

Rapporti tecnici

INGV

**Un metodo per lo studio di edifici storici
mediante misure laser a scansione
terrestre: le Due Torri di Bologna**

178



Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

UN METODO PER LO STUDIO DI EDIFICI STORICI MEDIANTE MISURE LASER A SCANSIONE TERRESTRE: LE DUE TORRI DI BOLOGNA

Arianna Pesci¹, Giuseppe Casula¹, Elena Bonali² e Enzo Boschi^{3,4}

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

²UNIVERSITÀ DI BOLOGNA (Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale)

³INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia)

⁴UNIVERSITÀ DI BOLOGNA (Dipartimento di Fisica, Settore Geofisica)

178

Indice

Premessa	5
Introduzione	7
1. Descrizione del rilievo.....	9
2. Verifiche sulle procedure di allineamento	13
3. Le analisi della morfologia delle Due Torri.....	16
3.1. Torre Garisenda	17
3.2. Torre degli Asinelli.....	18
4. Discussione e conclusioni	20
4.1. Nota sul metodo di misura	21
Bibliografia.....	23

Premessa

La presente relazione descrive i lavori effettuati a Bologna nel Settembre 2010 con lo scopo di contribuire allo studio sullo stato di salute delle Due Torri, verificandone le condizioni, mediante l'utilizzo del sistema laser a scansione terrestre Optech ILRIS 3D in dotazione all'INGV.

Tale sistema di misura non invasivo ha permesso di osservare nel dettaglio la conformazione delle pareti esterne delle torri e di rilevare un'alta quantità di anomalie, quali "storture", rigonfiamenti, repentini cambi di pendenza e altro.

Parte del contenuto illustrato in questo rapporto tecnico è stata presentata in data 3/10/2010 al Comune di Bologna per rendere tempestivamente noti i risultati e fornire delle precise indicazioni di appoggio per eventuali interventi di restauro. Il primo lavoro scientifico completo è stato accettato per la pubblicazione ed è in fase di stampa sulla rivista dei beni culturali "Journal of Cultural Heritage" [Pesci e al., 2011].

Il presente rapporto tecnico è stato scritto volutamente in maniera semplice e a carattere divulgativo nonostante contenga anche parti tecniche molto specifiche. Questa scelta nasce dalla volontà di fornire un rapporto ufficiale ma di facile lettura e comprensione, usufruibile dagli addetti ai lavori ma anche da parte dei cittadini interessati a conoscere lo stato dei lavori ed i primi risultati.

Un'ultima nota per sottolineare che alcuni dei contenuti bibliografici fanno riferimento ai rapporti tecnici prodotti dai ricercatori INGV e sono facilmente scaricabili (gratuitamente) dal sito www.ingv.it.

Introduzione

Bologna è una città d'arte il cui tessuto medievale e quello urbanistico sono perfettamente integrati all'interno della cerchia delle antiche mura. Le Due Torri sono state costruite nel XII secolo e rappresentano indiscutibilmente uno dei maggiori simboli della città. Attualmente, la Torre degli Asinelli e la Torre Garisenda sono al centro di un acceso dibattito il cui punto principale è lo stato di salute di questi antichi monumenti e gli effetti di dissesto eventualmente indotti dalle sollecitazioni e vibrazioni causate dal traffico intenso. Ad oggi infatti, il passaggio di autobus e mezzi pesanti sotto le Due Torri avviene ad alta frequenza per tutta la giornata. I mezzi passano a pochi metri dalle Torri e la presenza delle fermate e dei semafori rende il loro moto discontinuo con una alternanza di accelerazioni e rallentamenti che forzatamente amplificano l'effetto della sola vibrazione dovuta ad un passaggio a velocità regolare.

Uno studio completo dell'attuale stato di salute delle Due Torri non può che essere effettuato mediante una diagnostica basata sull'applicazione e l'integrazione di una vasta gamma di tecniche di rilievo, distruttive (o invasive) e non, mirate all'analisi delle strutture [vedi per esempio: Hutchinson e. Chen, 2006; Clark et al., 2003; Peeters e Roeck, 2001; Rens e Greimann, 1997; Park et al., 2007], allo studio dei terreni di fondazione e del suolo, senza tralasciare la valutazione degli effetti ambientali agenti sull'intera area urbana.

In particolare, la regione Emilia Romagna e, in particolare, la città di Bologna sono afflitte da un fenomeno ormai noto quale la subsidenza, ovvero da un processo di abbassamento del terreno di natura principalmente antropica [Marchetti, 2002], dovuta all'estrazione di acque sotterranee ed idrocarburi, e in parte geodinamica e tettonica, per compattazione naturale dei sedimenti [Carminati e Martinelli, 2002].

Il fenomeno è stato osservato fin dagli anni '70 mediante tecniche geodetiche ad alta precisione quali la livellazione geometrica; nel tempo il monitoraggio si è via via infittito utilizzando anche misure GPS ed applicando nuovi sistemi di osservazione basati sullo studio delle immagini satellitari mediante interferometria SAR (InSAR).

Nel 2004, nell'ambito di un progetto ESA, l'INGV ha elaborato la serie temporale delle immagini satellitari relative al periodo 1992-2000 ottenendo un risultato denso ed affidabile sull'intera città di Bologna e fornendo le velocità annuali di abbassamento del suolo [Stramondo et al., 2007]. In figura 1 è riportata la mappa di una zona del centro città. Il dato di subsidenza relativo al 1992-2000 è stato confrontato con i risultati delle campagne di livellazione effettuate dal 1980 al 2000 mostrando una buona correlazione; è quindi ragionevole pensare che tale fenomeno sia durato per almeno un ventennio, e oltre [Bitelli et al., 2000]. Considerando l'alto gradiente delle velocità di abbassamento e quindi le notevoli variazioni del tasso di subsidenza da area ad area, non è da trascurare l'effetto di dissesto probabilmente subito dagli edifici storici e non: basti pensare alle conseguenze di un movimento relativo su un complesso solidale di edifici. In figura 1 sono anche riportati i tassi di subsidenza estratti su via Zamboni e via San Vitale, dal centro alle porte. È semplice calcolare l'effetto risultante accumulatosi in un ventennio e capire come zone adiacenti abbiano subito differenze di abbassamento di alcune decine di centimetri.

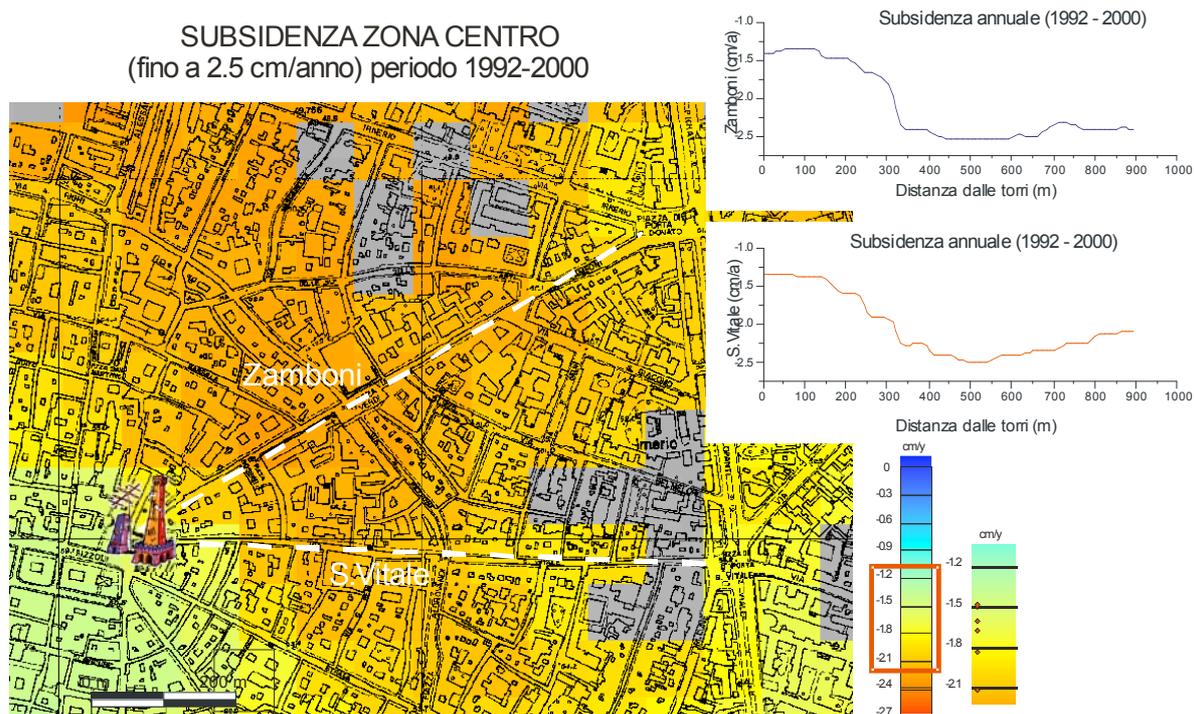


Figura 1. Mappa della subsidenza relativa al periodo 1992-2000 e valori estratti sulle vie storiche Zamboni e San Vitale. I profili delle velocità annuali mostrano l'eterogeneità del fenomeno.

Recenti studi e misure relative all'ultimo decennio [Baldi e al., 2009; Fava e al., 2010; www.arpa.emr.it] sembrano confermare una netta riduzione del fenomeno della subsidenza. La stazione GPS installata nel 2007 [Casula e al., 2009] sull'edificio che ospita la sede INGV di Bologna (via Donato Creti, 12), ha permesso di monitorare le variazioni della quota di stazione per oltre 2 anni, mostrando un chiaro tasso di costante abbassamento di circa 6 mm all'anno (in accordo con lavori pubblicati recentemente nelle riviste geofisiche) e delle lente e rilevanti oscillazioni stagionali (anche superiori al centimetro) connesse probabilmente alla falda acquifera (figura 2).

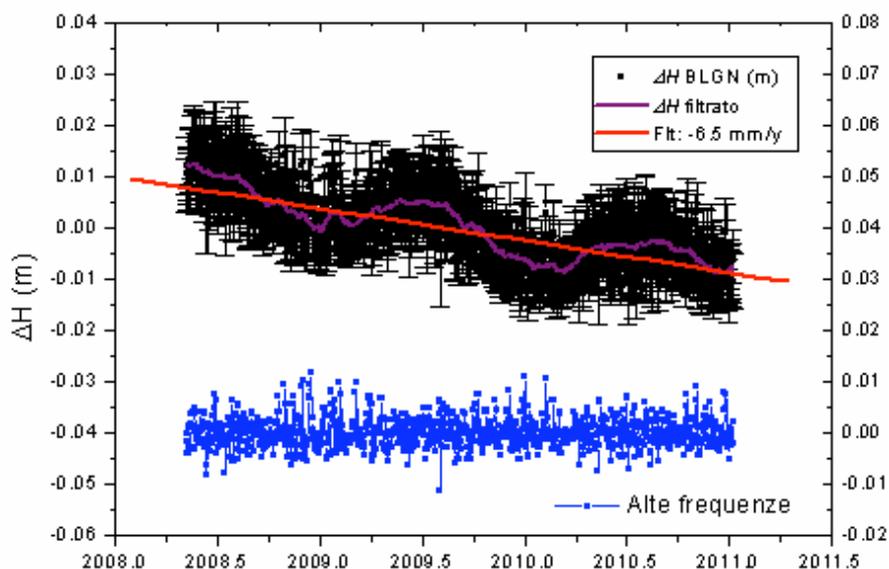


Figura 2. La stazione permanente BLGN. Serie temporale delle coordinate delle quote di stazione nel periodo 2008-2011. I dati ottenuti dall'analisi GPS corredati dell'errore sono in nero; in viola il segnale mediato, cioè filtrato e caratteristico dell'andamento della stazione; in rosso il trend lineare interpolato dai dati, che mostra un livello costante di abbassamento di circa 6 mm/y; in blu la componente del dato GPS ad alta frequenza che, seppur non completamente, rappresenta il rumore delle soluzioni giornaliere.

1. Descrizione del rilievo

Nel Settembre 2010 l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha eseguito una serie di rilievi mirati all'acquisizione delle Due Torri di Bologna, utilizzando lo scanner ILRIS3D [Optech, <http://www.optech.ca>].

Il laser scanner, o laser a scansione terrestre (TLS), è uno strumento di rilievo non distruttivo che permette di misurare una quantità smisurata di punti (milioni) distribuiti sulle superfici fisiche osservate. Per ogni punto si ottengono le coordinate geometriche cartesiane x , y e z ed un valore di intensità, generalmente fornito nell'intervallo $[0, 255]$, cioè nella scala di grigi. L'intensità è una variabile strettamente correlata alla rugosità dei materiali e alle condizioni di umidità al momento del rilievo e, in certi casi, fornisce indicazioni sullo stato di alterazione delle superfici [Pesci e al., 2007]. Il risultato di una singola scansione, cioè la nuvola di punti, è quindi composto dall'insieme delle coordinate e delle intensità (x , y , z , I) di tutti i punti misurati nello stesso sistema di riferimento.

La figura 3 mostra una scansione relativa ad una porzione della torre Garisenda di Bologna: si riconoscono facilmente dalla colorazione in toni di grigio i blocchi di selenite, i differenti tipi di laterizi, la cinghia metallica, applicata nel corso dei lavori di consolidamento (2000) e altri dettagli. L'ingrandimento di una parte della scansione è fornito per dare un'idea diretta sul tipo di risoluzione geometrica ottenuta.

Gli strumenti *long-range* [<http://www.gim-international.com>], la cui portata è sensibilmente superiore ai 100 m, hanno generalmente precisioni variabili tra alcuni millimetri ed un centimetro. Tuttavia, la risoluzione finale di un rilievo dipende sia dalla precisione sulla misura dei singoli punti sia dalla densità della nuvola di punti e varia a seconda delle caratteristiche strumentali. Infatti, la reale risoluzione, cioè la capacità di distinguere due elementi adiacenti di determinata grandezza lungo le linee di scansione, dipende dalla scelta combinata della divergenza del raggio laser e del passo di campionamento adottato.

La divergenza è legata alla dispersione del fascio di luce laser e si può immaginare come l'impronta illuminata dal raggio laser sulla superficie colpita; è una grandezza che aumenta con la distanza che dipende dallo strumento utilizzato e su cui non si può agire, se non cercando di ridurre la distanza di lavoro, mentre il passo di campionamento può essere facilmente gestito.

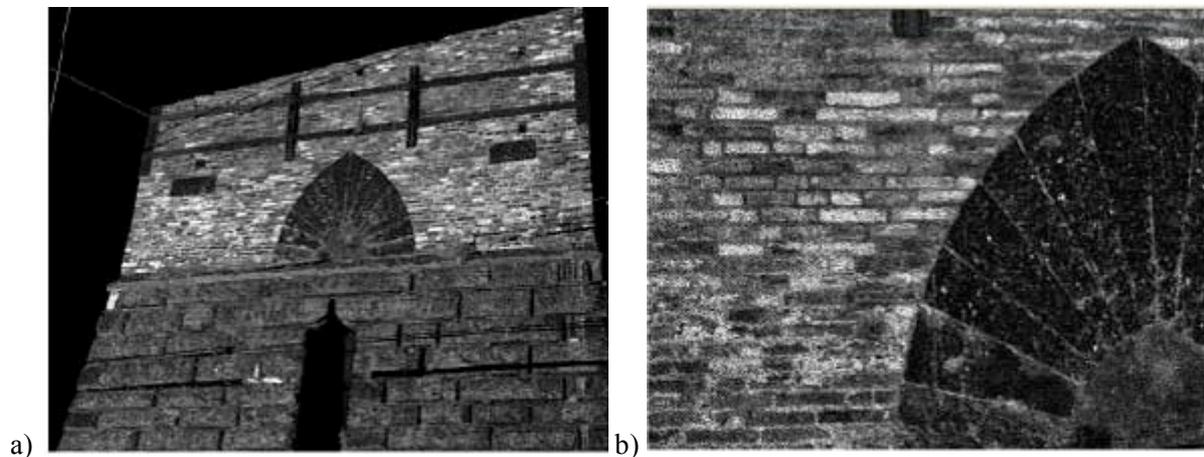


Figura 3. a) Una scansione della Garisenda che mostra la base della torre; b) un dettaglio in cui si riconoscono chiaramente i mattoni e l'arco di selenite sopra l'entrata.

La conoscenza della risoluzione ottenibile ad una determinata distanza e soprattutto, la conoscenza del massimo passo di campionamento accettabile al fine di ottenere il dettaglio richiesto nella nuvola di punti, permette sia di pianificare delle efficaci campagne di misura che di ridurre i tempi necessari al rilievo, con grande risparmio di tempo e lavoro.

A questo proposito, nel Giugno 2010 è stato realizzato un esperimento che ha permesso di mettere in relazione queste grandezze per una corretta pianificazione delle misure [Pesci e al., 2011]. Nella figura 4 è illustrato il risultato più rilevante, cioè la relazione lineare che rende possibile scegliere il passo di campionamento adatto per la risoluzione voluta e la distanza di lavoro. Maggiori dettagli sono descritti in Pesci et al. [2011] e nel n.173 de Rapporti Tecnici INGV.

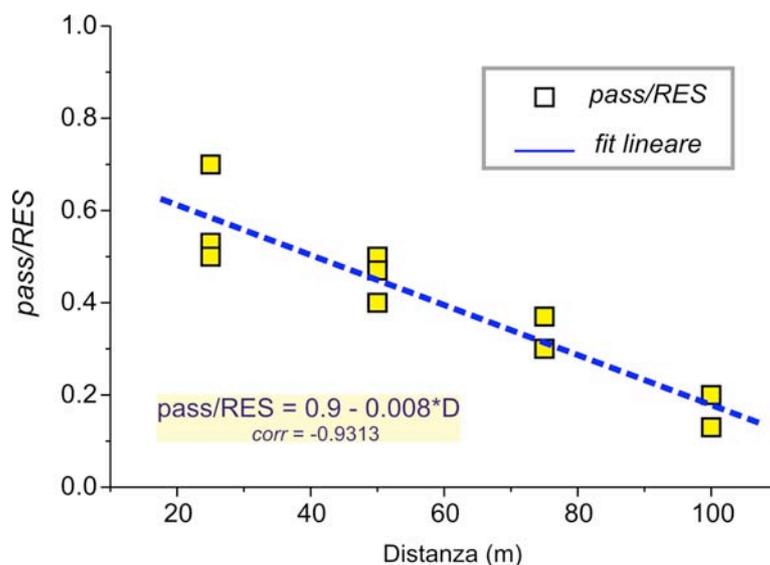


Figura 4. Relazione empirica tra il massimo campionamento utilizzabile (max ss) e la risoluzione cercata (RES) con la distanza (D).

Nel lavoro di seguito descritto si è scelto, per motivi logistici e tecnici, di utilizzare un passo di campionamento che consentisse di avere una densità di alcuni millimetri e mai inferiore al centimetro, nemmeno nei punti più alti delle torri.

Nel Settembre 2010 l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha eseguito il rilievo delle Due Torri utilizzando lo scanner ILRIS3D. Per ottenere la massima copertura sono state effettuate 19 scansioni da 6 punti di stazione distribuiti nelle vicinanze delle Torri a qualche decina di metri (figura 5).

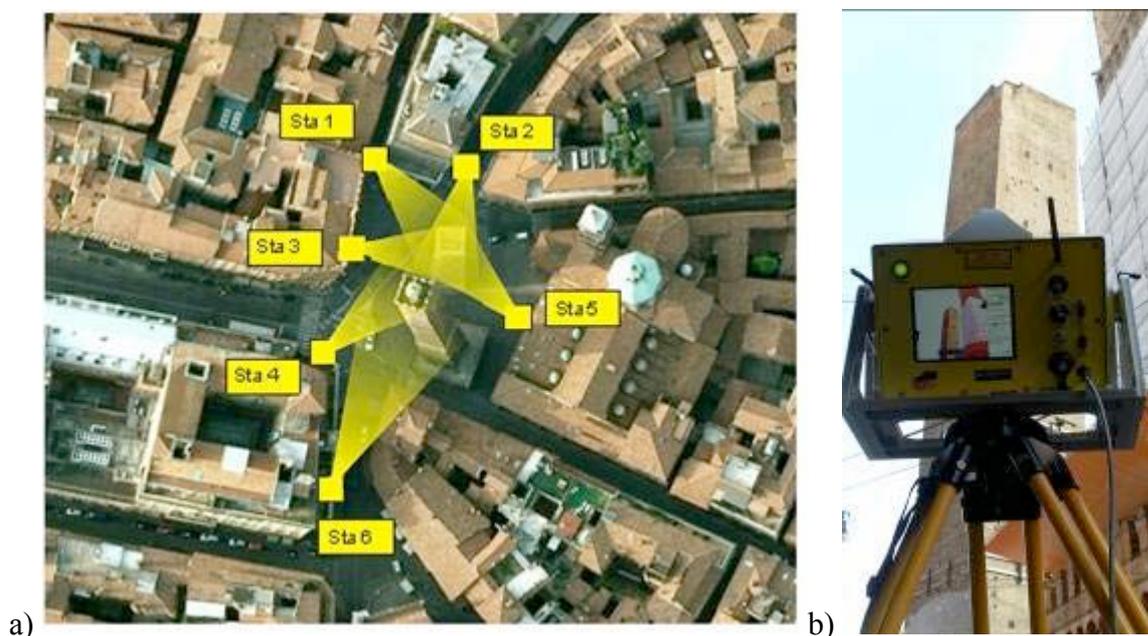


Figura 5. a) Vista aerea del centro e delle Due Torri. I sei punti di stazione dello scanner e le aree spazzate sono evidenziate in trasparenza di giallo; b) lo strumento in funzione su un supporto per una facile messa in bolla.

Tutte le nuvole di punti sono mostrate nella figura 6. È importante notare che la Torre degli Asinelli, dalla forma più snella e alta, è in buona parte (circa per un terzo) coperta da un'alta impalcatura. È importante anche notare le 3 cinghie metalliche che cingono la torre Garisenda e che sono state installate nel 2000 per consolidarla in elevazione. Queste cinghie, ben visibili nelle nuvole di punti, sono un riferimento prezioso e verranno citate in seguito.

Le scansioni sono state unite ed allineate per ricostruire tutta la scena utilizzando speciali algoritmi [Bergevin e al., 1996; Bae e Lichti, 1999] che garantiscono di non introdurre errori e distorsioni nel risultato finale. Un cattivo allineamento, infatti, potrebbe compromettere le analisi successive poiché porterebbe alla creazione di un modello completo affetto da errore e quindi non credibile e non corrispondente alla realtà. Nella figura 6 sono mostrate tutte le nuvole di punti ottenute dalle 19 scansioni.

La scansione di riferimento utilizzata per ottenere la corretta verticalità dei modelli risultanti dall'unione delle nuvole di punti è la stessa mostrata in figura 3 (e mostrata anche in figura 6) ed è stata acquisita mantenendo il laser scanner in bolla, mediante il supporto di una solida base di alluminio, predisposta per facilitare le misure (vd. Figura 5b). Le coordinate della scansione di riferimento sono state quindi bloccate sui loro valori, quindi utilizzate come vincoli, per allineare successivamente le altre scansioni e provvedere all'orientamento complessivo delle Torri.

La procedura di allineamento seguita al fine di unire tutte le scansioni e costruire quindi un modello completo della torre, è basata su un primo allineamento "grezzo" ottenuto mediante il riconoscimento di punti omologhi, ovvero particolari riconoscibili su due distinte nuvole di punti (figura 7). Scelti almeno 3 punti ben distribuiti, si procede roto-traslando la scansione da allineare sulla scansione di riferimento. Una volta avvicinate le due nuvole di punti occorre procedere all'allineamento "raffinato" per garantire una unione priva di sistematismi, cioè per ottenere un modello privo di distorsioni indotte da una gestione poco precisa dei dati.

A questo scopo sono stati utilizzati degli algoritmi di allineamento atti a minimizzare la distanza tra i punti delle due scansioni nelle zone comuni mediante una procedura iterativa con l'impiego di algoritmi ICP (Iterative Closet Points; Innovmetric, 2010) e si è raggiunta la precisione di allineamento di 1 mm (o inferiore). In figura 8 è mostrato il risultato dell'allineamento "grezzo" e dell'allineamento "raffinato". Nel secondo caso è facile capire che le scansioni sono accuratamente sovrapposte l'una sull'altra e le differenze nelle parti comuni tendono a scomparire quasi del tutto.

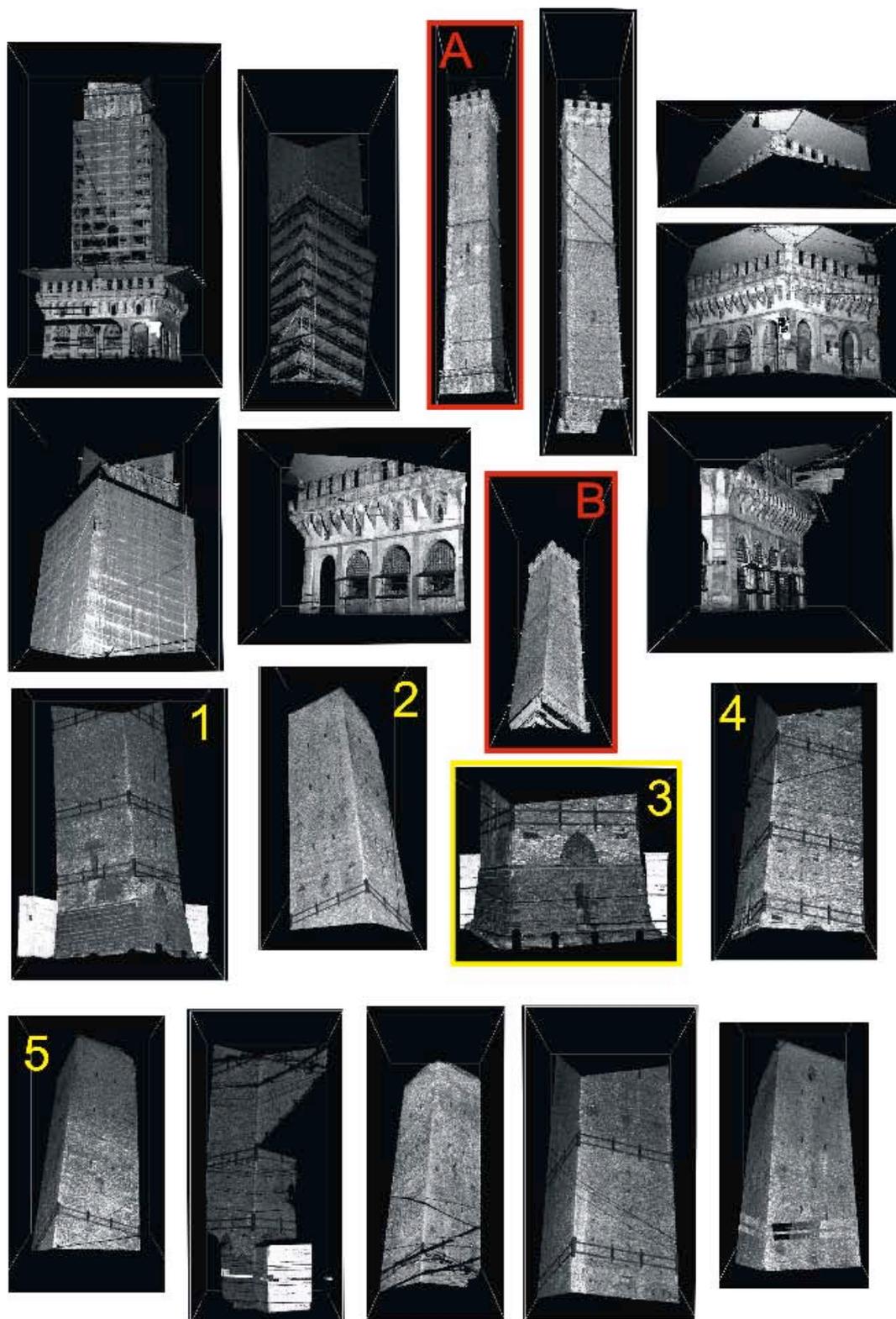


Figura 6. Le 19 nuvole di punti delle Due Torri. Le due scansioni nei riquadri rossi (A e B) saranno considerate in seguito nella descrizione di un test di allineamento di immagini (figura 9). Nel riquadro giallo una scansione di riferimento acquisita in bolla per dare la verticalità. I numeri mostrano le scansioni descritte in figura 10.

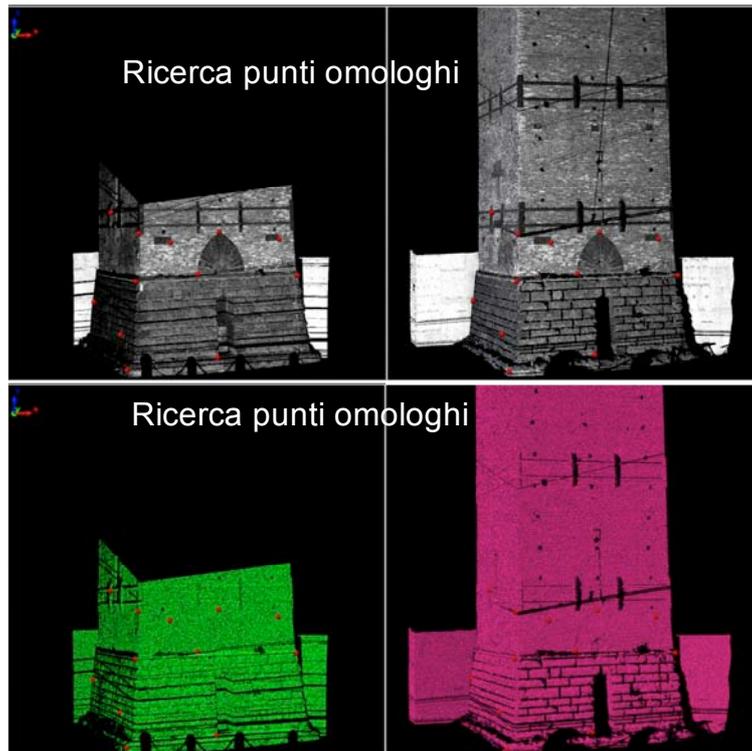


Figura 7. La ricerca dei punti omologhi sulle nuvole di punti rappresentate con la colorazione mediante intensità e con una colorazione artificiale.

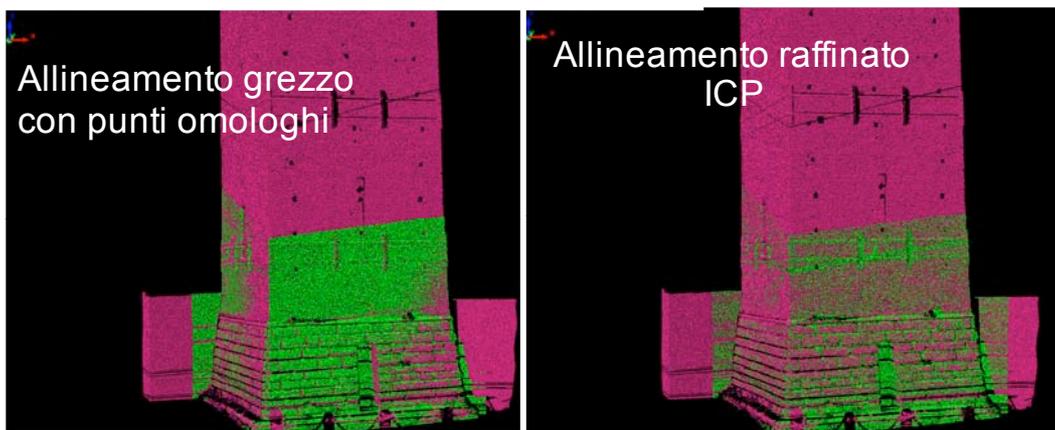


Figura 8. Risultato degli allineamenti mediante punti omologhi o mediante gli algoritmi di correlazione.

2. Verifiche sulle procedure di allineamento

Nonostante la metodologia di allineamento sopra descritta sia ampiamente diffusa e utilizzata nelle applicazioni ad alta precisione sia in ambito ambientale che architettonico, allineare degli edifici come le Due Torri, caratterizzati da un corpo stretto alcuni metri ed una altezza rilevante, è una operazione molto delicata. Specialmente quando il contesto in cui si effettuano le misure non lascia spazio alla possibilità di posizionarsi alla giusta distanza ed angolazione senza perdere la visibilità. Gli spazi stretti di movimento hanno costretto gli operatori a rilevare in condizioni geometriche in certi casi difficili: si pensi, nel caso della torre degli Asinelli, che lo strumento posto in acquisizione ad una decina di metri dalla base della struttura ha osservato fino a 90-100 m di altezza. Diventa quindi di fondamentale importanza, in questa situazione, dimostrare la bontà dell'allineamento. Nella figura 9 è mostrato un procedimento per la verifica delle

precisioni di allineamento e sono mostrati i risultati del test effettuato. Come caso campione sono state considerate due scansioni della parte alta della torre degli Asinelli, da 35 m fino alla sommità, acquisite da due punti di stazione differenti (cioè da sta1 e da sta4, in figura 5); le nuvole di punti sono evidenziate in figura 6.

La scansione A è stata bloccata ed utilizzata come scansione di riferimento. La scansione B è stata ridotta (tagliata come in figura 9), allineata sulla scansione A e bloccata a sua volta nella sua nuova posizione. Successivamente sono state ricavate 9 sotto-scansioni della scansione A tagliandola e riducendola via a via in modo tale da ottenere una sequenza di sovrapposizione con la scansione B del: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90%. Nella fase successiva, ogni sotto-scansione di A è stata allineata alla scansione B e confrontata con la scansione A originale. Il confronto si è ottenuto calcolando le differenze tra i punti di A e delle sotto-scansioni.

I risultati sono ben visibili nella figura 9 e le differenze sono evidenziati accanto ad ogni caso considerato grazie alla scala di colore. È importante notare che la statistica è stata effettuata tenendo conto solo delle differenze riferite alla parte comune della torre poiché, in caso di cattivo allineamento, è di certo la zona che risente maggiormente degli errori indotti da eventuali sistematismi.

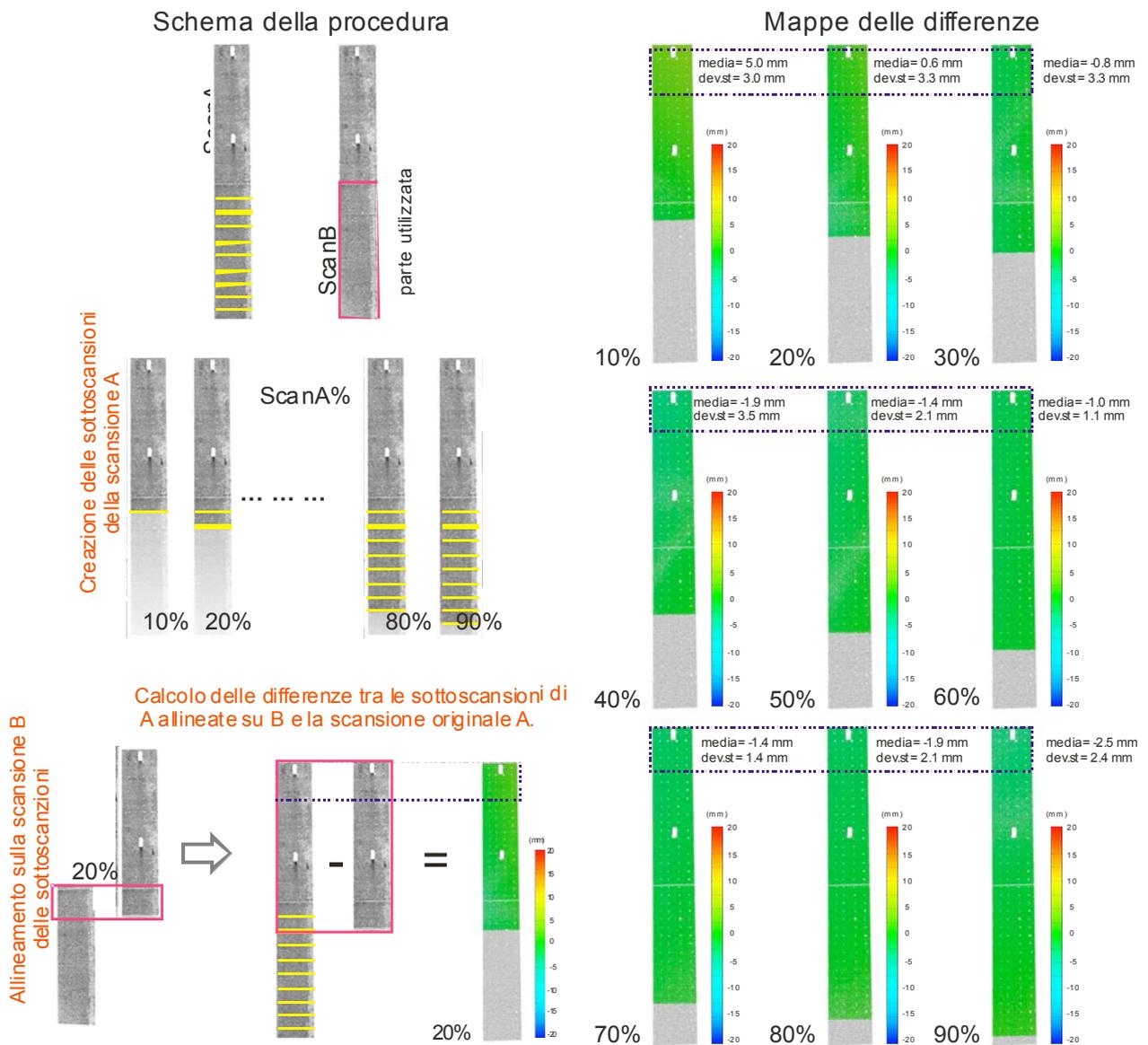


Figura 9. Test di valutazione. Il rettangolo fucsia mostra la zona comune tra la scansione A e B. Le linee gialle tratteggiano i bordi delle sotto-scansioni, da intendersi dalla sommità fino alla linea. Nella colonna di destra sono mostrati i risultati dell'allineamento, cioè la mappa delle differenze tra le sotto-scansioni di A allineate su B e confrontate con l'originale, per i vari livelli di overlapping.

Solo nel caso di un overlapping di appena il 10% vengono introdotti dei lievi sistematismi, dell'ordine di grandezza della precisione strumentale.

Nel misurare le torri, le scansioni sono state effettuate con un alto grado di sovra-campionamento, cioè operando in modo da garantire sempre un overlapping più che adeguato. Va inoltre sottolineato il fatto che le facciate adiacenti sono sempre state rilevate in una stessa scansione.

Nella figura 10 sono mostrate le nuvole di punti relative ai prospetti di via Zamboni e Rizzoli.

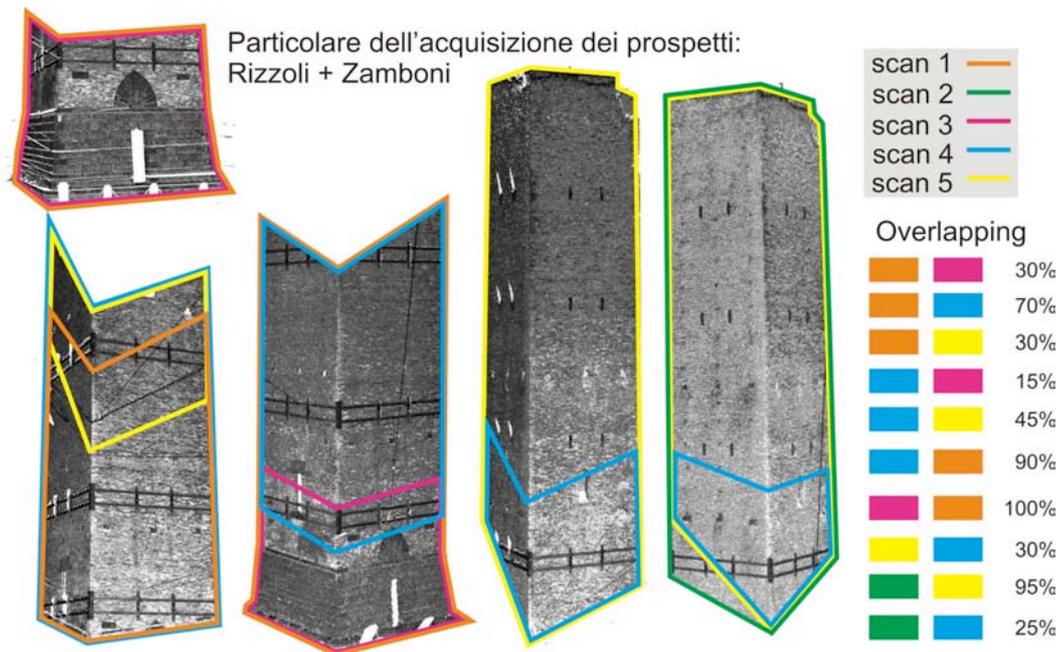


Figura 10. Le scansioni che coprono i due prospetti della torre Garisenda. L'alta sovrapposizione è evidente.

Il risultato finale degli allineamenti è mostrato in figura 11. Il test effettuato e la strategia di acquisizione utilizzata permettono di garantire il risultato non affetto da distorsioni. Purtroppo una parte della torre degli Asinelli è tuttora coperta da una alta impalcatura per gli attuali lavori di consolidamento e quindi non è stata rilevata.

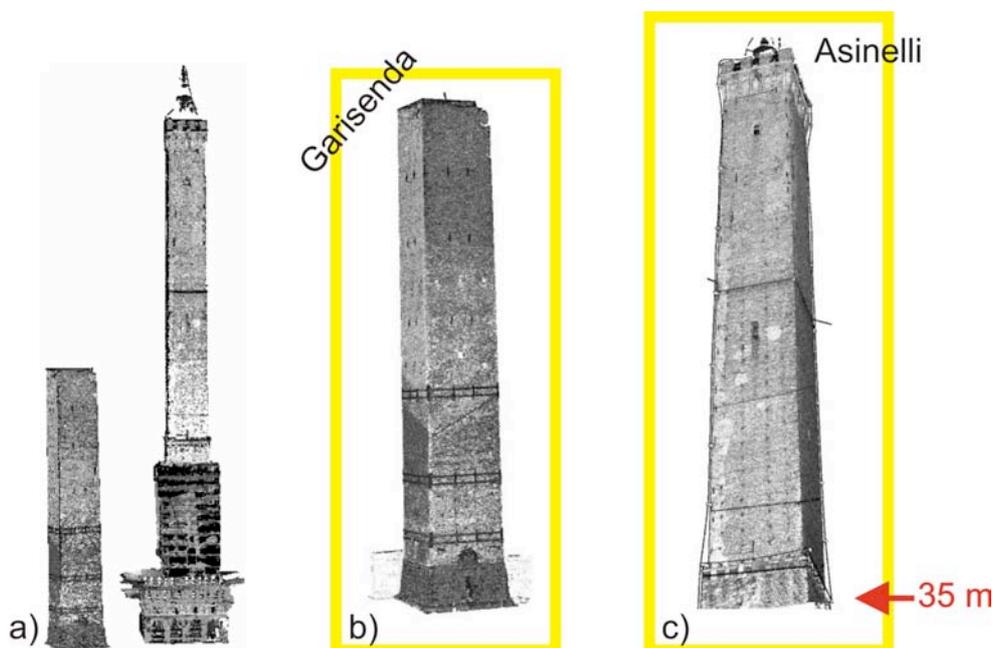


Figura 11. a) Rilievo complessivo delle Due Torri; b) torre Garisenda; c) parziale torre degli Asinelli.

3. Le analisi della morfologia delle Due Torri

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.

Nell'indagine a piccola scala, mirata alla ricerca delle grandi deviazioni, si è considerato come riferimento il piano verticale passante sulla linea che delimita l'inizio del corpo della torre; nell'indagine a grande scala, mirata invece alla ricerca delle piccole differenze, si è utilizzato il piano "interpolatore", cioè il piano che meglio approssima e rappresenta il lato della torre. Quest'ultimo viene calcolato utilizzando tutti i punti appartenenti al prospetto in esame e, per sua stessa definizione, è il piano che rappresenta idealmente il prospetto se questo non fosse caratterizzato da deformazioni o distorsioni, se fosse cioè perfettamente regolare.

L'indagine a piccola scala consiste nel calcolare la distanza tra ogni punto del prospetto in esame ed il piano verticale di riferimento, lungo la normale al piano: in questo modo, si calcolano facilmente le deviazioni e quindi le inclinazioni rispetto alla verticale. È importante in questo caso, tener presente che il perimetro della torre via via si restringe procedendo verso l'alto poiché questo accorgimento di costruzione veniva adottato per alleggerire la struttura e aumentarne la resistenza. Tenendo presente questo fatto, è normale aspettarsi deviazioni negative alla sommità della torre anche nel caso di perfetta verticalità. Nello studio qui presentato non sono state applicate correzioni specifiche ma vengono forniti i risultati diretti delle analisi.

A grande scala, le differenze tra i punti del prospetto ed il piano interpolatore mettono in evidenza le irregolarità rispetto ad una condizione ideale, ovvero le deformazioni rispetto ad una configurazione di parete piana dovute a rimaneggiamenti o a restauri, al degrado per affaticamento dei materiali per effetti di carico, a fenomeni atmosferici e naturali quali terremoti, fulmini e altro.

Il piano interpolatore non è sensibile ai restringimenti del corpo della torre, purché questi siano regolari e aumentino più o meno linearmente con l'altezza.

Nella figura 12, sono mostrati due piani di riferimento per ogni torre (relativi al prospetto su via Rizzoli). Inoltre sono indicati i due riferimenti cartesiani utilizzati per le analisi successive. Scegliere il riferimento opportuno permette di effettuare analisi più rapide e soprattutto di esportare i dati per una semplice visualizzazione con qualsiasi programma di gestione e rappresentazione.

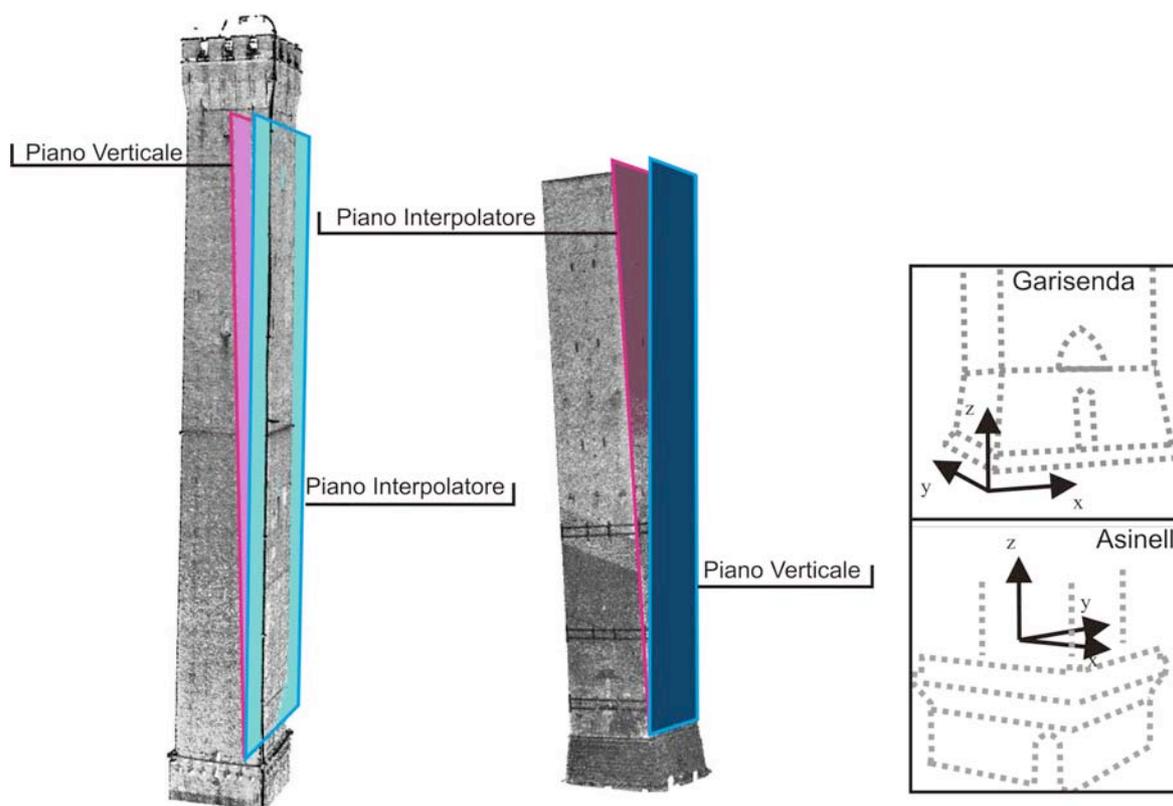


Figura 12. I piani di riferimento per l'analisi dei prospetti delle torri e i sistemi di riferimento utilizzati per le analisi locali.

3.1. Torre Garisenda

L'insieme delle nuvole di punti acquisite sulla Torre Garisenda e allineate insieme con precisione millimetrica hanno permesso di ottenere la ricostruzione totale dell'edificio. Per questioni di comodità e di semplicità nel trattamento dei dati la nuvola di punti completa è stata ruotata al fine di far coincidere gli assi cartesiani x e y con i profili della base della torre. In questo modo è molto più diretto il calcolo dei piani di riferimento ma soprattutto è molto più esportabile il risultato per visualizzare le mappe delle differenze o i punti estratti lungo i profili verticali. Nella figura 13 sono mostrati i due piani di riferimento (sul prospetto di via Rizzoli) ed il sistema di assi cartesiani.

Nelle pagine seguenti sono riportati i risultati delle analisi mediante i piani di riferimento relativi ai quattro prospetti di: via Zamboni, via San Vitale, via Rizzoli e piazza della Mercanzia.

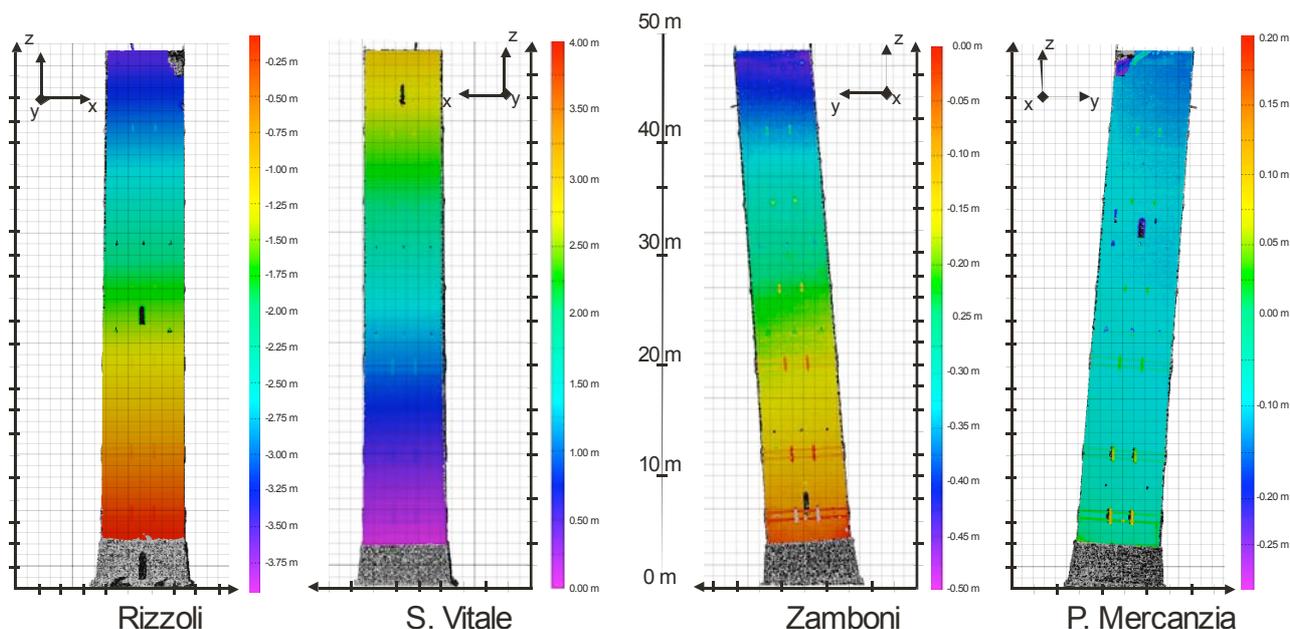


Figura 13. Gli scostamenti dalla verticale dei quattro prospetti della Garisenda.

Le analisi rispetto ai piani verticali di riferimento hanno permesso di creare le mappe delle deviazioni dei prospetti della torre rispetto ai piani verticali passanti per la base della stessa. In particolare, i piani che sono stati considerati passano sulla linea che separa la base in blocchi di selenite e il corpo laterizio della torre.

I confronti tra i punti del prospetto su via Rizzoli (prospetto ovest) ed il piano verticale mostrano una fortissima inclinazione della torre con deviazioni negative superiori a 3 m. È importante ricordare che le deviazioni negative indicano che i punti sono dietro al piano verticale considerato. Inoltre, la distribuzione delle fasce di colore mette in evidenza che, procedendo verso l'alto, l'inclinazione aumenta: oltre i 35 m, infatti, le linee di colore sono più strette. Il dato è confermato dalle analisi della parete opposta, cioè del prospetto su via San Vitale (prospetto est). In questo caso, a confermare il risultato precedente, le deviazioni sono misurate con valori positivi fino a oltre 3 m e sono pressoché speculari alle precedenti. Anche in questo caso è osservato un repentino cambio delle inclinazioni procedendo verso l'alto.

Le analisi del prospetto su via Zamboni (prospetto nord) mostrano anche in questo caso delle inclinazioni con deviazioni negative, seppur di entità assai più ridotta, con punte di circa -0.5 m.

Il prospetto su piazza della Mercanzia (sud), mostra invece una mappa più omogenea a conferma della moderata inclinazione. È bene tener presente che le torri sono costruite per reggere al proprio carico e quindi vengono snellite procedendo verso l'alto. Per questo motivo, la parte più alta è anche più stretta. Quindi, se rispetto al piano verticale la mappa delle differenze è pressoché costante si evince una leggera inclinazione dell'intera parete.

L'analisi delle deformazioni, o meglio delle deviazioni rispetto al piano interpolatore per ogni prospetto della torre, mostrano nel dettaglio quelle irregolarità indicative di uno stato di alterazione o degrado. In figura 14 sono mostrati i risultati.

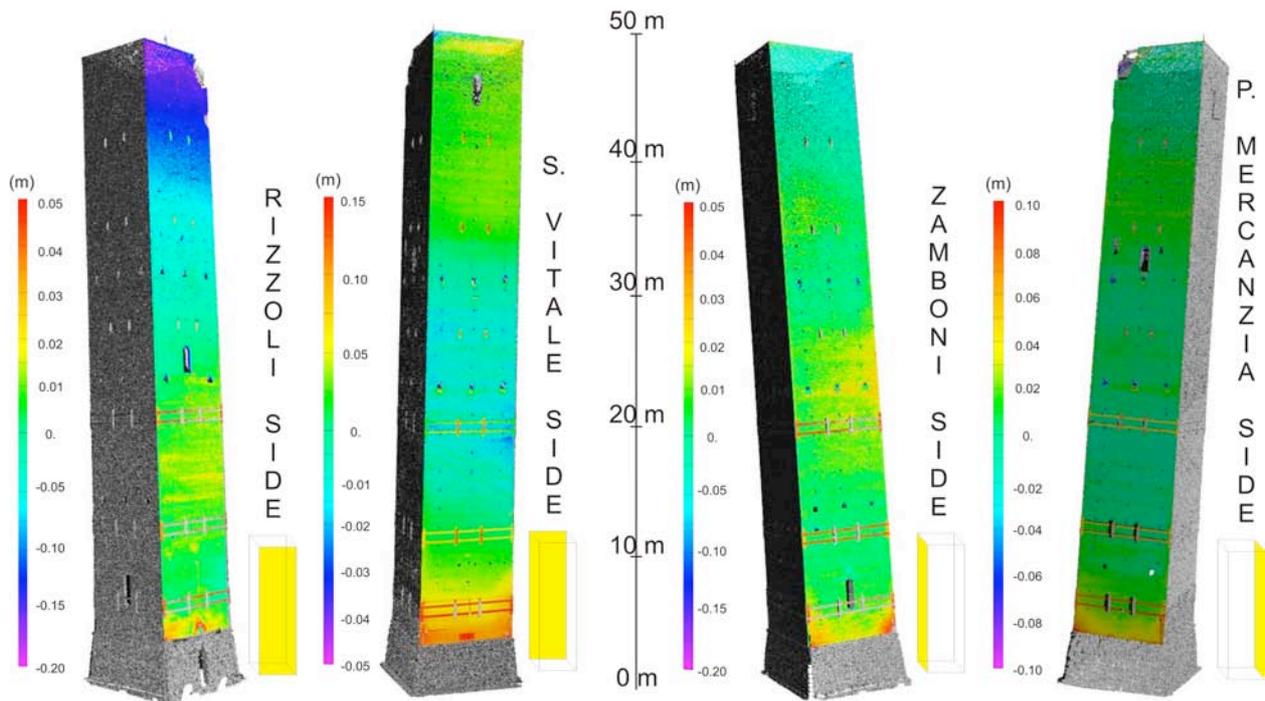


Figura 14. Le deformazioni delle pareti della Garisenda sui prospetti di via Rizzoli, San Vitale, piazza della Mercanzia e Zamboni.

Le deviazioni relative al prospetto su via Rizzoli, mostrano chiaramente zone di rigonfiamento nella fascia più bassa del corpo della torre e tra le due cinghie metalliche installate nel 2000 per consolidare la torre in elevazione. Inoltre, è evidente un repentino cambio dell'inclinazione della torre nella parte alta.

Le stesse evidenze sono osservate nel prospetto su via San Vitale, cioè la facciata opposta. Anche in questo caso si osserva un chiaro rigonfiamento nella fascia bassa della torre e il cambio di pendenza nelle parti superiori.

Il prospetto su via Zamboni è caratterizzato ancora da un netto rigonfiamento alla base della torre e da una bombatura nella zona sopra la terza cinghia metallica e nella fascia superiore (circa 35 m).

Il lato opposto, cioè il prospetto su piazza della Mercanzia, evidenzia ancora una volta i rigonfiamenti alla base e una sequenza di deviazioni positive e negative lungo tutto il corpo della torre.

L'alta risoluzione della misura e la completezza del dato acquisito sulla superficie della torre ha reso quindi possibile scoprire che tutte 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. Tuttavia bisogna sempre ricordare che l'osservazione laser non permette di distinguere in maniera univoca se la geometria osservata sia il risultato di una lenta deformazione in atto da secoli o se sia dovuta a difetti di costruzione e interventi di restauro di cui nel tempo si è persa la memoria, ma certamente permette un controllo ed un monitoraggio dettagliato di ogni parte della torre e può essere utilizzata come prezioso indicatore per ulteriori interventi di consolidamento.

3.2. Torre degli Asinelli

In maniera analoga a quanto in precedenza descritto, anche i prospetti della Torre degli Asinelli sono stati analizzati. Il calcolo delle differenze tra i punti misurati sui prospetti della torre ed il piano verticale di riferimento rende possibile capire il livello di inclinazione ad ogni altezza e mette in evidenza le deviazioni rispetto ad una situazione ideale in cui la facciata sia perfettamente in asse e diritta.

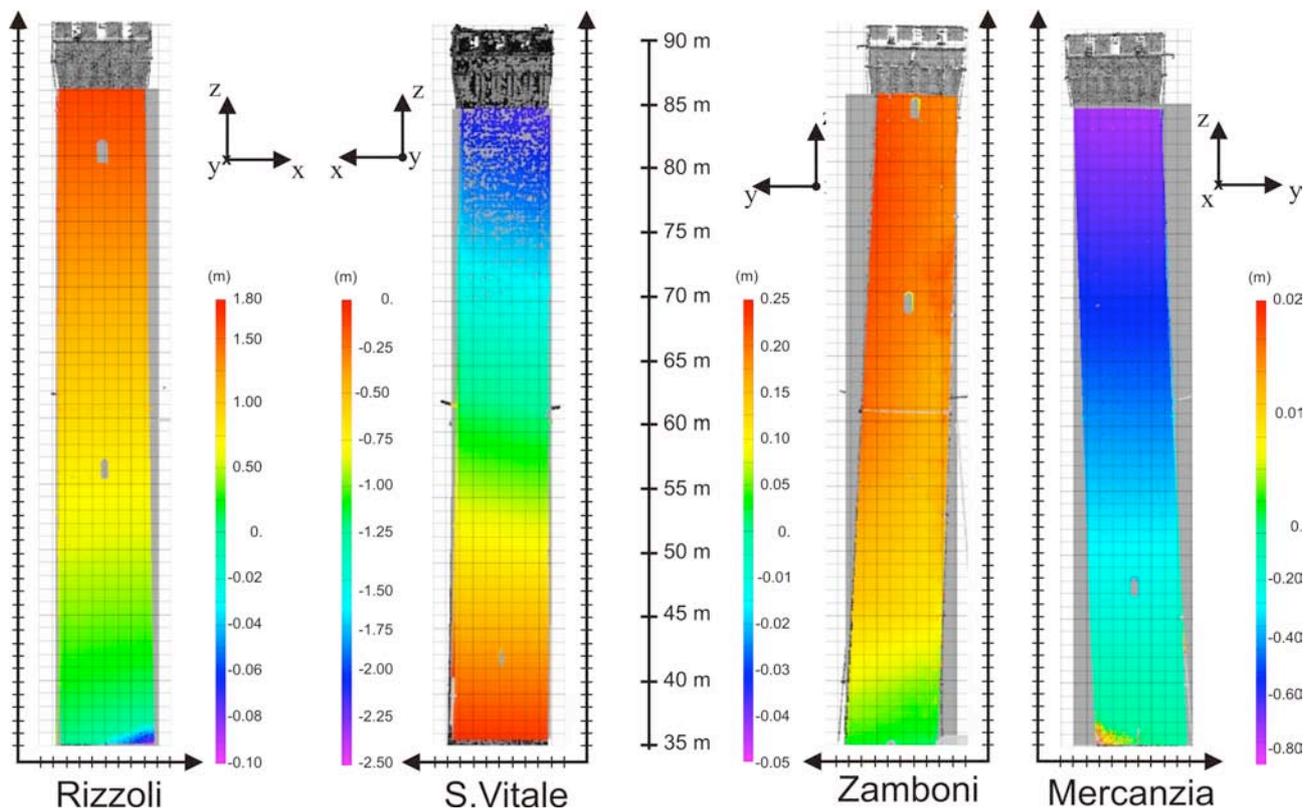


Figura 15. Gli scostamenti dalla verticale dei quattro prospetti della Torre degli Asinelli.

Il prospetto su via Rizzoli (prospetto ovest) mostra principalmente delle deviazioni positive che variano tra 0 e circa 150 cm, a dimostrazione della accentuata inclinazione verso via Rizzoli.

Si nota anche, nella parte più bassa (35 m), una zona negativa con punte fino a -10 cm, che mettono in evidenza una deformazione della parte osservata già nell'indagine a piccola scala.

L'analisi del prospetto di via San Vitale (prospetto est), opposto al precedente, mette ancora in evidenza le inclinazioni variabili con l'altezza e caratteristiche della pendenza verso via Rizzoli, ma rivela anche che le facce della torre non sono parallele. Si osserva infatti una netta distribuzione del colore su linee diagonali.

Analogamente è stato analizzato il prospetto su via Zamboni (prospetto nord) ed anche in questo caso sono evidenti differenze positive variabili tra 0 e circa 22 cm a mostrare l'inclinazione. Anche in questo caso, una attenta osservazione suggerisce che anche questo lato non è perfettamente ortogonale rispetto al sistema considerato.

Il prospetto su piazza della Mercanzia (prospetto sud) conferma in buona sostanza le deviazioni osservate sul lato parallelo seppur con valori più accentuati, così come l'anomalia nella parte più bassa del rilievo.

La prima analisi della torre mette quindi in evidenza una pendenza importante verso via Rizzoli, con deviazioni dell'ordine di 2 m, ed una pendenza minore ma presente verso via Zamboni, con deviazioni dell'ordine di 0.5 m.

Applicando lo stesso tipo di analisi ma in riferimento ai piani interpolatori di ogni lato della torre, si sono ottenuti i risultati mostrati in figura 16.

Le mappe di deformazione, così chiamate per distinguerle dalle precedenti, mettono in rilievo parecchie anomalie. In particolare, le differenze in relazione al prospetto su via Rizzoli (prospetto ovest) lasciano osservare una ampia zona nella fascia più bassa, tra i 35 m ed i 40 m di altezza, di valori negativi ad indicare una posizione inclinata all'indietro, cioè una netta rientranza. Si osserva una parte di valori positivi tra i 45 m ed i 65 m ed ancora valori negativi procedendo verso l'alto. La sequenza di valori negativo-positivo-negativo permette di capire che l'intero prospetto ha una forma arcuata e segmentata, strutturalmente definito "arco con cerniere". Inoltre, la leggera diagonalità suggerisce un effetto di torsione.

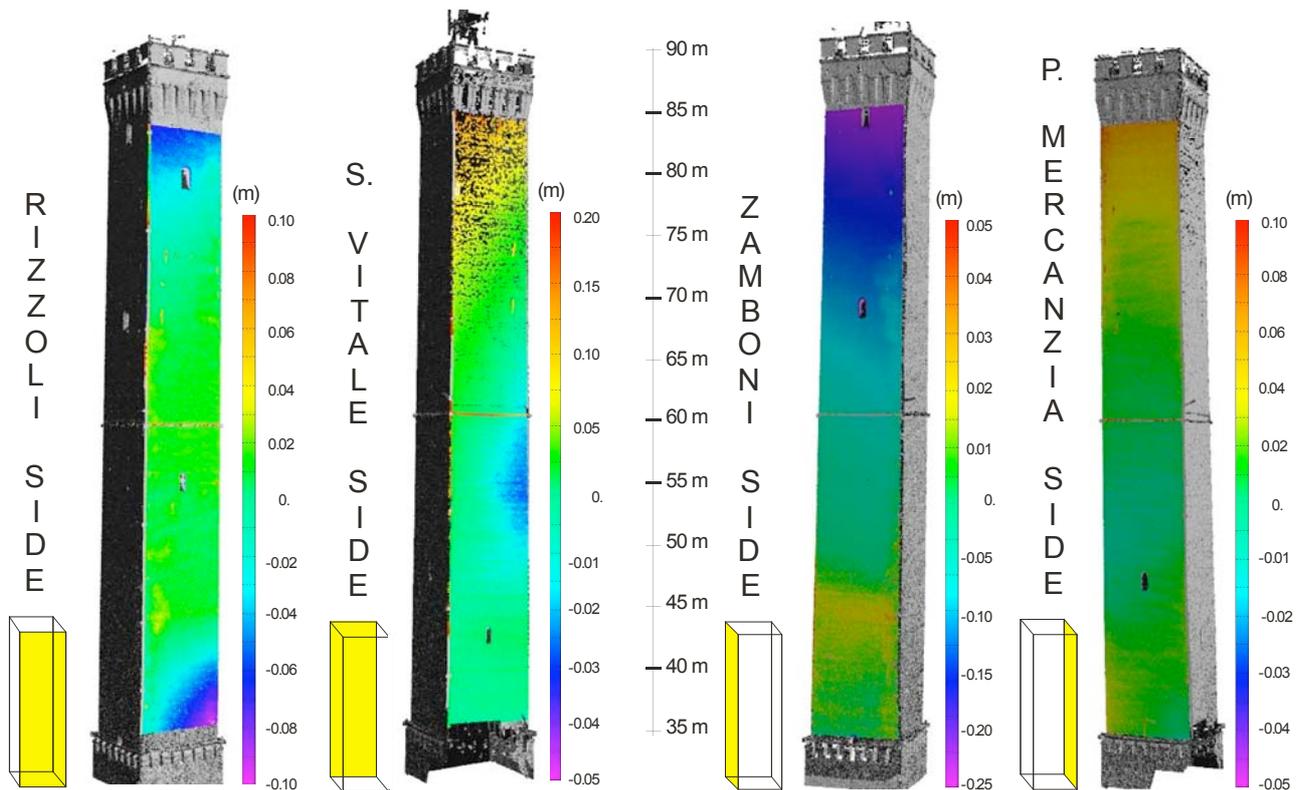


Figura 16. Le deformazioni delle pareti della Torre degli Asinelli sui prospetti di via Rizzoli, San Vitale, piazza della Mercanzia e Zamboni.

Il prospetto opposto, su via San Vitale (prospetto est), rivela un assetto curioso. In particolare, nelle fasce più alte è evidente una distribuzione diagonale delle differenze a suggerire ancora un effetto di torsione dell'area, mentre una zona di residui negativi è individuata a circa 50 m, a indicare un possibile punto di accumulo degli sforzi.

Nel prospetto su via Zamboni (prospetto nord) è chiaramente visibile una alternanza di differenze negative-positive-negative che spiegano come, anche in questo caso, la struttura abbia una forma arcuata e ancor meno regolare rispetto ai casi osservati in precedenza. È evidente il cambio di pendenza salendo in elevazione.

L'analisi del lato opposto, prospetto su piazza della Mercanzia, mostra e conferma il cambio di pendenza verso via Zamboni e ancora mette in evidenza le alternanze dei valori delle differenze.

Infine, in tutte le mappe di deformazione mostrate sono anche evidenti delle chiazze di colore ben localizzate e certamente legate a lavori di ricostruzione avvenuti nei secoli per riparare i danni causati da fulmini, incendi, terremoti ed altro.

4. Discussione e conclusioni

La tecnologia laser a scansione ha permesso di osservare in dettaglio le anomalie presenti nelle pareti della torre Garisenda e degli Asinelli. Il metodo di indagine utilizzato è basato sul calcolo della distanza tra i punti misurati sui prospetti e specifici piani di riferimento. In particolare, si sono creati piani di riferimento verticali, passanti per la base della torre e paralleli al corpo della torre, e piani di riferimento interpolatori, creati fittando tutti i punti dei singoli prospetti. Questi ultimi, sono le primitive che meglio rappresentano il prospetto per cui, le deviazioni rispetto ad esse vengono in qualche modo considerate come deformazioni.

Le indagini 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) 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.

È importante constatare che 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) sono localizzate nelle aree consolidate nel 2000.

In merito alle analisi della torre degli Asinelli, nelle parti che si sono potute osservare, comprese tra i 35 m di altezza fino alla sommità, è possibile affermare 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 condizione ideale. Le analisi mostrano anche, in certi casi, una distribuzione di deviazioni che suggerisce un assetto dovuto a effetti di torsione. Questi ultimi dovranno essere meglio analizzati poiché le costruzioni in mattone sono molto resistenti agli effetti di carico mentre resistono debolmente alle torsioni.

Le analisi rispetto al piano verticale mostrano una inclinazione di circa 1.7° verso via Rizzoli e di circa 0.5° verso via Zamboni.

Si può quindi concludere che si sono ottenuti interessanti ed oggettivi riscontri sulla attuale "morfologia" della torre e una attenta osservazione rivela numerose anomalie, deviazioni e deformazioni "preoccupanti" sia alla base che a livelli superiori delle parti osservate.

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. In tali pubblicazioni sono simulate le deformazioni dovute sia al carico statico della torre che a sollecitazioni ed accelerazioni causate da fenomeni imprevedibili quali i terremoti (con riferimento agli eventi storici di cui si ha notizia). Le accelerazioni mostrano dei massimi e dei minimi procedendo in verticale. In particolare, tra i 25 m ed i 40 m, tra i 60 m e i 70 m e oltre gli 85 m si stimano gli effetti più importanti. Questi sono in buon accordo con le zone in cui si misurano delle deformazioni più grandi e soprattutto dove sono più repentine le variazioni.

La distribuzione delle deviazioni e l'indicazione fornita dalle simulazioni e dalla sismica suggeriscono che la torre degli Asinelli sia estremamente sensibile alle sollecitazioni del terreno.

4.1. Nota sul metodo di misura

La metodologia utilizzata per evidenziare le deformazioni delle pareti osservate e per quantificare l'inclinazione dei prospetti di interesse è basata sul confronto tra le coordinate dei punti rilevati e i piani di riferimento. Con questo sistema di indagine è possibile valutare anche differenze dell'ordine della precisione del rilievo poiché vengono confrontati grandi quantità di dati e si riesce ad osservare la tendenza generale delle deviazioni rispetto ad un piano nelle zone di interesse. In linea di principio è lo stesso approccio che si utilizza per interpolare i dati GPS con una retta e valutare poi gli effetti dei movimenti stagionali dovuti alle condizioni atmosferiche o altro.

Un esempio di applicazione che descrive molto bene l'efficacia del metodo è mostrato in figura 17. Si mostra il rilievo di una parte di Palazzo d'Accursio di Bologna, sede del Comune. La facciata è chiaramente il risultato di numerosi rimaneggiamenti e restauri. Nella mappa si individuano facilmente differenze positive in coincidenza con l'apertura di nuove finestre con relativo cambio dell'intera facciata. Si evidenzia una inclinazione nella parte superiore del sottotetto nella parte centrale del prospetto. Inoltre, zoomando (riquadro nero) e stringendo la scala si mettono in evidenza delle discontinuità nette caratterizzate da una forma geometrica precisa che rivela la presenza di una finestra murata di altezza 4.3 m e larghezza di 1.2 m.

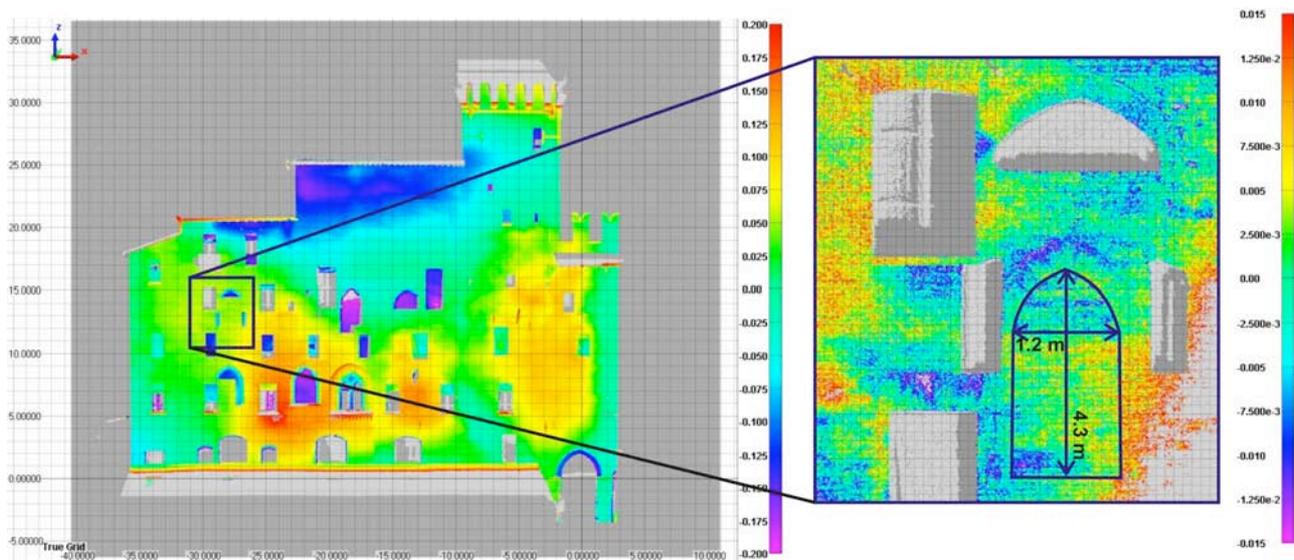


Figura 17. Mappa delle differenze punto-piano su una facciata di Palazzo d'Accursio. a) Mappa delle differenze tra [-20, 20] cm; b) mappa di un particolare tra [-1.5, 1.5] cm.

Le applicazioni descritte in questo lavoro ed i risultati ottenuti confermano l'alta precisione ottenibile dai rilievi laser scanner nello studio delle deformazioni degli edifici. In particolare, l'alta densità dell'informazione permette di creare delle precise e chiare mappe su cui è semplice localizzare le deviazioni anomale. Per questo motivo, l'impiego di questa tecnologia per il monitoraggio di edifici lesionati da eventi sismici o costruiti in aree soggette a dissesto idrogeologico (quali frane, ecc.) potrebbe fornire indicazioni importanti per scopi di protezione civile. Basti pensare che per effettuare un rilievo ad alta definizione sono sufficienti poche ore di lavoro e lo stesso vale per la fase di processamento del dato. Una mappa dettagliata delle eventuali lesioni o deformazioni subite dall'edificio in seguito ad un evento sismico può quindi essere ottenuta in brevissimo tempo e in condizioni di estrema sicurezza per gli operatori.

Bibliografia

- Bae K-H., D.D. Lichti, A method for automated registration of unorganised point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63 (1) (1999) 36–54.
- Baldi P., B. Casula, N. Cenni, F. Loddo, A. Pesci, GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy). *Earth and Planetary Science Letters* 288 (1–2) (2009) 204–212.
- Bergevin R., M. Soucy, H. Gagnon, D. Laurendeau, Towards a general multi-view registration technique, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18 (5) (1996) 540–547.
- Bitelli G., F. Bonsignore, M. Uguendoli, Levelling and GPS network to monitor round subsidence in the Southern Po valley, *Journal of Geodynamics* 30 (3) (2000) 355–369.
- Carminati E., G. Martinelli, Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation, *Engineering Geology* 66 (3–4) (2002) 241–255.
- Casula G., A. Pesci, M.G. Bianchi, F. Loddo, La stazione gps BLGN per il monitoraggio della subsidenza, 2009, *Rapporti Tecnici INGV*, n. 100.
- Clark M.R., D.M. McCann, M.C. Forde, Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges, *NDT & E International* 36 (4) (2003) 265–275.
- Fava A., M. Farina, M. Marcaccio, Le caratteristiche degli acquiferi della regione Emilia Romagna, report ARPA (Agenzia Regionale Prevenzione Ambiente dell'Emilia Romagna), 2003, http://www.arpa.emr.it/dettaglio_documento.asp?id=553&idlivello=216 (accessed October 20, 2010, in Italian).
- GIM, Terrestrial laser scanners, <http://www.gim-international.com>. accessed: (October 20, 2010).
- Hutchinson T.C., Z.Q. Chen, Improved image analysis for evaluating concrete damage, *Journal of Computing in Civil Engineering* 20 (3) (2006) 210–216.
- Innovmetric, PolyWorks reference manual, <http://www.innovmetric.com> (accessed: October 20, 2010).
- Marchetti M., Environmental changes in the Central Po Plain (Northern Italy) due to fluvial modifications and anthropogenic activities, *Geomorphology* 44 (3–4) (2002) 361–373.
- Optech, ILRIS 3D laser scanner description, <http://www.optech.ca/prodilris.htm> (accessed: October 20, 2010).
- Park H.S., H.M. Lee, H. Adeli, A new approach to health monitoring of structures: terrestrial laser scanning, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22 (1) (2007) 19–30.
- Peeters B., G. De Roeck, Stochastic system identification for operational modal analysis: a review, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control - Transactions of the ASME* 123 (2001) 659–667.
- Pesci A., F. Loddo, D. Conforti, The first terrestrial laser scanner survey OVER VESUVIUS: the high resolution model of VOLCANO crater (Napoli, Italy), *International Journal of Remote Sensing*, 28 (1) (2007) 203–219.
- Pesci A., G. Teza, E. Bonali, Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization. Submitted to *Remote Sensing*, 3 (2011)167-184. doi:10.3390/rs3010167.
- Pesci A., G. Casula, E. Boschi, Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings, *Journal of Cultural Heritage*, in press. Doi: 10.1016/j.culher.2011.01.002.
- Rens K.L., L.F. Greimann, Ultrasonic approach for nondestructive testing of civil infrastructure. *Glass and Ceramics* 11 (3) (1997) 97–104.
- Stramondo S., M. Saroli, C. Tolomei, M. Moro, F. Doumaz, A. Pesci, F. Loddo, P. Baldi, E. Boschi, Surface movements in Bologna (Po Plain - Italy) and in the detected from multitemporal DInSAR, *Remote Sensing of Environment* 110 (3) (2007) 304–316.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2011 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia