Garisenda, che negli

anni successivi alla sua costruzione è stata abbassata poiché la forte pendenza ne metteva a rischio la stabilità, mostra un fuori piombo superiore a 3 m verso est, per una altezza complessiva di circa 48 m. Il rilievo delle torri è stato effettuato nel settembre 2010, scegliendo di lavorare nelle ore notturne per evitare il disturbo indotto dal passaggio frenetico dei pedoni e dei mezzi di trasporto, ed è stato acquisito un totale di 19 scansioni da sei punti di vista differenti, nell'immediato intorno delle torri (10-20 m). La problematica di realizzare un rilievo veloce e totalmente indipendente dall'appoggio di terzi, per esempio privati che permettano l'accesso ai balconi, tetti o terrazzi dei palazzi attigui alle torri, ha implicato di effettuare anche misure con un basso angolo di incidenza laser-superficie. Per questo motivo, oltre all'utilizzo delle tecniche ICP per l'allineamento delle nuvole di punti (*Polyworks, Innovmetrics*), basate sulla minimizzazione della distanza tra i punti e le normali delle aree di superficie in sovrapposizione, si è ritenuto opportuno procedere alla validazione del modello finale mediante specifici test, ottenendo risultati assai incoraggianti. Un errore massimo di circa 5 mm è stato ottenuto con una sovrapposizione di appena il 10% tra le scansioni e utilizzando, per la statistica, solo le porzioni del prospetto ad altezze superiori a 80 m; è importante considerare che il tasso di sovrapposizione utilizzato dagli autori è sempre stato superiore al 30%. I dettagli del test sono ampiamente descritti in (Pesci et al., 2011b) e riassunti qui in figura 1. La fase più importante nell'elaborazione di dati TLS è senza dubbio la fase di allineamento: non è in alcun modo possibile realizzare realistici studi di precisione qualora si parta da un modello affetto già in partenza da distorsioni indotte da una possibile errata unione delle scansioni (vedi, per esempio: Boni et al., 2010), motivo per il quale l'organizzazione di test e validazioni sperimentali sono sempre necessari.

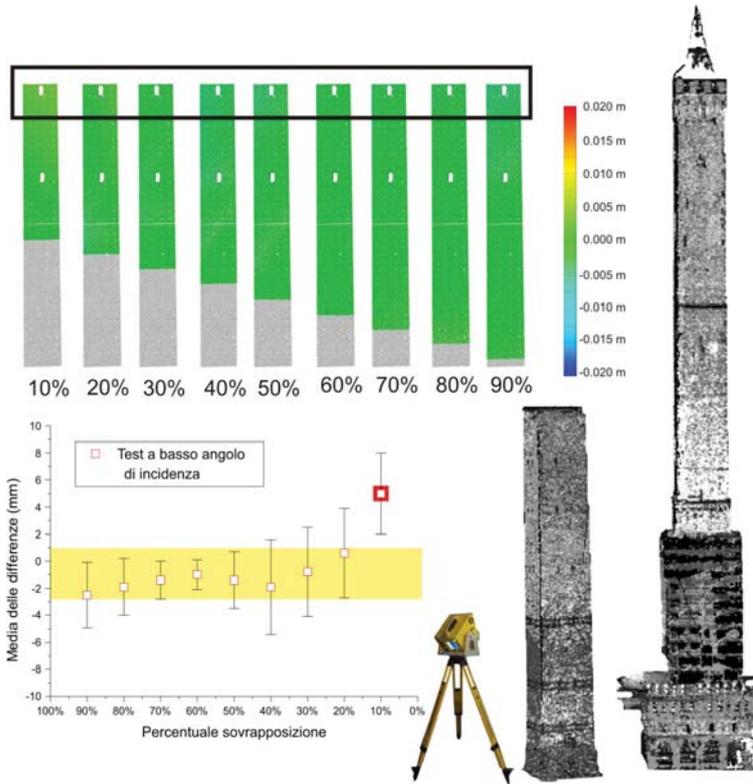


Figura 1 - Il test di valutazione della bontà di allineamento; le mappe delle differenze tra i punti delle due scansioni con l'aumento delle aree di sovrapposizione; il grafico mostra la statistica dei risultati come valore medio e deviazione standard delle differenze, calcolate solo nelle porzioni alte dei prospetti (> 80 m): tale scelta nasce dalla necessità di ottenere una statistica realistica. Inoltre, si può osservare la nuvola di punti totale.

IL DATO LASER SCANNER PER LA STIMA DELLE DEFORMAZIONI

Le caratteristiche dei prospetti delle Torri sono state osservate utilizzando una strategia basata sul confronto tra il prospetto ed un piano di riferimento mediante il calcolo delle distanze punto-piano. L'indagine è stata effettuata a piccola scala, calcolando le deviazioni dei punti rispetto al piano verticale, ed a grande scala utilizzando come piano di riferimento il piano interpolatore di tutti i punti delle

facciate in esame che, per sua stessa definizione, è il piano che rappresenta idealmente il prospetto se questo non fosse caratterizzato da deformazioni o distorsioni. Non disponendo, come spesso accade, 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 rispetto alla regolarità, sono state intese come deformazioni, o meglio, come deformazioni complessive dalla creazione del monumento ad oggi (Dogliani e Mazzotti, 2007).

I risultati sono illustrati nelle figure 2 e 3, e riportano le variazioni effettive rilevate sui 4 prospetti di entrambe le torri. È da sottolineare che la presenza di una alta impalcatura sulla Torre degli Asinelli ha impedito a tutt'oggi di completarne il rilievo nascondendone circa 1/3.

L'analisi dei prospetti della torre Garisenda ha reso possibile l'individuazione di bombature e rigonfiamenti presenti sia alla base della stessa, nella parte in cui la parete in mattoni si congiunge al basamento in blocchi di selenite, che nelle zone soprastanti, in particolare oltre la terza cinghia metallica (installata nel 2000, (Andreoni et al., 2011)) e nella parte ancora più elevata a circa 35 m (e oltre) di altezza. In maniera analoga si osservano zone in leggera compressione, cioè in cui sono misurate deviazioni negative. Le anomalie osservate sono distribuite nelle zone di massima variazione di pendenza della torre, nelle zone in cui si è intervenuto ad applicare le cinghie metalliche e comunque nelle zone in cui si ritiene sia massimo il carico della struttura. È interessante osservare in definitiva che procedendo verso l'alto si osservano dei cambiamenti di regime sulle pareti della torre, con alternanza di zone di compressione e trazione; inoltre, la maggior parte delle deviazioni osservate sono correlabili con effetti di presso flessione della torre, che si deforma sotto l'effetto del proprio peso (anche considerando la forte inclinazione).

L'analisi della torre degli Asinelli, nelle parti osservate comprese tra i 35 m di altezza e la sommità, mostra che su tutti i prospetti sono presenti anomalie che indicano un assetto deformato con una alternanza di valori negativo-positivo-negativo. Questo rivela che i prospetti sono arcuati e segmentati e comunque molto alterati rispetto ad una condi-

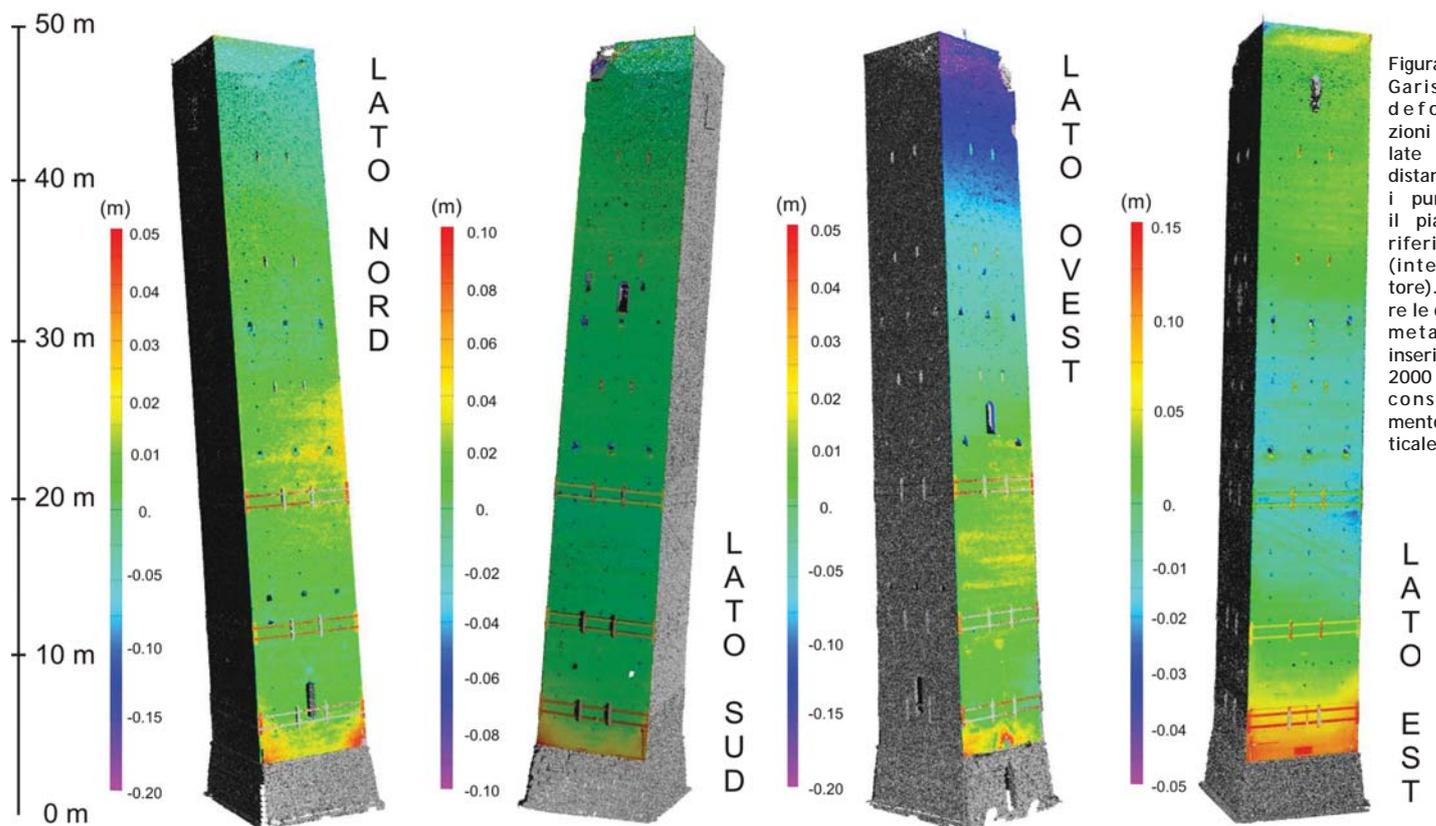


Figura 2 - Garisenda: deformazioni calcolate come distanza tra i punti ed il piano di riferimento (interpolatore). Nota le cinghie metalliche inserite nel 2000 per il consolidamento verticale.

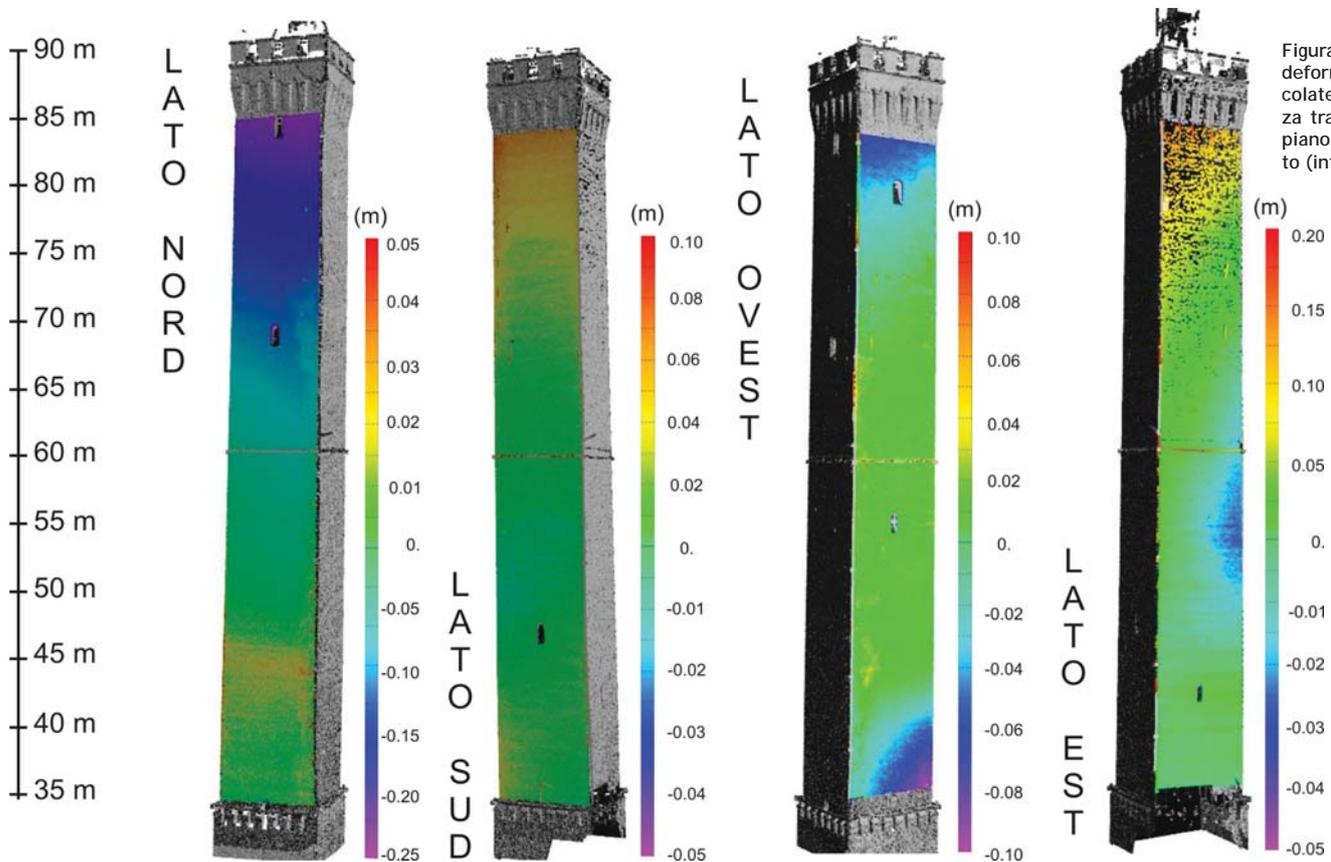


Figura 3 - Asinelli: deformazioni calcolate come distanza tra i punti ed il piano di riferimento (interpolatore).

zione ideale. Si nota anche (lati ovest e est) una distribuzione che suggerisce un assetto dovuto a fenomeni di torsione. Effetti di questo tipo sono stati studiati nel passato e riportiamo uno stralcio di scritto del sismologo Salvanini (1953): 'Quando la sommità della torre è in movimento rotatorio, al sopraggiungere di una raffica di vento, la forza orizzontale della raffica si combina con quella rotatoria della torre generando la torsione'.

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. In particolare si fa riferimento al lavoro scientifico *Seismic analysis of the Asinelli Tower and earthquakes in Bologna* (di Paolo Riva, Federico Perotti, Emanuela Guidoboni ed Enzo Boschi) ed agli studi riportati nel libro "I terremoti a Bologna e nel suo territorio dal XII al XX secolo" di Emanuela Guidoboni ed Enzo Boschi.

NOTA

Lo studio delle Due Torri è sempre stato al centro di accesi dibattiti nella comunità Bolognese, per il grande interesse suscitato da queste antiche signore medievali. In particolare è d'obbligo ricordare i Prof. Cavani e Salvanini che dedicarono molto lavoro e fatica nello studio dell'assetto e delle pendenze, delle fondazioni e dello stato del terreno. Nel 1918, in seguito a precise misurazioni operate a mezzo di filo a piombo, Cavani scrisse: "...delle cause delle pendenze, che non sono da ricercarsi nei capricci dei costruttori, come vogliono alcuni i quali dichiarano che le torri furono innalzate pendenti a bella posta, ma bensì nei cedimenti del terreno sottostante ed in altre cause naturali". È senz'altro da sottolineare che lo studio descritto da Pesci et al. (2011c) mostra un ottimo accordo sulle misure delle pendenze e inclinazioni con quanto riportato da Cavani. Tuttavia, a ragion del vero, è bene tenere presente che il confronto diretto tra grandezze ricavate con tecniche molto differenti, mi-

surate in condizioni altrettanto differenti, va sempre preso con cautela per non incorrere in errori di valutazione (Capra et al., 2011).

CASO DI STUDIO STRATIGRAFICO: PALAZZO D'ACCURSIO

Il prospetto di Palazzo d'Accursio che si affaccia su via IV Novembre permette di leggere la propria configurazione originale grazie alla presenza di segni architettonici non cancellati dai numerosi interventi nell'arco dei secoli a differenza degli altri prospetti (vedi quanto riportato in Galli et al.).

Per questo motivo tale facciata è stata rilevata nell'ambito di un esperimento mirato a capire quanta informazione si può trarre dallo studio non invasivo del prospetto per scopi di ricerca e di analisi stratigrafica verticale dell'edificio.

Il palazzo è composto da una complessa serie di edifici che sono stati uniti e rimaneggiati nel corso dei secoli; le informazioni storiche (riportate in Galli, 2010) ne descrivono il nucleo originale al 1287 come composto da una casa torre (del giurista Accursio) e da unità appartenenti alla parrocchia di Santa Tecla; nei secoli sono stati effettuati numerosi restauri e interventi sulla planimetria che hanno portato alla modifica del prospetto fino ad ottenere la configurazione attuale.

Il metodo dell'estrazione delle variazioni rispetto ad un piano di riferimento è stato applicato per osservare le aree della facciata attuale interessate da lavori di restauro.

Una prima analisi delle deviazioni ottenute dalle differenze tra i punti ed il piano interpolatore dell'intera facciata (figura 4) mette in evidenza le zone che maggiormente si discostano dalla regolarità. La stessa procedura, applicata a sotto piani nelle zone di interesse permette di fare uno zoom e ottenere una informazione più precisa e mirata.

La mappa rappresentata nella figura 5, è l'esempio più calzante dell'utilità del metodo in quanto permette di individuare senza ambiguità la relazione stratigrafica relativa tra due elementi della parete: un rosone e la parte rimasta della cornice di una finestra ogivale.

Le differenze positive indicate con la colorazione giallo e rossa, mostrano una forma pressoché rettangolare a suggerire una vecchia apertura, riempita prima dell'installazione del rosone.

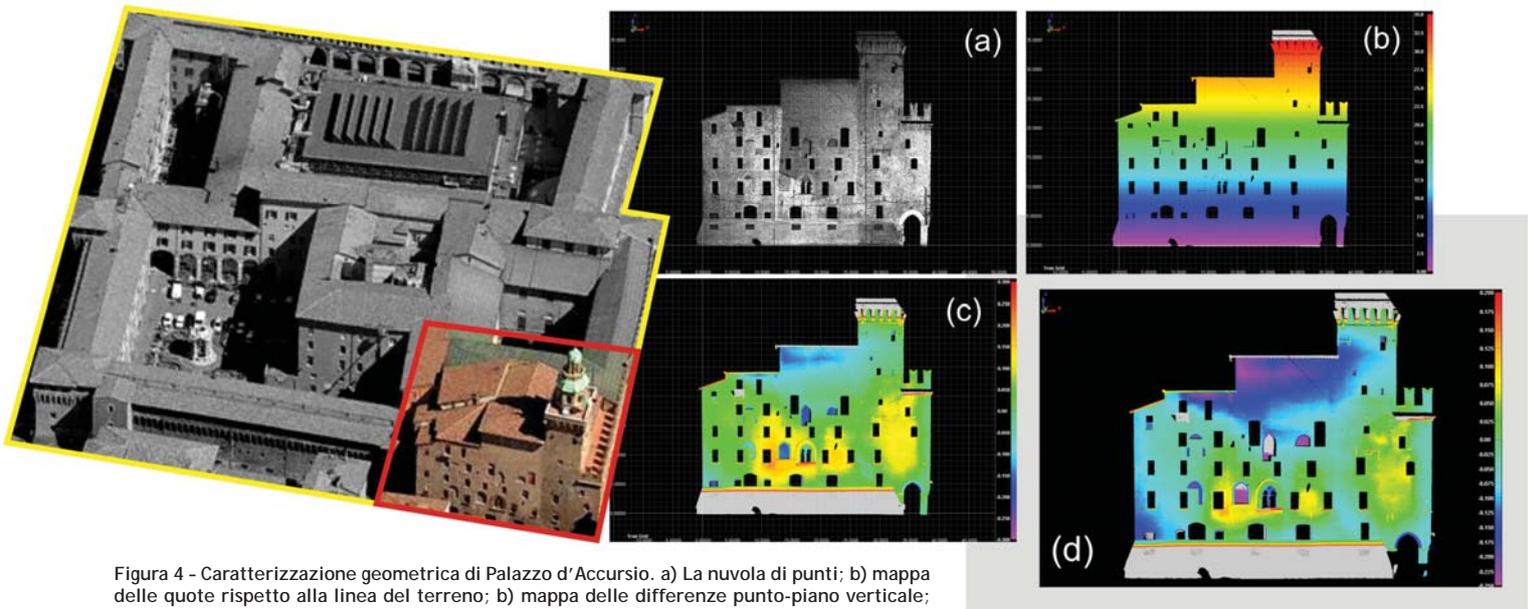


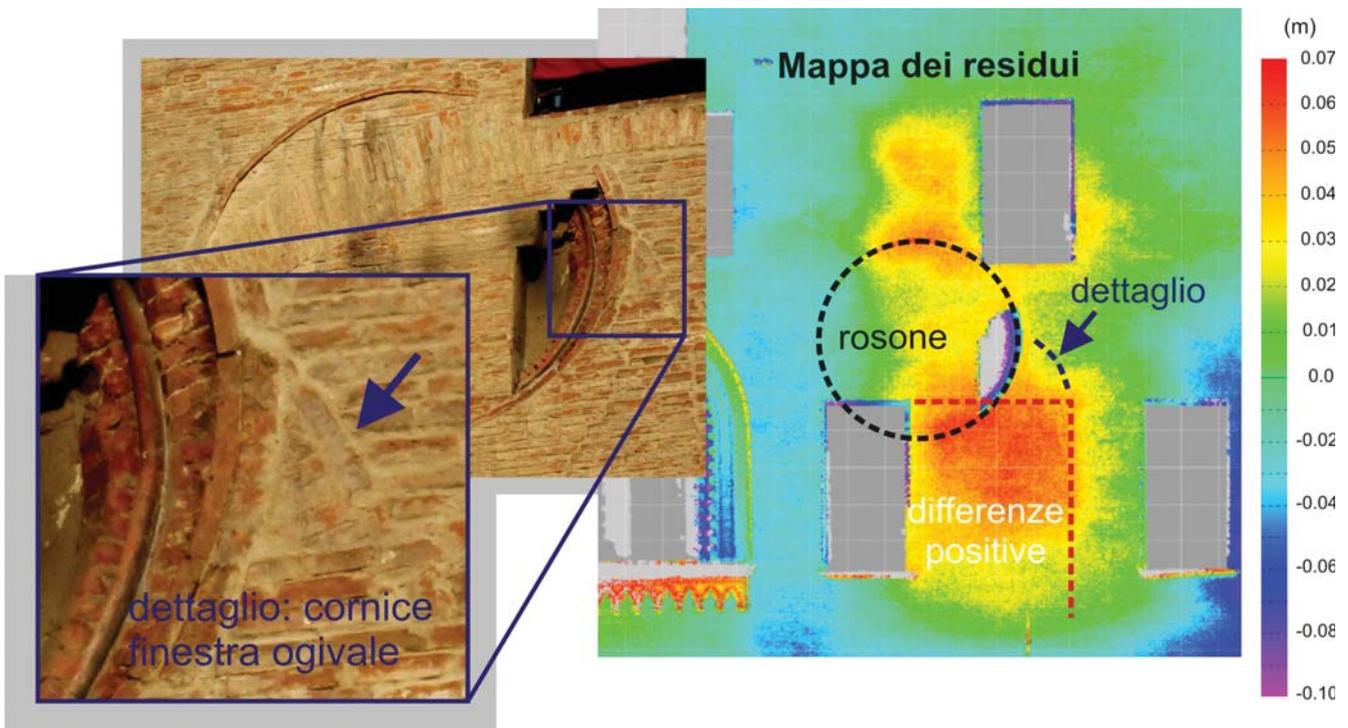
Figura 4 - Caratterizzazione geometrica di Palazzo d'Accursio. a) La nuvola di punti; b) mappa delle quote rispetto alla linea del terreno; b) mappa delle differenze punto-piano verticale; c) mappa delle differenze punto-piano interpolatore.

La chiarezza che viene a profilarsi tra i due elementi, il primo individuato come elemento originario del prospetto, costituito da sei finestre ogivali, e il secondo, evidentemente sovrapposto al primo, e quindi posteriore, permette di affermare che il rosone non appartiene alla chiesa di Santa Tecla, la quale venne demolita nel 1222. Da questo dato è stato possibile affermare con certezza che il rosone ancora visibile sulla facciata non appartiene alle antiche unità di Santa Tecla bensì fu installato successivamente. I risultati complessivi dello studio sulla parte di Palazzo d'Accursio osservata sono in pubblicazione sulla rivista Journal of Cultural Heritage (Pesci et al, 2011d).

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l'ing. Claudio Galli per le ricche informazioni fornite ed il contributo dato. Inoltre si ringrazia Codevintec Italiana per la concessione delle attrezzature e degli accessori utilizzati durante il rilievo.

Figura 5 - Mappa delle differenze in una sottoarea di interesse per la comprensione della stratigrafia relativa tra gli elementi architettonici: rosone e finestra.



BIBLIOGRAFIA

- Andreone F., Dallavalle G., Gasparini G., Trombetti T. (2011), *Le Torri Asinelli e Garisenda: le indagini e gli interventi di consolidamento*, INARCOS Maggio 2011 (4), 719, 7-30.
- Boni E., Capra A., Bertacchini E., Castagnetti C. (2010), *Laser scanner survey for 3D geometrical analysis of vertical extension structure applied to Asinelli Tower (Bologna-Italy), Ghirlandina Tower and Sagra Tower (Modena-Italy)*, Proceedings of XXIV FIG International Congress 2010 (ISBN 978-87-90907-87-7).
- 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 Maggio 2011 (4), 719, 35-42
- Dogliani F., Mazzotti P. (2007), *Codice di pratica per gli interventi di miglioramento sismico nel restauro del patrimonio architettonico*, Ed. Regione Marche. 2007. pp. 356. ISBN: 8890266902.
- Galli C., (2010). *Il rilievo critico quale contributo alla conoscenza delle fasi storico-costruttive di palazzo d'Accursio di Bologna*. INARCOS 711 (2010) 455-461.
- Pesci A., Teza G., Bonali E. (2011a), *Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization*, Remote Sensing 3, 167-184.
- Pesci A., Casula G., Bonali E., Boschi E. (2011b), *Un metodo per lo studio di edifici storici mediante misure laser a scansione terrestre: le Due Torri di Bologna*, Rapporto Tecnico INGV 178.
- Pesci A., Casula G., Boschi E. (2011c), *Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings*, Journal of Cultural Heritage 12 (2) 117-127.
- Pesci A., Bonali E., Galli C., Boschi E. (2011d), *Laser scanning and digital imaging for the investigation of an ancient building: Palazzo d'Accursio study case (Bologna, Italy)*, Journal of Cultural Heritage. doi:10.1016/j.culher.2011.09.004

ABSTRACT

The Two Towers and Accursio Palace - Restoration is an interdisciplinary connecting both historical-humanistic and scientific ambits that work in synergy and complete each other by having the same purpose: to perpetuate the historical and architectonic substance of which a monument is depositary. With the aim of working consciously both about the knowledge of the manufacture and to plan the conservation and a new use of monuments, inter-disciplinarity is a fundamental premise.

Through the conjugation of laser scanner survey together with thematic investigation that develop by means of a vertical stratigraphic reading (analysis and comprehension) it is possible to understand the historical-constructive complexity of monuments. The Two Towers and Accursio Palace (Bologna, Italy) study cases are here presented.

PAROLE CHIAVE

Laser scanner, edifici storici, analisi stratigrafica, INGV.

AUTORI

ARIANNA PESCI
ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA, SEZIONE DI BOLOGNA
VIA CRETI 12, 40128 BOLOGNA
TEL. 051 4151416
EMAIL: PESCI@BO.INGV.IT

GIUSEPPE CASULA
ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA, SEZIONE DI BOLOGNA

ELENA BONALI
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA, DAPT

ENZO BOSCHI
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA, DIPARTIMENTO DI FISICA

ARCHEOMATICA

TECNOLOGIE PER I BENI CULTURALI

www.archeomatica.it



ABBONATI AD
ARCHEOMATICA:
IL PONTE TRA
PASSATO E FUTURO