

Rapporti tecnici

INGV

Caratterizzazione geometrica mediante laser a scansione della Torre Volognana e del Palazzo del Bargello (Firenze) per fini di indagini strutturali e storiche

335



Direttore Responsabile

Stefano GRESTA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV - RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)



Rapporti tecnici

INGV

CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA MEDIANTE LASER A SCANSIONE DELLA TORRE VOLOGNANA E DEL PALAZZO DEL BARGELLO (FIRENZE) PER FINI DI INDAGINI STRUTTURALI E STORICHE

Federico Bonelli¹, Arianna Pesci², Giordano Teza³

¹Università degli Studi di Pisa (Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale)

²INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

³Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze)

335

Indice

Introduzione	7
1. Indagini documentali sulla Torre Volognana e il Palazzo del Bargello	7
2. Rilievo delle strutture e allineamento delle scansioni	8
3. Metodologia di indagine	13
4. Torre Volognana	14
4.1 Analisi morfologica	14
4.2 Quantificazione della deviazione dalla verticale	17
5. Indagini sulle murature perimetrali del Salone di Donatello	18
6. Indagini sulle volte del Salone di Donatello	21
7. Discussione e conclusioni	23
Ringraziamenti	24
Bibliografia	24

Introduzione

La tecnica laser a scansione terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS) è di rilevante interesse sia nel rilievo geologico, sia in quello architettonico perché consente un'acquisizione relativamente rapida e affidabile di nuvole di punti in grado di rappresentare tridimensionalmente gli oggetti rilevati. La qualità delle nuvole di punti in termini di precisione, accuratezza e risoluzione spaziale, unita alla possibilità di automatizzare o quantomeno rendere semiautomatiche le successive post-elaborazioni dei dati, ha portato ad un ampio spettro di applicazioni della tecnica in questione. Nel caso di un edificio, tali dati, eventualmente integrati con dati fotogrammetrici, possono usarsi per fornire informazioni a carattere tecnico-strutturale e storico-documentale [De Luca et al., 2011]. Dalle dense nuvole di punti ottenute, in tempi relativamente rapidi, con TLS possono generarsi modelli geometrici precisi e dettagliati (per una trattazione generale si veda ad esempio [Sgrenzaroli and Vassena, 2007]). La fase di post-elaborazione dei dati è indubbiamente la fase più complessa e determinante dell'intero ciclo di lavoro e deve comunque essere oggetto di valutazione ed interpretazione sulla base della specifica applicazione.

Vari studi hanno evidenziato come i sistemi *very long range* (VLR-TLS), cioè gli strumenti concepiti prevalentemente per il rilievo ambientale e in grado di acquisire superfici distanti centinaia di metri, siano particolarmente adatti al rilievo di edifici in condizioni di emergenza sismica, in modo da fornire informazioni sullo stato deformativo degli stessi utili ai fini dell'analisi strutturale. Le esperienze maturate durante il terremoto dell'Emilia Romagna del 2012 hanno attestato che il dato VLR-TLS, restituito mediante mappe di deformazione, è uno strumento sinottico efficace, sintetico e soprattutto intuitivo. Lo studio delle condizioni di un edificio è basato principalmente sull'analisi morfologica dei prospetti di tipo planare o cilindrico [Pesci et al., 2013] o anche tronco-conico [Teza and Pesci, 2013]. Tale metodologia di analisi dati è articolata in: misura e creazione delle nuvole di punti, definizione delle primitive che meglio rappresentano ciascun prospetto, creazione delle mappe di deformazione e, infine, verifica che i valori ottenuti siano maggiori delle distorsioni indotte nel modello dalle condizioni di rilievo.

Nel presente studio la tecnica TLS è stata utilizzata al fine di caratterizzare la geometria del Museo Nazionale del Bargello e della Torre Volognana a Firenze (Figura 1). Il Palazzo del Podestà o del Bargello, situato nel Centro Storico della città e costruito nel 1250, dal 1865 ospita il Museo Nazionale del Bargello; l'adiacente torre campanaria, alta circa 55 m, è denominata Torre dei Boscoli, comunemente però detta di Volognana dai tempi della prigionia nella stessa di Geri da Volognano sul finire del XIII secolo. Lo studio non è legato a problematiche inerenti all'emergenza sismica. Al contrario, l'obiettivo è evidenziare come un'adeguata analisi dei dati TLS possa fornire informazioni fondamentali non solo in condizioni di emergenza ma anche ai fini dell'identificazione di caratteristiche e peculiarità strutturali, utili negli studi progettuali di eventuali restauri e/o consolidamenti strutturali. Tali conoscenze possono infatti suggerire le corrette strategie di intervento diventando una sorta di guida procedurale per le scelte progettuali di miglioramento e/o adeguamento sismico. Inoltre, i dati ottenuti possono guidare la scelta degli edifici da monitorare con tecniche di più complessa attuazione come l'analisi modale sperimentale (EMA), che, pur in grado di fornire data particolarmente affidabili ai fini della valutazione dello stato strutturale di un edificio, richiede l'installazione di una rete di accelerometri sull'edificio stesso [Catbas et al., 2006].

1. Indagini documentali sulla Torre Volognana e il Palazzo del Bargello

Data l'importanza della struttura studiata, che ospita al suo interno il museo più importante al mondo per la scultura di epoca rinascimentale, ossia il Museo Nazionale del Bargello, è stata eseguita un'approfondita indagine storica sulla costruzione. In qualsiasi indagine strutturale è importante conoscere la storia dell'edificio e degli eventuali interventi e modifiche effettuati sullo stesso nel corso del tempo; ciò vale, ovviamente, anche nel caso delle analisi basate su dati TLS, i cui risultati possono essere così convalidati e correttamente interpretati. L'accoppiamento tra indagini documentali e analisi tecniche può portare a risultati talvolta inaspettati, come l'individuazione delle fasi costruttive o il riconoscimento di manipolazioni antropiche effettuate nel tempo, ad esempio ampliamenti, sopraelevazioni o anche ristrutturazioni.

Le indagini documentali hanno evidenziato varie fasi costruttive differenziate nel tempo. La Torre Volognana (nel seguito, per brevità, detta semplicemente Torre) è il manufatto più antico, costruito precedentemente al 1250, mentre il Palazzo del Bargello (nel seguito, per brevità, detto semplicemente Palazzo) è stato costruito in un primo nucleo tra il 1250 ed il 1260 e successivamente ampliato. Maggiori informazioni e interpretazioni a carattere storico possono trovarsi in [Giorgi and Matracchi, 2004]. La Figura

1 presenta la pianta del Palazzo e della Torre con l'indicazione delle principali fasi costruttive.

Due eventi importanti hanno determinato il rimaneggiamento del Palazzo. Il primo è un gravissimo incendio occorso il 29 febbraio 1332, che distrusse i piani alti sui tre lati dell'edificio; i documenti storici mostrano che, a seguito di tale evento, il Comune decise il rifacimento dell'edificio tutto in volte fino al tetto. Una conferma di ciò è data dalla presenza di una striscia rossastra nel muro all'interno del cortile, coincidente con tutta probabilità con la zona in cui dovevano fuoriuscire i lembi di fuoco. Il secondo risale al novembre del 1857, allorquando iniziò il restauro dell'edificio, affidato all'Arch. Mazzei, architetto delle Regie Fabbriche. Il lavoro si protrasse per otto lunghi anni con interruzioni frequenti, tra cui quella del 1861 in occasione della Mostra Nazionale Italiana, in cui il Palazzo fu parzialmente aperto al pubblico. A seguito di questi lavori il Palazzo riprese la sua forma originaria dopo anni cupi in cui, pare, fu utilizzato quale prigione, previa suddivisione in numerose celle.

Anche la Torre, adiacente al Palazzo, è stata oggetto di varie fasi costruttive. Inoltre, in seguito alla comparsa di fessure sulla struttura, negli anni '80 del XX secolo è stata oggetto di incatenamenti e consolidamento della muratura a sacco, oltre ad interventi diretti sulle fondazioni con l'utilizzo di micropali.

Si sottolinea fin d'ora, e non si mancherà di sottolineare nel seguito, che le descritte informazioni storiche, accompagnate da ulteriori dati forniti da documenti storici, sono risultate essere di primaria importanza ai fini dell'interpretazione dei risultati delle indagini basate su TLS. Non si mancherà poi di sottolineare come i dati TLS possano essere utilizzati a fini di ricostruzione storica in quei casi in cui la documentazione sia carente.



Figura 1. Pianta del Palazzo del Bargello e principali fasi costruttive.

2. Rilievo delle strutture e allineamento delle scansioni

Il rilievo del Museo Nazionale del Bargello è stato eseguito con strumento VLR-TLS Riegl LMS-Z390i. Ciascuna nuvola di punti fornita dallo strumento è definita in un sistema di riferimento relativo e, per ottenere il rilievo completo dell'area, è necessario procedere al loro allineamento (o registrazione) mediante il metodo dei punti omologhi, metodi di *surface matching* iterativo oppure a una combinazione di essi. Lo strumento TLS è stato affiancato dalla stazione totale Trimble 5600, e ciò al fine di allineare le scansioni con l'utilizzo di punti omologhi, rappresentati da specifici target artificiali posizionati nello scenario, e contemporaneamente georeferenziare i dati grazie ad una serie di misure GPS rapido-statiche eseguite

contestualmente al rilievo. In particolare, l'allineamento per punti omologhi è stato eseguito mediante il *plug-in* del software Riegl RiSCAN PRO denominato *Multi Station Adjustment (MSA)*.

L'organizzazione del rilievo si è presentata fin dal principio difficoltosa per le caratteristiche intrinseche della zona ove sorge il Palazzo. Le complicazioni sono derivate dalla geometria della viabilità; le strade, inglobate tra immobili molto alti (come spesso avviene per le vie collegate agli immobili dei Signori, in questo caso Palazzo Vecchio), hanno costretto ad eseguire rilievi in condizioni di osservazione lontane dall'incidenza normale e dunque altamente sfavorevoli. In tali condizioni si ottiene un'impronta laser molto allungata, con rischio di sparpagliamento del segnale e conseguente peggioramento della precisione delle misure. La presenza di numerose persone estranee nelle zone di rilievo ha reso necessaria una particolare cura nell'evitare urti accidentali e/o forti vibrazioni durante i rilievi o anche la rimozione volontaria o fortuita dei predetti target artificiali.

Sono state effettuate in tutto 12 scansioni: 6 all'esterno dell'edificio, 2 all'interno del cortile del Palazzo, e 4 all'interno del Salone di Donatello (Figura 2). Inizialmente è stato deciso di utilizzare come metodologia di allineamento il metodo dei punti omologhi, basato sull'uso di target artificiali facilmente individuabili in modo automatico in fase di post-elaborazione.

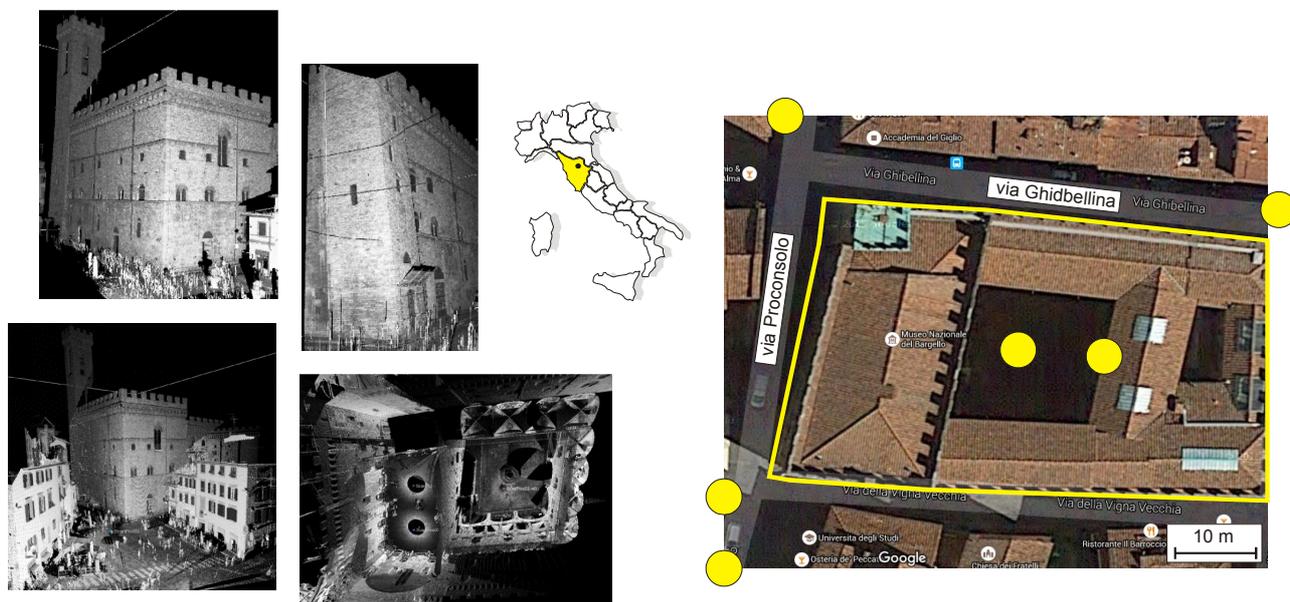


Figura 2. Mappa dell'area rilevata e alcune nuvole di punti (scansioni) acquisite all'esterno ed all'interno del museo del Bargello. I punti di stazione sono mostrati sulla mappa con i cerchietti gialli. La mappa è orientata secondo il nord rete.

Prima di procedere con le elaborazioni di monitoraggio è stata eseguita una verifica del corretto allineamento delle scansioni. A tal fine, sono state generate *mesh* di triangoli tramite l'ausilio del software Geomagic Studio, idoneo alla creazione di modelli digitali di oggetti fisici a partire da nuvole di punti. Come evidenziato in Figura 3 e in Figura 4, sono presenti alcuni disallineamenti tra le varie scansioni. Il modello ottenuto non è dunque soddisfacente.

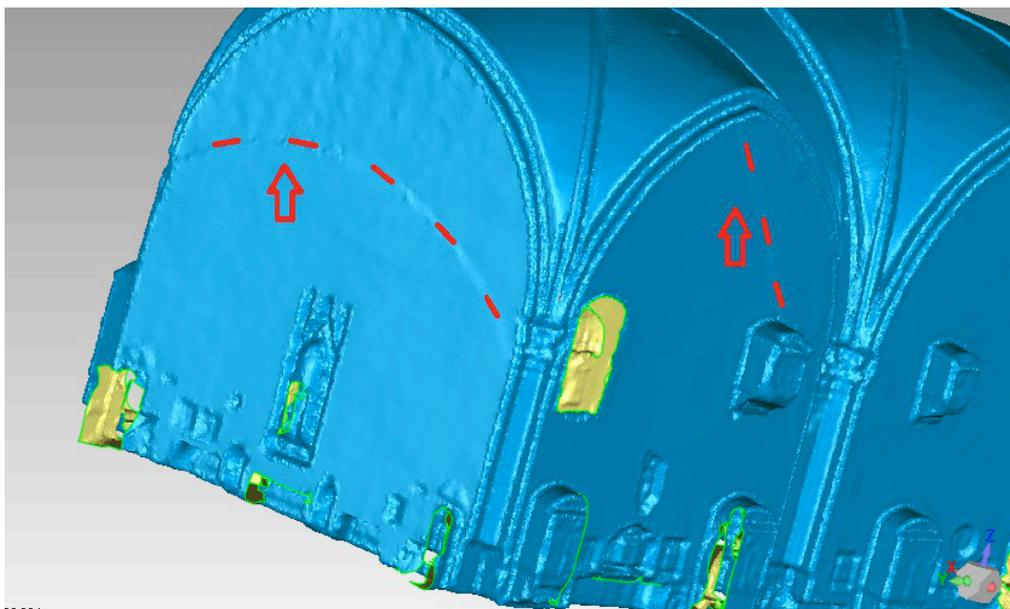


Figura 3. Modello triangolato (*mesh*). In rosso sono indicati i sistematismi osservati dopo l'allineamento delle scansioni.

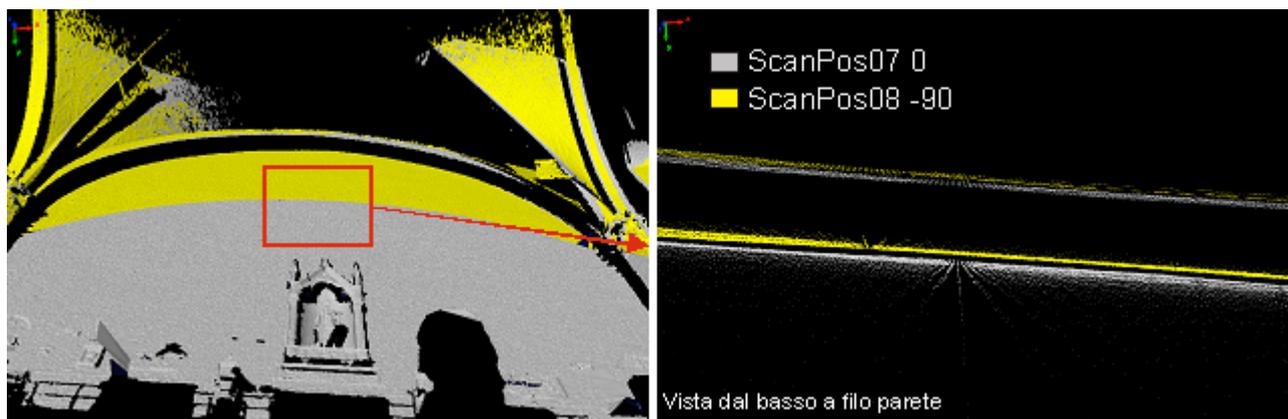


Figura 4. Zoom dei disallineamenti osservati.

La fase di allineamento rappresenta indubbiamente un passaggio critico nell'analisi dei dati allorché lo scopo finale sia un'indagine dettagliata sulle condizioni della struttura e non la semplice rappresentazione dello stato di fatto. Nel caso specifico, l'errore di allineamento dovuto all'utilizzo dei punti omologhi probabilmente non è da attribuirsi alla metodologia in sé stessa ma alla distribuzione non ottimale dei target nello scenario. Infatti, a causa dell'impossibilità di salire sulla Torre o nelle zone alte del Salone di Donatello, i target sono stati infatti inseriti in un *range* di altezza variabile tra 0.5 e 3 m: Considerando che le volte del Salone anzidetto superano i 17 m di altezza e che la torre supera i 55 m, è possibile ipotizzare che sia nata una distorsione nel collegamento tra i dati dovuta alla mancanza di punti "fissi" nelle altezze superiori. Inoltre, al fine di ottenere un errore di allineamento ragionevole è richiesta una quantità di target davvero elevata, ben superiore alla decina o alle poche decine generalmente utilizzate in un rilievo. Ciò comporta che l'allineamento per punti omologhi non può essere ritenuto sufficientemente preciso per analisi ad alto livello nel caso di un edificio complesso e con vincoli stringenti sulle possibili posizioni dei target.

Preso atto di queste problematiche nell'allineamento, è stata applicata un'ulteriore procedura di controllo per verificare o per escludere la presenza di eventuali errori sistematici nella ricostruzione del

modello finale. I risultati sono mostrati in Figura 5a, nella quale si possono osservare le mappe delle differenze nelle zone comuni, con un range tra $\pm 5/10$ cm: nel caso dell'allineamento per punti omologhi, i valori delle differenze sono mediamente contenuti tra ± 0.5 cm, ma in alcuni casi si osservano errori di ± 2 cm. Tali errori, pur generalmente accettabili nel rilievo architettonico, sono troppo elevati ai fini dell'analisi morfologica descritta nel capitolo seguente.

È importante sottolineare la necessità che, al fine di evitare ripercussioni sui risultati dello studio diagnostico del monumento, i possibili errori che caratterizzano la nuvola di punti finale e/o il modello digitale da essa ottenuto devono essere mantenuti entro un livello compatibile con il tipo di indagini da eseguire.

Si è pertanto deciso di rielaborare le nuvole di punti utilizzando il software Innovmetrics PolyWorks con l'utilizzo di algoritmi di tipo *surface-to-surface Iterative Closest Point* (ICP), ossia di *surface-matching* iterativo [Bergevin et al., 1996]. Senza entrare nel merito del funzionamento del software, si precisa che l'allineamento avviene mediante: (i) la creazione di un modello digitale 2.5 D per ciascuna delle scansioni da allineare e (ii) l'allineamento mediante la minimizzazione delle differenze tra le caratteristiche geometriche (normali, curvature, ecc) nelle aree comuni delle scansioni (aree di sovrapposizione o *overlapping*). In generale, un allineamento soddisfacente tra due scansioni può ottenersi con una sovrapposizione minima di almeno il 10% [Pesci et al., 2011].

Dal punto di vista operativo, la nuvola di punti acquista dall'intersezione tra le vie Proconsolo e Ghibellina (punto di osservazione in alto a sinistra, cioè in posizione nord-ovest, evidenziato con cerchietto giallo in Figura 2) è stata utilizzata come riferimento poiché rilevata da una posizione ottimale: lo strumento ha operato in condizioni di incidenza quasi normale e dalla distanza di poche decine di metri. Considerata l'altezza della Torre e la breve distanza dello strumento da essa, sono state eseguite due acquisizioni, una della parte bassa e l'altra della parte alta della struttura, s'intende con adeguata area di sovrapposizione. A seguito dell'allineamento di precisione basato sull'algoritmo ICP, la distanza tra le nuvole di punti è divenuta mediamente zero, con scarto quadratico medio (rms) di circa 5 mm, da confrontare con i risultati sopra riportati per l'allineamento per punti omologhi (differenze dell'ordine di ± 0.5 cm, ma con picchi di ± 2 cm). Il miglioramento rispetto al metodo dei punti omologhi è dunque significativo. È stata così ottenuta la nuvola di punti in grado di rappresentare con adeguata precisione i prospetti nord e ovest della Torre, nonché le adiacenti pareti del Palazzo. Tutte le rimanenti nuvole di punti sono state registrate rispetto alla nuvola di punti delle così ottenuta.

Il corretto, o il non corretto, allineamento tra scansioni può essere facilmente evidenziato in modo empirico. Si osservi la fascia di sovrapposizione dopo l'allineamento per punti omologhi (Figura 5a). Essa presenta una coloritura quasi omogenea, tipico sintomo di errore di allineamento dove una scansione è sovrapposta e non integrata all'altra. Successivamente all'allineamento di precisione ICP, la fascia di sovrapposizione è invece caratterizzata da una colorazione a "macchia di leopardo", ad indicare l'avvenuta integrazione tra le scansioni e quindi un corretto allineamento di esse (Figura 5b). Le Figure 6 e 7 presentano i risultati inerenti rispettivamente al prospetto nord della Torre (via Ghibellina) e al prospetto ovest del Palazzo (via Proconsolo).

Le nuvole di punti così allineate sono state quindi unite a dare un'unica nuvola di punti finale, in grado di rappresentare la porzione di struttura osservata, incluso il piano stradale. Come precedentemente accennato, la nuvola di punti finale è georeferenziata.

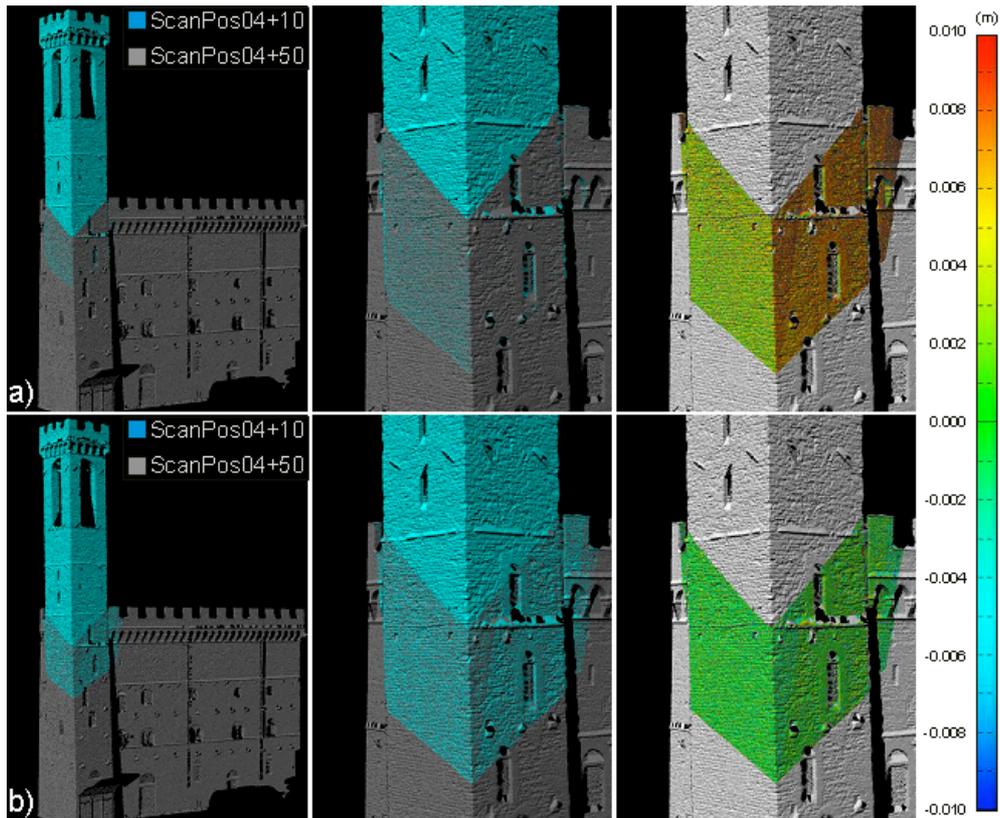


Figura 5. Nuvole di punti acquisite per la ricostruzione dei prospetti della Torre Volognana nella zona di intersezione di via Proconsolo e via Ghibellina. Le scansioni sono mostrate con colorazione grigio e azzurro rispettivamente per la parte bassa e per quella alta dell'area osservata. a) Mappa delle differenze tra le coordinate dei punti appartenenti ai due data set dopo l'allineamento per punti omologhi; b) Mappa delle differenze tra le coordinate dei punti appartenenti ai due data set dopo l'allineamento di precisione.

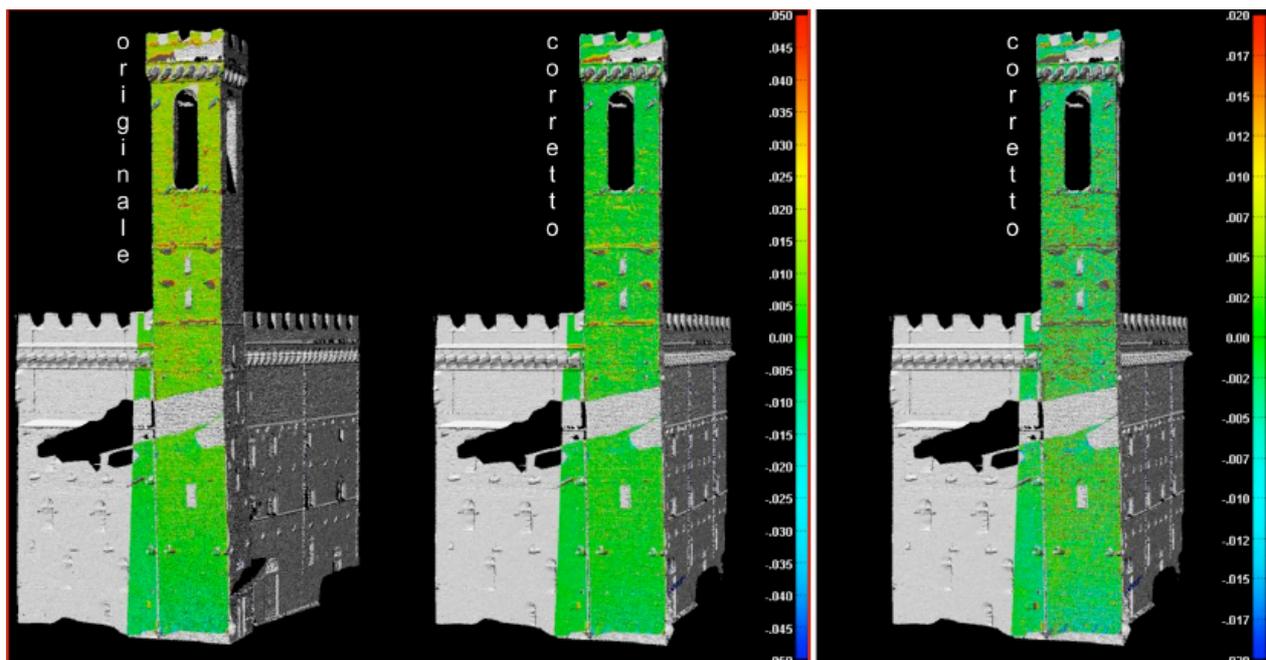


Figura 6. Allineamento delle scansioni del lato nord della Torre Volognana (via Ghibellina).

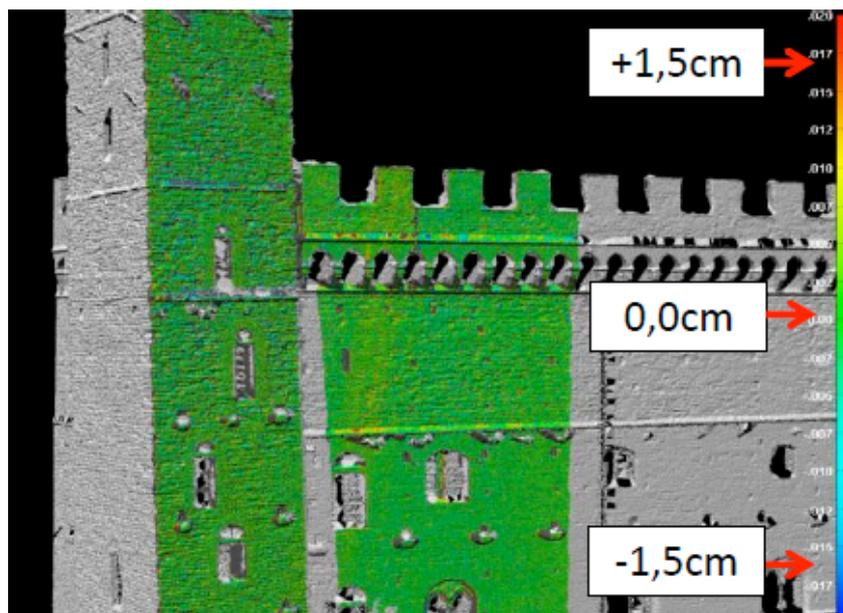


Figura 7. Mappa delle differenze per il prospetto ovest del Palazzo del Bargello (via Proconsolo).

3. Metodologia di indagine

Lo studio delle caratteristiche delle strutture analizzate è basato su approfondite analisi morfologiche. Per ciascun prospetto (o, se necessario, per ciascun particolare architettonico) l'analisi morfologica è basata sulla costruzione della primitiva di riferimento, cioè il piano (in generale, la superficie) approssimante il prospetto ed ottenuto mediante *fit* a piano dei minimi quadrati, e nella successiva generazione di mappe delle distanze punto-piano per evidenziare eventuali deviazioni geometriche da tale primitiva. Una tale analisi consente la valutazione qualitativa e quantitativa delle eventuali anomalie morfologiche (o geometriche) della struttura rispetto alle condizioni attese. Talvolta, mostrando tali anomalie, si parla di deformazione ma è bene precisare che questo termine, riferito ad un'unica serie di misure, è inteso esclusivamente come deviazione dalla regolarità geometrica, in accordo con [Doglioni and Mazzotti, 2007]. Si sottolinea la differenza tra il termine "deformazione" inteso in tale accezione e il termine "deformazione", in effetti usato più propriamente, riferito all'analisi di dati multitemporali. Nel caso di una superficie che si ritiene costruttivamente piana, l'anomalia morfologica (o deformazione, nel senso qui inteso) è la deviazione rispetto alla planarità, da mettersi in relazione con lo stato strutturale e con le vicissitudini storiche della struttura. A meno di deliberata azione progettuale o costruttiva durante la realizzazione del manufatto, le deviazioni dalla planarità esprimono o la presenza di uno stato tensionale tale da condizionare la forma della superficie (ad esempio, un carico non adeguatamente equilibrato), o il fatto che lavori edilizi o anche eventi come incendi o terremoti hanno inciso sulla sua forma. In ogni caso, i risultati che si ottengono richiedono sempre un'adeguata interpretazione.

Se, in luogo del piano di *fit*, si utilizza un piano verticale, è possibile valutare deviazioni e inclinazioni rispetto alla verticale; in tal caso, tuttavia, si tende a perdere l'informazione sulle anomalie geometriche a livello locale perché mascherata dalle prime. Le Figure 8 e 9 evidenziano le differenze tra il tipo di informazione che è possibile ottenere nei due casi. Poiché la Torre è significativamente inclinata (pendenza media circa 0.7°), solo l'analisi morfologica fornisce un dettaglio della distribuzione dei punti sul prospetto.

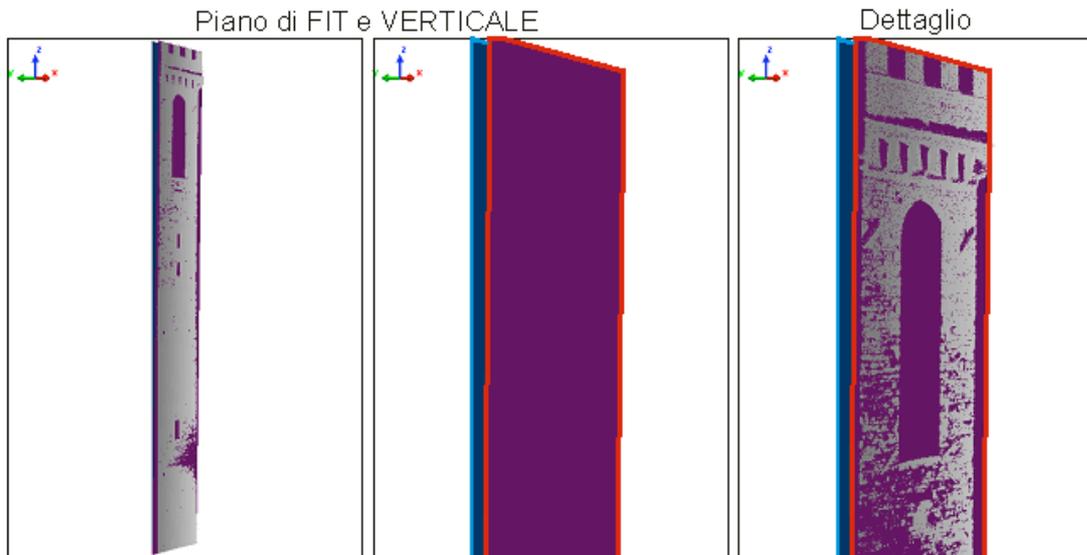


Figura 8. Prospetto N della Torre Volognana: nuvola di punti e piani di riferimento, ossia verticale (blu) e di *fit* (viola).

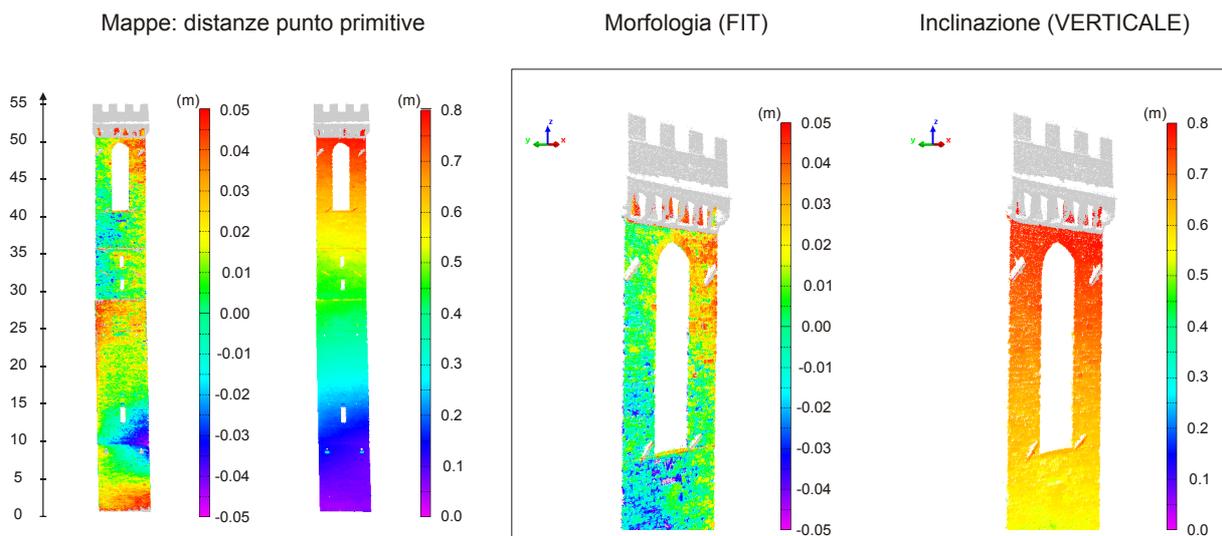


Figura 9. Risultati dell'analisi rispetto al piano verticale ed al piano di *fit*. La corretta conformazione del prospetto si evidenzia utilizzando il piano di *fit* per calcolare la mappa delle differenze punto-piano, mentre le differenze rispetto al piano verticale forniscono informazioni solo sull'inclinazione.

4. Torre Volognana

4.1 Analisi morfologica

L'analisi morfologica della Torre ha fornito importanti informazioni che difficilmente sarebbero state ottenute con altre tecniche di analisi. Inizialmente è stato utilizzato un unico piano interpolatore di tutti i punti costituenti il prospetto, in modo da ottenere un quadro complessivo delle deviazioni rispetto alla condizione ideale (cioè prospetto piano).

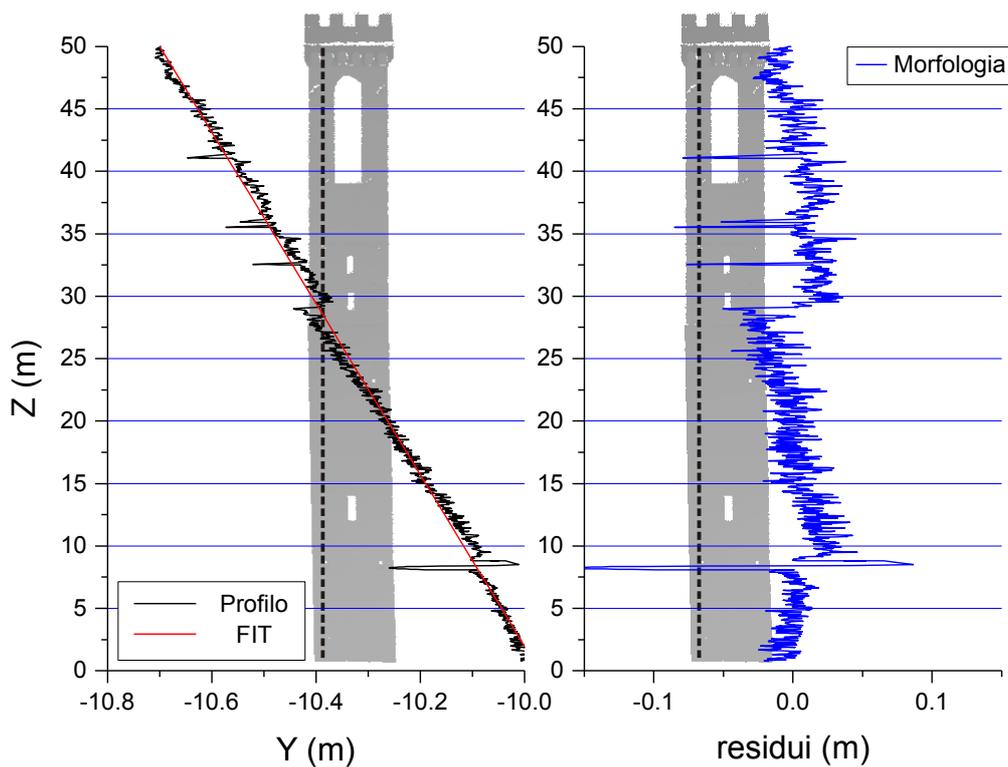


Figura 10. Profilo verticale della torre e corrispondente differenza dei punti dal piano interpolatore, in questo caso visto come una retta.

La Figura 10 mostra i risultati ottenuti per un profilo verticale della Torre, per il quale si è individuata la distanza (curva in blu, indicata come “residui” in figura) tra il piano di *fit* (rosso) ed i punti rilevati (nero). È interessante tentare di correlare il risultato così ottenuto con le fasi costruttive della Torre individuate tramite indagine storica e presentate in [Giorgi and Matracchi, 2004]. Tali fasi costruttive possono essere studiate anche con un’approfondita visione in loco dei materiali utilizzati e delle caratteristiche geometriche della struttura; tuttavia, ciò richiede, oltre al contatto diretto con la superficie indagata, un importante lavoro di interpretazione. Le indagini basate su dati TLS non richiedono invece il contatto diretto con la superficie indagata e comunque forniscono dati geometrici facilmente interpretabili.

Il fatto che, come indicato nel Capitolo 2, la Torre sia stata osservata in condizioni non eccessivamente lontane da quelle ottimali rende trascurabile, ai fini dell’analisi morfologica, la distorsione indotta dall’incidenza non normale della parte più alta della nuvola di punti che la rappresenta. Ciò vale anche per il Palazzo che, a fronte di condizioni di osservazione in alcuni casi più difficili per via delle vie strette, è comunque molto più basso della Torre.

I risultati sono stati, per certi versi, sorprendentemente coincidenti, come evidenziato nelle Figure 11 e 12. Le ultime due (3 e 4) delle quattro fasi costruttive discusse in [Giorgi and Matracchi, 2004] riguardano rispettivamente la cella campanaria originaria e la successiva sopraelevazione.

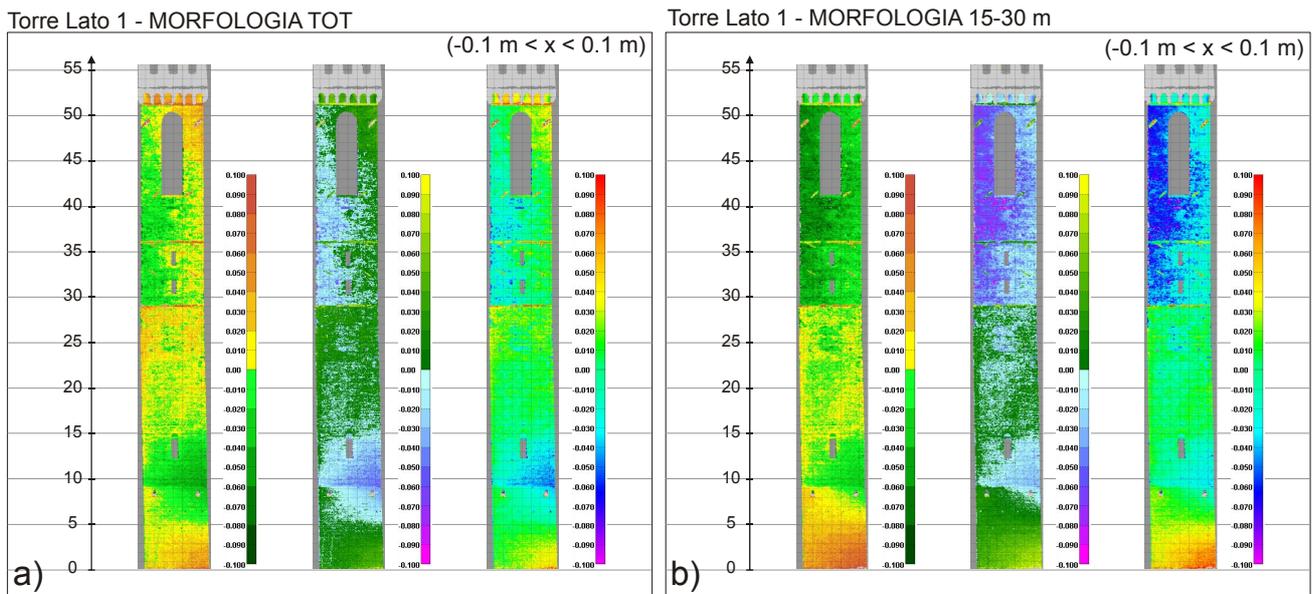


Figura 11. Le mappe delle differenze ottenute rispetto al piano di *fit* totale e a piani di *fit* relativi solo di alcune quote (nel caso in figura 15-30 m). Le mappe sono mostrate con scale di colori diverse che accentuano, caso per caso, l'individuazione di particolari morfologici.

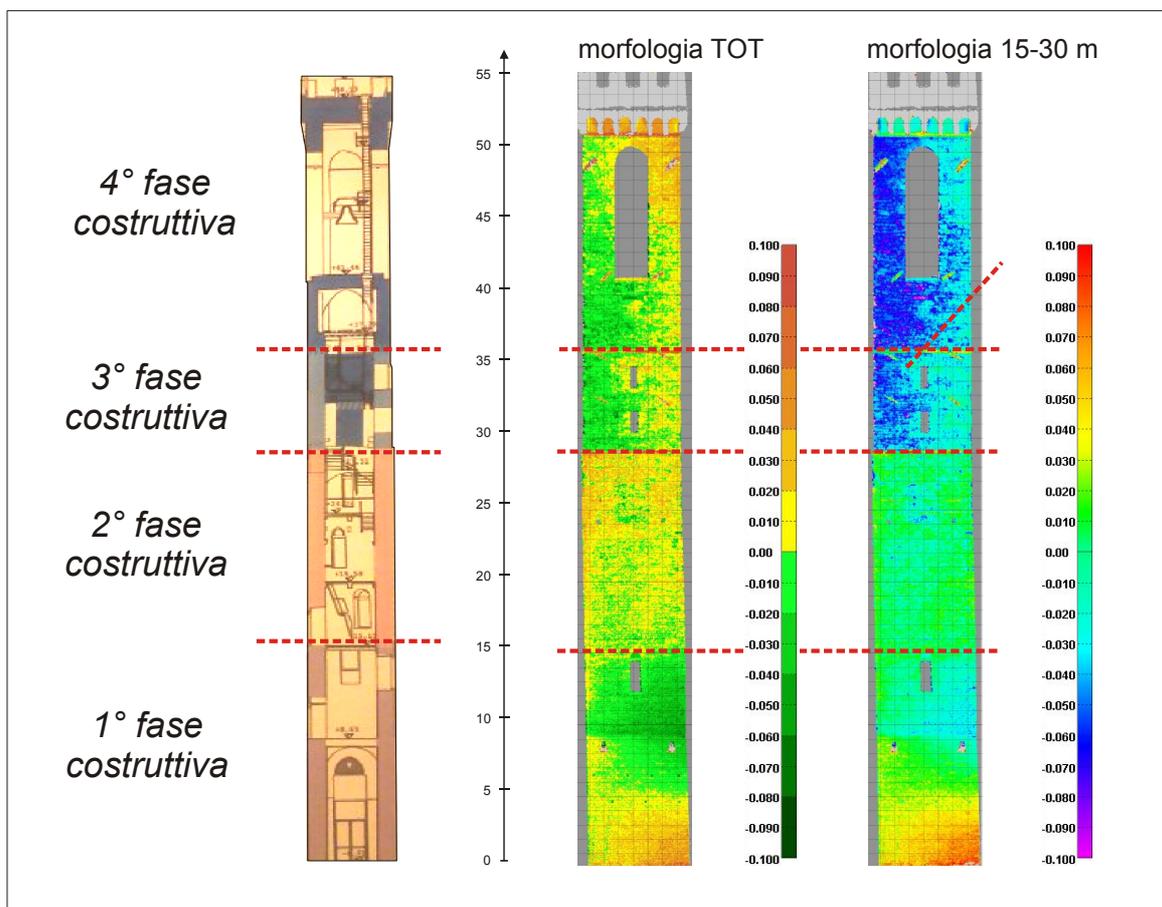


Figura 12. Le fasi costruttive della Torre Volognana: studio storico e dati dall'analisi morfologica, con enfasi sul passaggio tra la fasi 1° e 2° e tra le fasi 3° e 4°.

È facile riconoscere nei risultati dell'analisi morfologica da dati TLS la suddivisione tra la fase 1 e la fase 2 e tra la fase 2 e la fase 3. La fase 1 sembra caratterizzata anche da un'ulteriore suddivisione probabilmente dovuta ad un consolidamento ottocentesco con scarpe (si veda la zona in rosso nella parte bassa del prospetto). Nel confronto tra la fase 1 e la fase 2, si nota la tendenza di quest'ultima ad uscire dal piano di riferimento; ciò può essere messo in relazione alle problematiche di fuori piombo apparse durante la costruzione prima della messa in opera della cella campanaria e descritte da alcuni studi storici. Un'ulteriore difformità si nota tra la fase 2 e la fase 3, con quest'ultima soggetta ad una chiara tendenza rotatoria torsionale. Non è invece del tutto visibile un distacco tra la fase 3 e la fase 4, anche se un occhio attento può osservare un lieve aumento della rotazione (si noti la linea obliqua in figura 12). L'omogeneità del comportamento delle fasi 3 e 4 può comunque essere indizio di buon ammorsamento (cioè saldatura) tra le celle.

I risultati evidenziano che la tecnica TLS può fornire interessanti informazioni anche ai fini di indagini storiche sugli edifici, da incrociare con le informazioni ricavate dai documenti storici, tenendo ovviamente conto dello stato di fatto.

4.2 Quantificazione della deviazione dalla verticale

L'analisi morfologica ha carattere relativo. Un quadro completo della condizione di una struttura richiede dunque anche il calcolo delle deviazioni rispetto alla verticale. In particolare, le differenze tra i punti che giacciono su un prospetto ed il piano verticale permettono di osservare le grandi deviazioni della Torre, principalmente dovute alla accentuata inclinazione. Data la complessa morfologia del prospetto su via Ghibellina (lato nord della Torre), al fine di facilitare la lettura dei risultati lo studio è stato attuato mediante l'estrazione di punti su profili verticali, successivamente analizzati con il software Microcal Origin al fine di valutare il fuori piombo rispetto alla verticale. Con riferimento alla Figura 13, sono stati introdotti due piani verticali, da cui i corrispondenti profili (in rosso e nero, denominati sezione 2 e sezione 1 rispettivamente). I punti di tali profili sono considerati come rappresentativi della geometria del prospetto. I risultati mostrano che gli andamenti delle pendenze dei delle due sezioni sono molto simili, salvo lievi differenze, localizzate soprattutto alla base, presumibilmente dovute a rimaneggiamenti quali ad esempio scarpe ottocentesche. In particolare, sono state riconosciute tre diverse tendenze lineari di pendenza, comuni tra le sezioni stesse, denominate zona A, B e C.

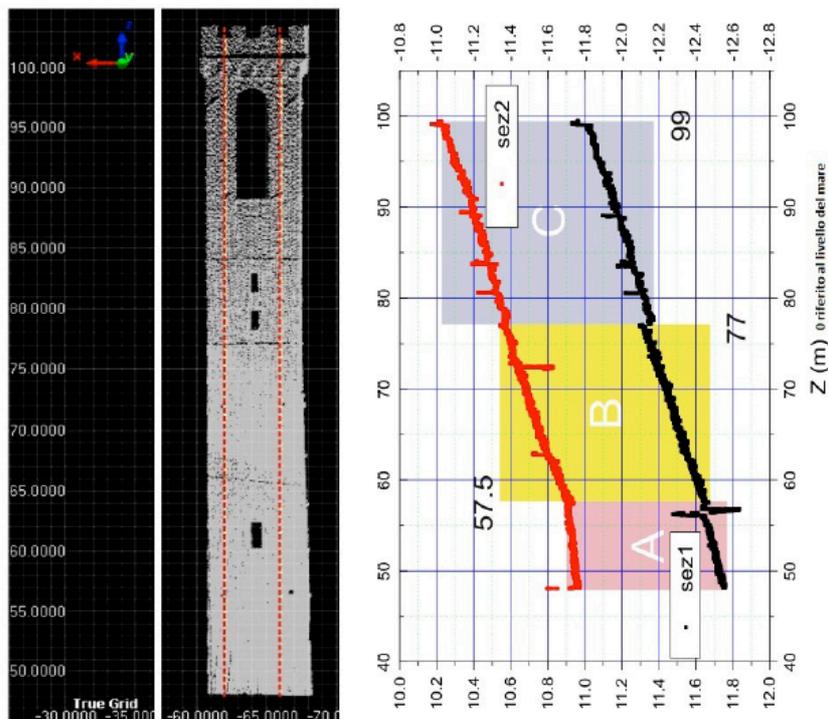


Figura 13. Profili verticali estratti dal prospetto N (su via Ghibellina) della Torre Volognana. La quota a lato della torre è riferita al livello del mare.

Il fuori piano è inteso verso Via Ghibellina. Il fuori piombo riscontrato è notevole: a fronte di un'altezza di circa 55 m e di un lato di base di 7.35 m, esso si aggira sui 0.7 m, da cui la già citata pendenza media pari a $\sim 0.7^\circ$. I risultati mostrano come, laddove la quantificazione dei fuori piombo di una struttura sia essenziale ai fini di una corretta valutazione della vulnerabilità strutturale (come nel caso di un edificio caratterizzato da un rilevante sviluppo in altezza), l'analisi dei dati da TLS possa fornire dati di grande rilevanza.

5. Indagini sulle murature perimetrali del Salone di Donatello

L'analisi morfologica è stata eseguita sulle murature sottostanti gli archi *formeret* delle volte (ossia gli archi laterali che si svolgono lungo le pareti e che servono a delimitare e rafforzare longitudinalmente le corrispondenti parti delle volte a crociera), concentrandosi sull'individuazione di eventuali scostamenti geometrici significativi rispetto alla regolarità.

In particolare, le analisi qui descritte si riferiscono sia alle pareti interne prospicienti via del Proconsolo (interni 1 e 2, Figure 14 e 15), sia quelle prospicienti il cortile all'interno del Palazzo (interni 3 e 4). Successivamente, su queste ultime, sono stati indagati anche i paramenti esterni, considerando le scansioni acquisite dal cortile. Si è rilevato uno stato di fatto altamente rimaneggiato, particolarmente evidente nella parte alta di tutte le murature analizzate. Sono state registrate differenze tra +6 cm e -4 cm rispetto ai piani interpolanti.

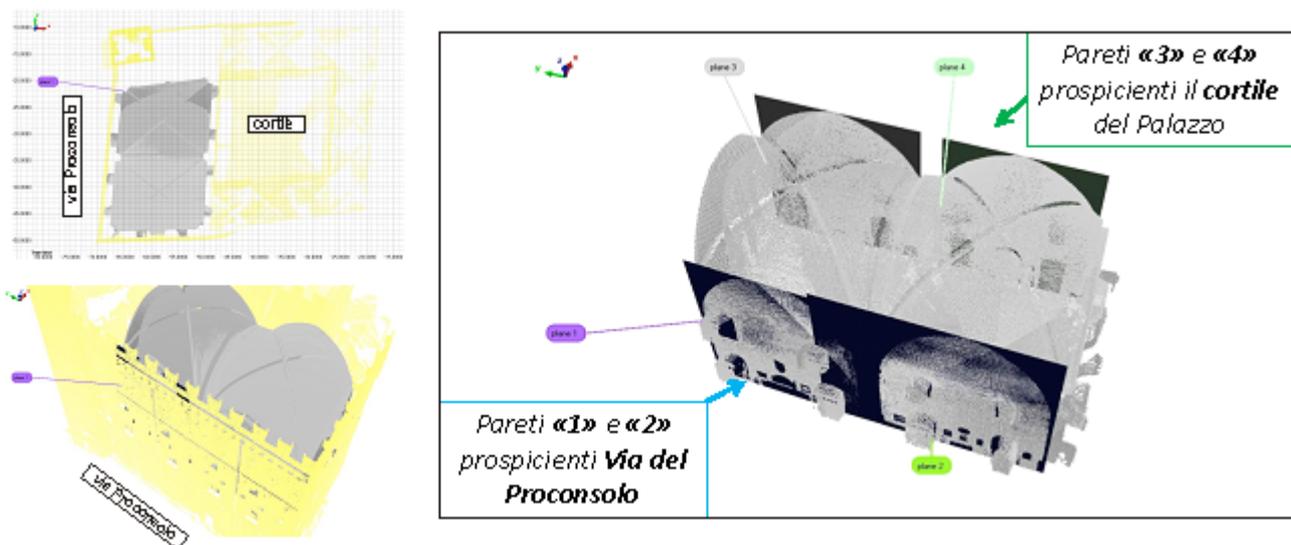


Figura 14. Disposizione delle pareti perimetrali e delle volte del Salone di Donatello.

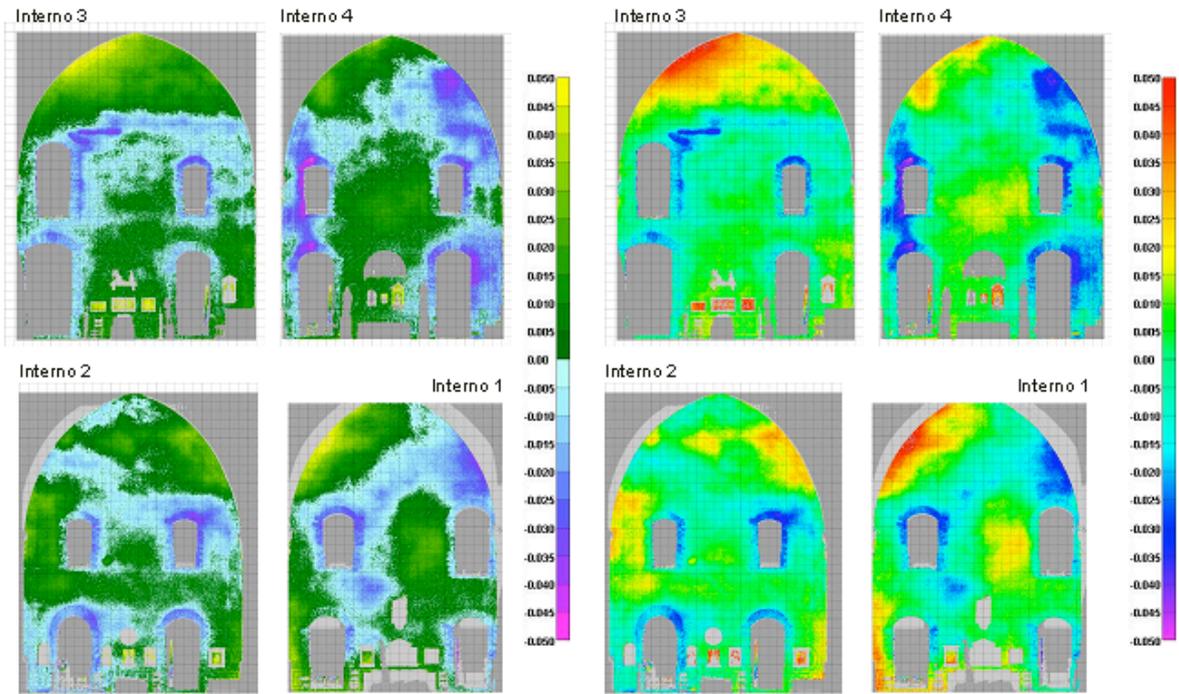


Figura 15. Analisi morfologica delle pareti del Palazzo del Bargello.

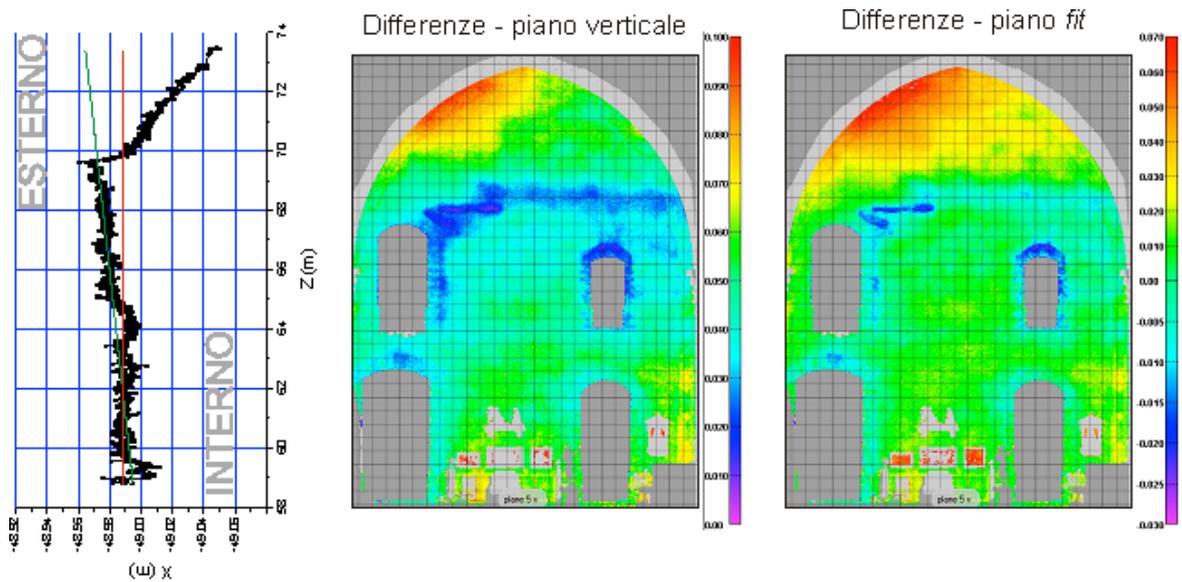


Figura 16. Parete 3 del Salone di Donatello: analisi morfologica e deviazioni rispetto al piano verticale.

Una corretta interpretazione dei risultati dell'analisi morfologica richiede anche il confronto con lo studio delle variazioni rispetto al piano verticale. A titolo esemplificativo, è stata indagata dettagliatamente la parete 3 del Salone di Donatello (Figura 16). Le mappe mostrano un buon accordo sulla distribuzione delle differenze punto-piano nello spazio. Infatti il prospetto, salvo la zona apicale, è sostanzialmente verticale. In ogni caso, l'uso del piano di *fit* quale primitiva di riferimento permette di ottenere un maggior dettaglio. Se si focalizza l'attenzione su un profilo verticale della parete, si osserva un'evidente inclinazione verso l'interno del Salone nella parte alta della muratura (Figura 17). Il fatto che la parete sia caratterizzata da una piccola inclinazione verso l'esterno, con un fuori piombo di circa 3 cm, è il motivo della presenza di maggiori dettagli nella mappa morfologica rispetto a quanto ottenuto rispetto al piano verticale. Infatti, laddove sia presente un sistematismo circoscritto ad una zona di dimensioni contenute rispetto a quelle dell'area in esame, le anomalie locali vengono enfatizzate dal tipo di analisi.

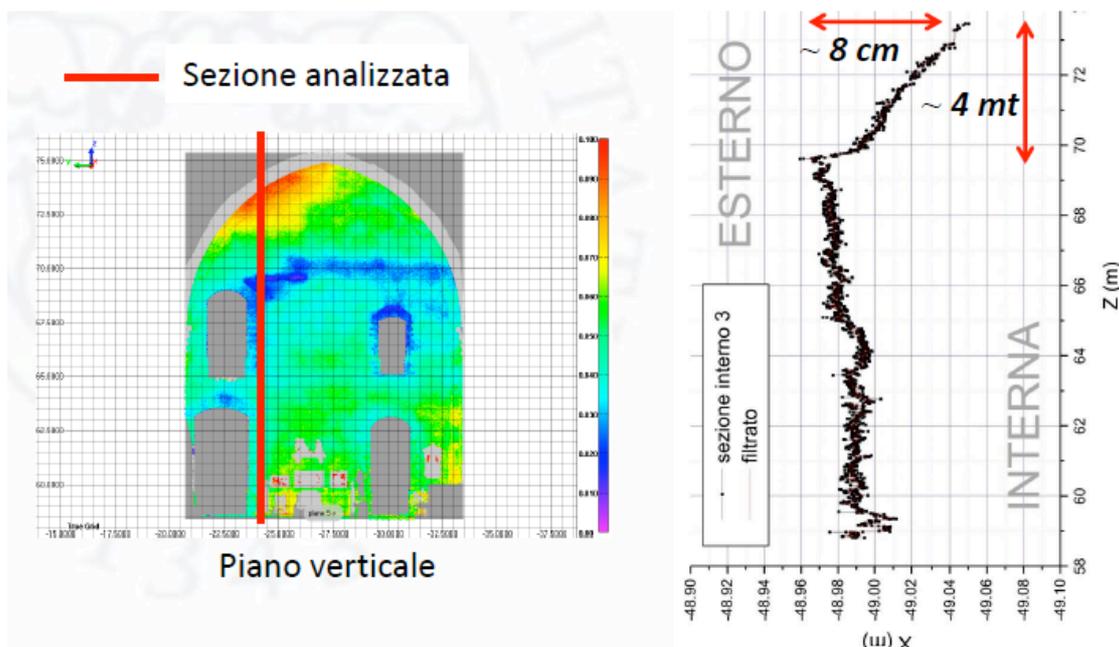


Figura 17. Analisi dell'inclinazione di un profilo verticale della parete 3.

Infine, l'analisi morfologica del paramento esterno ha confermato un'anomalia, cioè un'area caratterizzata da differenze particolarmente elevate rispetto al piano di fit (8-10 cm invece di 2-4 cm), estesa all'intera parte alta della muratura (Figura 18). È interessante notare come il limite inferiore dell'area che appare essere morfologicamente anomala corrisponda alla quota della fascia di coloritura scura presente sulla parete esterna del cortile, che la documentazione storica indica come quota dell'edificio all'epoca dell'incendio del 1332. È pertanto plausibile che la difformità riscontrata sia dovuta a sopraelevazioni eseguite dopo tale evento distruttivo. Questo risultato potrebbe fornire ulteriori spunti a storici e studiosi per un approfondimento sulla ricerca delle fasi di costruzione del Palazzo.

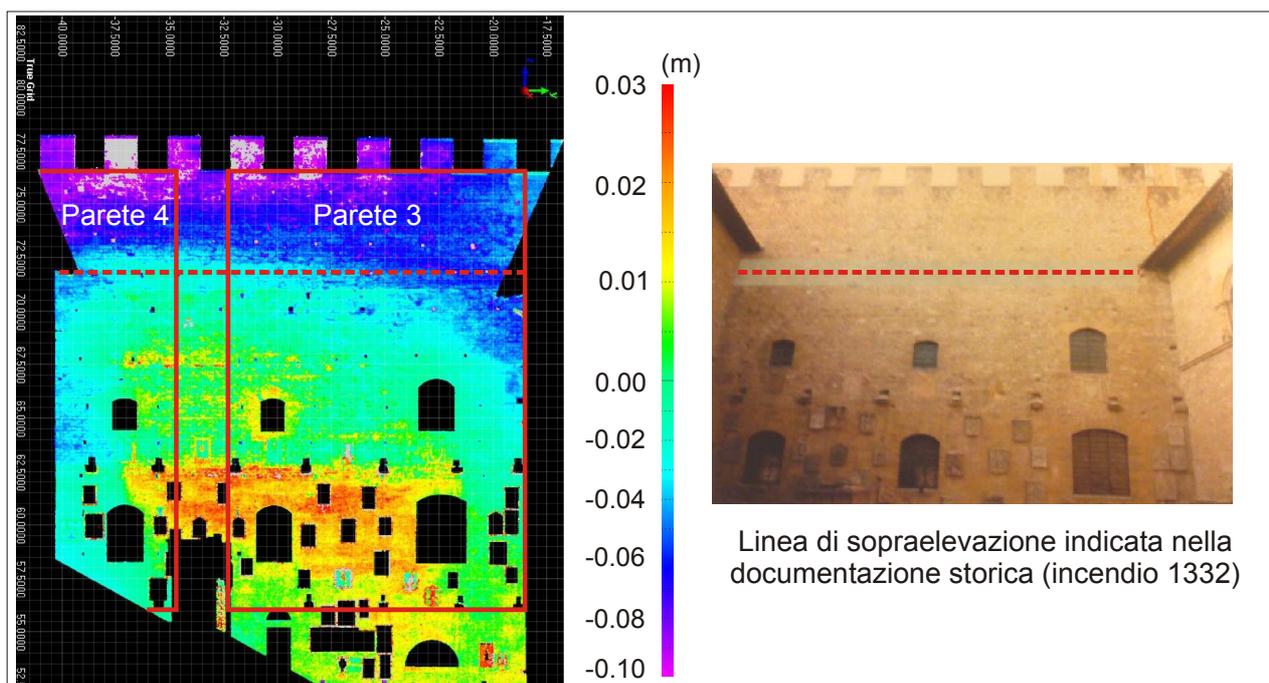


Figura 18. Analisi morfologica del paramento esterno del Salone di Donatello.

6. Indagini sulle volte del Salone di Donatello

Lo studio morfologico è stato esteso alle volte a crociera del Salone di Donatello al fine di evidenziare eventuali anomalie. Data la complessità delle superfici indagate, si è proceduto al calcolo delle differenze tra la nuvola di punti ed un piano orizzontale, analizzando la morfologia a vari livelli di dettaglio (Figura 19a). L'analisi non ha evidenziato particolari anomalie salvo la presenza, su un'unghia della volta ("unghia nord"), di uno scostamento dal profilo geometrico ideale nell'ordine dei 10 cm (Figura 19b).

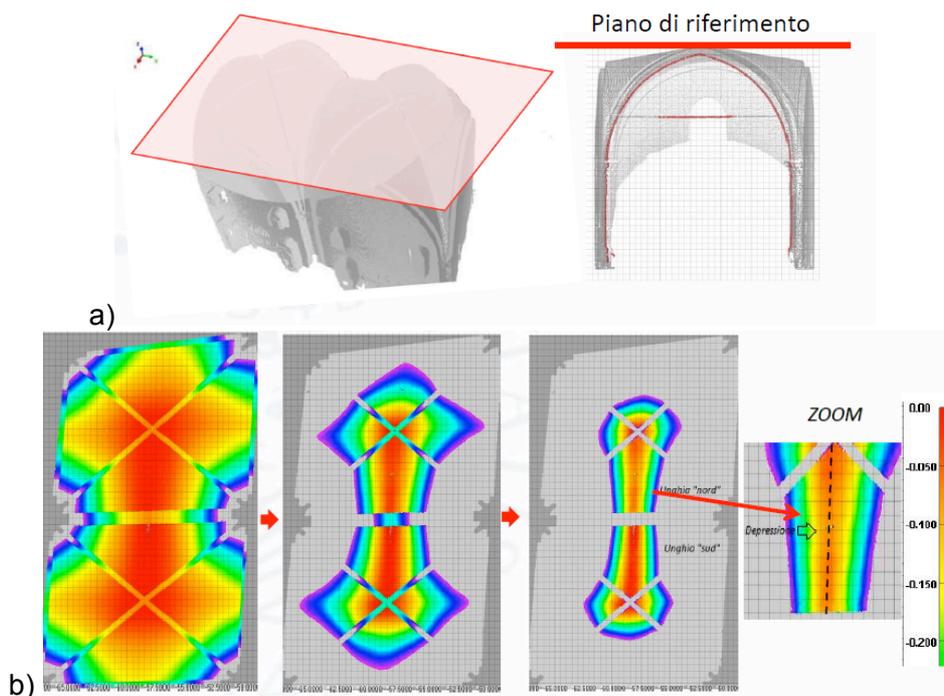


Figura 19. a) Piano di riferimento orizzontale creato per l'analisi delle volte; b) Mappa delle differenze punto-piano a vari livelli di dettaglio, in cui è evidenziato la morfologia dell'unghia "nord".

La precisione del rilievo ha permesso inoltre la ricerca di eventuali segnali di cedimento dei pilastri portanti delle volte per effetto della spinta delle stesse. Il metodo utilizzato è basato sull'intersezione con piani verticali degli archi perimetrali e trasversali delle volte e nella valutazione dello spostamento relativo dei punti corrispondenti alle sezioni così individuate (Figure 20 e 21). Si precisa che, in accordo con [Doglioni and Mazzotti, 2007], per "spostamento relativo" si intende la differenza osservata tra punti corrispondenti di analoghi particolari architettonici, verosimilmente indicativo di differenti condizioni di carico (attuali o passate), diverso materiale o di diversa storia evolutiva, senza che ciò indichi necessariamente presenza di spostamenti in corso.

A titolo di esempio si presentano qui i risultati dell'indagine eseguita sul pilastro ovest, rappresentato in rosso in Figura 20. L'analisi degli spostamenti relativi, attuata mediante valutazione della somma vettoriale delle direzioni di spostamento relativo, ha fornito una stima dell'intensità e della direzione del cedimento laterale del pilastro (δ), quantificato in circa 4 cm in direzione sud-ovest (Figura 21).

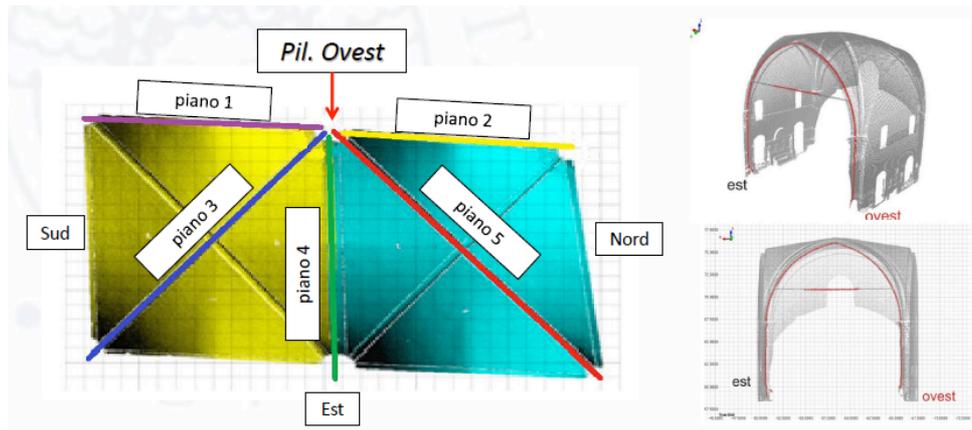


Figura 20. Salone di Donatello: schema e descrizione geometrica, e individuazione dei piani utilizzati per studiare l'assetto del pilastro (colonna) ovest.

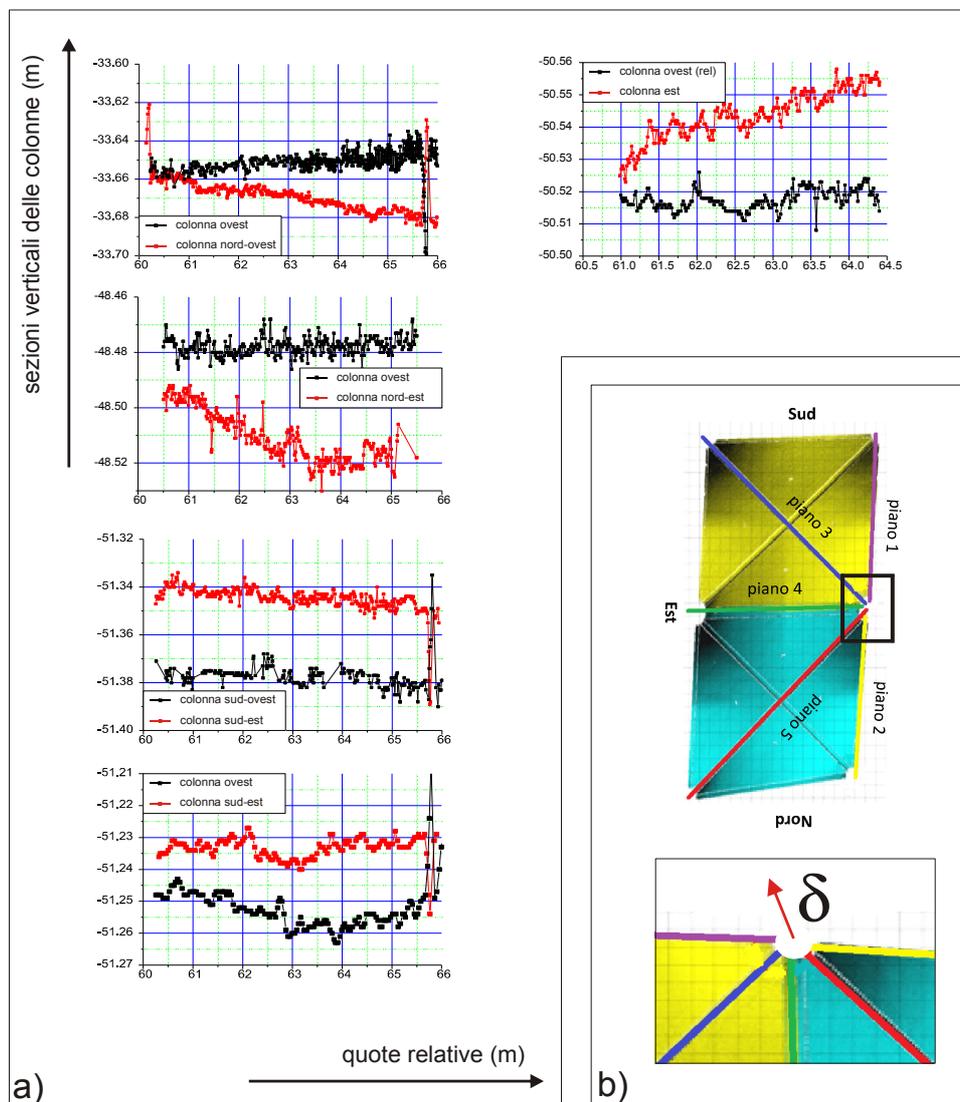


Figura 21. Valutazione del cedimento laterale del pilastro ovest del Salone di Donatello: a) sezioni verticali dei pilastri (colonne) con i 5 piani evidenziati in Figura 19, nell'ordine (da sinistra a destra) piano 1 (pilastri O e SO), 2 (pilastri O e NO), 3 (pilastri O e SE), 4 (pilastri O ed E), 5 (pilastri O ed NE). Le serie di punti del pilastro O sono in rosso. Si notino le diverse pendenze, che indicano una posizione relativa non regolare; b) stima della direzione e dell'entità del cedimento calcolata dalla somma vettoriale delle direzioni di spostamento relativo.

Il meccanismo che sembra interessare il pilastro ovest potrebbe essere spiegato in base alla differenza geometrica delle due volte considerate. L'arco diagonale passante per i pilastri ovest e nord-est risulta essere, a parità di altezza in chiave, quello di maggior luce; per tale motivo, tra gli archi diagonali ed a parità di peso gravante, si trova ad essere quello maggiormente ribassato e dunque, probabilmente, quello che esercita la spinta maggiore.

I risultati ottenuti mostrano come la metodologia proposta possa fornire informazioni utili per la comprensione dei meccanismi cinematici che interessano archi e volte e dunque ai fini dell'analisi strutturale dell'edificio studiato. La quantificazione degli spostamenti relativi di pilastri e colonne potrebbe consentire il riconoscimento di eventuali condizioni di criticità che possono interessare archi e volte presenti in strutture la cui importanza socio-culturale giustifica di per sé l'esecuzione di indagini strutturali adeguate.

7. Discussione e conclusioni

Il lavoro qui presentato è dedicato alla caratterizzazione geometrica, attuata mediante analisi morfologica a partire da dati telerilevati con TLS, del Palazzo del Bargello e della Torre Volognana in Firenze per fini sia di analisi strutturale, sia di documentazione storica. Esso si inquadra pertanto in una linea di ricerca in cui il telerilevamento terrestre è impiegato per scopi di tutela del patrimonio culturale italiano, con enfasi sia sugli aspetti metodologici, sia su quelli strettamente applicativi.

Un primo risultato importante riguarda la scarsa precisione dell'allineamento delle nuvole di punti mediante punti omologhi in quei casi, come quello qui trattato, in cui vi sono vincoli molto stringenti riguardo alle possibili posizioni dei target artificiali nello scenario, e ciò nonostante l'efficiente processo di modellazione automatica dei target stessi attuabile col software Riegl RiSCAN PRO. In casi come questo, il ricorso ad algoritmi di *surface matching* iterativo deve dunque considerarsi come ineludibile.

L'analisi morfologica dei prospetti della Torre Volognana ha permesso di evidenziare le corrispondenti fasi costruttive, alla luce della documentazione storica disponibile, nonché di quantificare il disallineamento rispetto alla verticale.

Per quanto riguarda il Palazzo del Bargello, l'analisi morfologica delle murature sotto gli archi *formeret* delle strutture perimetrali del Salone di Donatello ha mostrato significative deviazioni rispetto ai piani di riferimento, tra cui un'anomalia, nella porzione alta, dovuta probabilmente alla sopraelevazione dell'edificio a seguito dell'incendio occorso nel XIV secolo. Lo studio delle volte nel Salone di Donatello non ha evidenziato significative anomalie geometriche salvo uno scostamento dal profilo geometrico ideale su un'unghia, peraltro difficilmente individuabile con altre strumentazioni di rilevazione. Inoltre, la valutazione degli spostamenti relativi dei pilastri su cui poggiano le stesse volte ha mostrato possibili effetti legati a spinte differenziali.

I risultati ottenuti hanno evidenziato la validità dell'analisi morfologica finalizzata all'acquisizione e all'interpretazione di informazioni utili a delineare il quadro deformativo dell'edificio indagato, direttamente utilizzabili in un'analisi strutturale particolareggiata dell'edificio stesso. Ciò perché eventuali scostamenti significativi rispetto alla regolarità (ossia rispetto alla forma teorica nel caso di un prospetto, oppure rispetto alla forma di analoghi elementi strutturali come nel caso di pilastri, archi e volte) possono essere indicativi di condizioni di non completo equilibrio oppure di differenze significative riguardo ai materiali o alle tecniche di costruzione. In prospettiva, i risultati dell'analisi morfologica possono essere utilizzati per fornire condizioni adeguate ai fini della modellazione strutturale agli elementi finiti.

Il confronto tra i risultati ottenuti e quanto riportato dalla documentazione storica inerente alla Torre Volognana e al Palazzo del Bargello, in particolare i dati riguardanti le diverse fasi costruttive delle strutture esaminate, ha permesso la validazione, a tali fini, dell'analisi morfologica. Ne consegue che l'analisi in questione può essere proposta, in altri contesti in cui i documenti disponibili hanno minore qualità, come interessante e affidabile strumento per studi storico-architettonici, potendo essa evidenziare tracce di sospensione e ripresa dei lavori di costruzione, di ampliamento, ristrutturazione o anche ricostruzione a seguito di calamità, incendi o conflitti, tutte informazioni utili per convalidare, oppure non convalidare, quanto affermato da fonti storiche al momento non adeguatamente controllate.

Le analisi qui presentate sono basate su dati ottenuti mediante TLS, tecnica caratterizzata da costi tipici relativamente elevati ancorché attualmente in diminuzione. Si sottolinea comunque come alcune ricerche abbiano evidenziato che recenti sviluppi della fotogrammetria digitale, in particolare la fotogrammetria *Structure from Motion* (SfM), rendono possibile la generazione di nuvole di punti fotorealistiche caratterizzate da precisione adeguata ai fini dell'attuazione dell'analisi morfologica [Teza et

al., 2015; Pesci et al., 2015]. Tutto ciò porta a ritenere che un tale tipo di analisi possa essere applicato in modo sistematico, e con costi sostanzialmente ragionevoli, al patrimonio architettonico italiano al fine di costruire una banca dati sui principali edifici storici per fornire dati di riferimento per rilievi futuri, consentire la valutazione danni e ipotesi di ricostruzione in caso di eventi eccezionali e, *last but not least*, offrire dati utili per l'eventuale generazione di modelli digitali che potrebbero anche essere resi disponibili *online*. Deve essere tuttavia ricordato che, mentre il risultato di un rilievo TLS è un set di coordinate direttamente misurate dallo strumento durante la sessione di scansione e quindi consiste in un insieme di coordinate in un sistema metrico, ciò non si può dire per i dati ottenuti da SfM che necessitano di un rilievo di appoggio per trasformare le coordinate 2D dei dati immagine fotografica in coordinate 3D. Al tempo della realizzazione di questo lavoro non era nella possibilità degli autori eseguire una campagna di tipo fotogrammetrico che, salvo imprevisti, sarà in parte realizzata nella primavera 2016.

In conclusione, quale che sia la particolare tecnica di telerilevamento utilizzata (TLS come nel caso delle descritte ricerche su Torre Volognana e Palazzo del Bargello, SfM o anche integrazione tra TLS e SfM), l'analisi morfologica si è dimostrata essere in grado di fornire informazioni utili sia ai fini dell'analisi strutturale, sia ai fini documentali e di analisi storica.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano tutti i componenti della Ditta C.S.M. s.n.c., e in particolare il Geom. Andrea Frateschi, il Geom. Maurizio Frateschi e l'Ing. Gianluca Frateschi, per l'esecuzione dei rilievi con laser a scansione, stazione totale e GPS. Inoltre, ringraziano il personale del Polo Museale di Firenze, nello specifico l'Ing. Michele Antonio Grimaudo e l'Arch. Maria Cristina Valenti, nonché il personale del Museo Nazionale del Bargello, in particolare la Direttrice Dott.ssa Beatrice Paolozzi Strozzi ed il responsabile Vincenzo De Magistris, per l'autorizzazione ad eseguire le misure e per l'assistenza gentilmente fornita e l'intero personale del museo, che hanno permesso di effettuare il rilievo a fianco di opere d'arte di inestimabile valore.

Infine, un ringraziamento speciale alla Professoressa Maria Luisa Beconcini che ha reso possibile la realizzazione dell'intero lavoro nell'ambito di uno studio specifico e innovativo sull'utilizzo dei sistemi TLS per scopi di conservazione e restauro nell'ambito dei beni culturali.

Bibliografia

- Bergevin R., Souci M., Gagnon H. and Laurendeau D., (1996). *Towards a general multi-view registration technique*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 18 (5), 540-547.
- Catbas F.N., Brown D.L. and Aktan, A.E., (2006). *Use of modal flexibility for damage detection and condition assessment: case studies and demonstrations on large structures*. Journal of Structural Engineering, 132 (11), 1699-1712.
- De Luca L., Busarayay C., Stefani C., Véron P. and Florenzano M., (2011). *A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage*. Computer Graphics, 35(2), 227-241.
- Dogliani F. and Mazzotti P., (2007). *Codice di pratica per gli interventi di miglioramento sismico nel restauro del patrimonio architettonico. Integrazioni alla luce delle esperienze della Regione Marche*. Regione Marche, Ancona.
- Giorgi L. and Matracchi P., (2004). *Il Bargello di Firenze. Nuove indagini sulla costruzione del palazzo*. In: La storia del Bargello. 100 capolavori da scoprire (B. Paolozzi Strozzi, ed.), pp. 95-113, Silvana Editoriale, Cinisello Balsamo (Milano).
- Pesci A., Teza G., Ninfo A., Ferrulli C. and Bonali E., (2015). *Telerilevamento speditivo mediante laser scanning e moderne tecniche di fotogrammetria digitale*. Rapporti Tecnici INGV, n. 319, 21 pp.
- Pesci A., Teza G. Bonali E., Casula G. and Boschi E., (2013). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79, 185-198.
- Pesci A., Casula G. and Boschi E., (2011). *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.
- Sgrenzaroli M. and Vassena, G.P., (2007). *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*. Starrylink Editrice, Brescia.

- Teza G., Pesci A., and Ninfo A., (2015). *Morphological analysis for architectural applications: comparison between laser scanning and Structure-from-Motion photogrammetry*. Journal of Survey Engineering, in press, doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000172.
- Teza G. and Pesci, A., (2013). *Geometric characterization of a cylinder-shaped structure from laser scanner data: development of an analysis tool and its use on a leaning bell tower*. Journal of Cultural Heritage, 14(5), 411-423.

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2016 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