

## **La lettura diagnostica della banca dati 3D del vestibolo della basilica di Santa Maria dell'Umiltà di Pistoia**

Alessia Nobile

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

### **Riassunto**

La ricerca, avviata nel 2008 al fine di definire una banca dati 3D a supporto del progetto di consolidamento e restauro della Basilica, è stata condotta con tecniche di rilievo consolidate, come la topografia, e tecniche più innovative come i sistemi a scansione tridimensionale.

Lo studio condotto in *situ*, per quanto indispensabile alla conoscenza primaria della fabbrica, è risultato insufficiente alla piena comprensibilità della struttura reale, sia per l'intrinseca complessità architettonica che per le sue grandi dimensioni.

E' proprio in casi come questo che la banca dati si rivela utile: il modello 3D, visualizzabile da punti di vista inconsueti, generalmente impossibili nella realtà, sempre interrogabile e sezionabile con un infinito numero di piani a seconda delle analisi necessarie, permette una migliore percezione dello spazio complessivo sopprimendo ai limiti fisici e agli impedimenti visivi presenti nel mondo reale.

Il presente contributo, sviluppato in occasione della tesi di Dottorato dell'autrice (Nobile A., 2013), si pone come obiettivo la razionalizzazione e la semplificazione delle procedure d'indagine a partire dal dato laser, al fine di creare nuove rappresentazioni info-grafiche facilmente adattabili alle molteplici esigenze degli studiosi e degli operatori (architetti, archeologi, ingegneri, restauratori, storici).

Nello specifico, è stata approfondita la conoscenza del vestibolo della fabbrica attraverso la quantificazione e il posizionamento degli elementi strutturali, l'indagine delle testimonianze di fessurazione e deformazione del cupolino e delle volte a botte, l'analisi e il calcolo dei fuori piombo delle pareti perimetrali.

### **Abstract**

The research, started in 2008 in view of the restoration and consolidation of the Basilica, has called for the integration of different measurement techniques (topographic and satellite systems, 3D scanning systems and digital photogrammetry).

The *in situ* study, is not always enough to the structure's full knowledge. In such cases, really, the 3D database is very useful: the point model, which can be viewed by unusual points of view (generally impossible in reality) and which can be queried and sectioned at any time by an infinite plans' number, it allows a better perception of the total space by compensating for the physical and visual limits of the real world.

This paper is developed during the author's PhD thesis (Nobile A., 2013).

The goal is to simplify the investigation's procedures, starting by laser scanner data, in order to create info-graphics representations to easily fit different needs of operators (architects, archaeologists, engineers, restorers, historians).

Specifically, it was possible to deepen the knowledge of the vestibule showing the out of plumb of the outer cladding and the misalignment of the vaults' coffers.

### **Quadro storico**

La basilica di Santa Maria dell'Umiltà è la più importante testimonianza rinascimentale dell'architettura monumentale pistoiese e la sua immagine si identifica con la maestosa cupola vasariana come si evince dalla sue rappresentazioni nel corso dei secoli.

L'ideazione dell'impianto geometrico spetta a Giuliano da Sangallo, affiancato dal fratello Antonio, dal Francione e dal Pollaiuolo; alla conduzione della fabbrica, invece, fu preposto l'architetto pistoiese Ventura Vitoni a cui subentrerà, nella metà del Cinquecento, Giorgio Vasari quale progettista e direttore dei lavori della maestosa cupola a doppia calotta.

Il complesso monumentale è articolato in distinti corpi di fabbrica che corrispondono, sostanzialmente, alla successione delle sue fasi costruttive.

Il vestibolo sangallescò, costruito sulla medievale chiesetta originaria, ha pianta rettangolare, una cupola centrale su pennacchi e ali laterali coperte da volta a botte.

L'aula ottagonale vitoniana si sviluppa verticalmente nella successione di tre ordini architettonici di altezza decrescente, a cui si aggiungono le costruzioni vasariane di tamburo, cupola e lanterna. Agli ordini architettonici corrispondono i camminamenti interni che dividono la struttura muraria in due gusci.

La prima pietra della Basilica venne collocata nel settembre 1495 e il cantiere si protrae per quasi un secolo. Infatti, nel 1569, appena la cupola è completata nelle sue strutture portanti, si registrano le prime lesioni. Gli interventi di consolidamento vengono effettuati dallo stesso Vasari che inserisce alcuni elementi strutturali in entrambi i gusci.

Tuttavia, a causa del continuo manifestarsi delle lesioni, il Granduca Francesco I affida il progetto di consolidamento a Bartolomeo Ammannati, il quale ascrive al Vasari la responsabilità dei dissesti, in particolare dovuti al carico esorbitante della lanterna.

I suoi rimedi, pur consentendo di superare la fase di crisi più acuta, non eliminano le cause dei dissesti che continuano a manifestarsi ciclicamente. L'ultimo restauro risale al 1966.

La prolungata assenza di interventi di manutenzione e conservazione del complesso monumentale ha indotto un diffuso stato di degrado e ha portato il Ministero per i Beni e le Attività Culturali a siglare, nel 2008, un protocollo d'intesa con la Curia Vescovile di Pistoia e la Fondazione della Cassa di Risparmio di Pistoia e Pescia per l'avvio dei primi provvedimenti di restauro dell'edificio, progettati e condotti dalla Soprintendenza.

Il protocollo d'intesa ha fornito lo spunto per la convenzione di ricerca con il Laboratorio GeCo dell'Università degli Studi di Firenze e lo studio dell'autrice, dal 2008 al 2011, nell'ambito degli assegni di ricerca universitari.

### **Acquisizione digitale**

L'articolazione spaziale della struttura, la complessità geometrica degli ambienti e degli spazi voltati, la ricchezza dell'apparato decorativo hanno richiesto l'integrazione di tecniche di misura differenti (sistemi topografici classici e satellitari, sistemi a scansione 3D e fotogrammetria digitale). L'obiettivo prefisso era fornire rappresentazioni info-grafiche con elevati livelli di dettaglio, metricamente corrette e conformi alle finalità del rilievo e alle scale di restituzione grafica individuate come opportune per l'analisi delle strutture e degli apparati decorativi.

Il lavoro *in situ* si è svolto in cinque campagne di misura (Tucci et al., 2012).

È stata realizzata una rete topografica comprendente vertici interni ed esterni alla basilica ('Zenith Ingegneria s.r.l', spinoff del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara). Le operazioni di misura sono state eseguite sia con stazione totale (TPS802, Leica Geosystems) che con ricevitori GPS geodetici (GPS1200, Leica Geosystems). La massima estensione planimetrica della rete, che si presenta allungata in direzione parallela a via Madonna, è pari a circa 480m x 170m, mentre lo sviluppo in quota va da 0 a circa 47m. Il calcolo e la compensazione delle coordinate dei vertici della rete principale sono stati eseguiti con metodi rigorosi utilizzando il principio dei minimi quadrati. I risultati ottenuti presentano valori differenti a seconda della tipologia e della gerarchia di rete realizzata (*Tabella 1*).

Tipologia rete	$\sigma_{med}$ (m)	$\sigma_{max}$ (m)
Principale	x = 0.002 y = 0.003 q = 0.001	x = 0.004 y = 0.005 q = 0.004
Secondaria	x = 0.005 y = 0.003 q = 0.001	x = 0.007 y = 0.007 q = 0.001
GPS	x = 0.006 y = 0.018 q = 0.006	x = 0.012 y = 0.029 q = 0.029

Tabella 1. Deviazione standard media e massima per le tre tipologie di rete.

Per il rilievo di dettaglio degli interni e di buona parte degli esterni è stato utilizzato uno scanner a differenza di fase (HDS6000, Leica Geosystems); soltanto per il rilievo della cupola e della lanterna è stato necessario l'impiego di uno scanner a tempo di volo (Scanstation2, Leica Geosystems), per ovviare alla maggiore distanza strumento/oggetto dell'ordine di circa 100 – 150 m.

La risoluzione di scansione è stata di volta in volta progettata in funzione delle caratteristiche formali e dimensionali degli spazi indagati. Nel preventivare i tempi di acquisizione sono stati valutati sia i tempi di esecuzione delle scansioni e sia i tempi per lo spostamento e l'orientamento del sensore.

Sono state realizzate 164 postazioni di scansione per un totale di 57 GB di dati grezzi.

I dati acquisiti sono stati allineati prevalentemente tramite punti di coordinate note e, conseguentemente, referenziati nel sistema topografico locale realizzato tramite rete di inquadramento. L'allineamento è stato risolto con un residuo subcentimetrico.

Il modello tridimensionale complessivo, costituito da oltre 3 miliardi di punti, è stato organizzato in sotto-progetti per agevolare la visualizzazione, la gestione e le analisi successive su porzioni architettonicamente coerenti.

### La documentazione metrica

Il compito di interpretare il modello di punti, per individuarne sia le geometrie che le anomalie, non è agevole per un operatore inesperto. L'esercizio di lettura, che con altre tecniche di rilievo viene fatto *in situ*, qui è postposto nella fase di restituzione grafica. Resta comunque l'osservazione attenta del manufatto la base imprescindibile sulla quale impostare un disegno corretto permettendo di associare alla geometria, già studiata, assimilata e decodificata, le dimensioni metriche del database 3D.

A partire dal modello complessivo di punti sono state elaborate diciotto tavole architettoniche: in particolare, per l'intera basilica, cinque piante, una sezione longitudinale (*Figura 2*) e tre prospetti (via Vitoni, via della Madonna e cortile di pertinenza); per il vestibolo, due piante dell'estradosso (una architettonica e una strutturale) e lo sviluppo dell'intradosso della volta a botte orientale, una sezione longitudinale e due trasversali, il prospetto fotomosaicato della facciata principale; per il corpo ottagonale, una sezione trasversale e una diagonale.

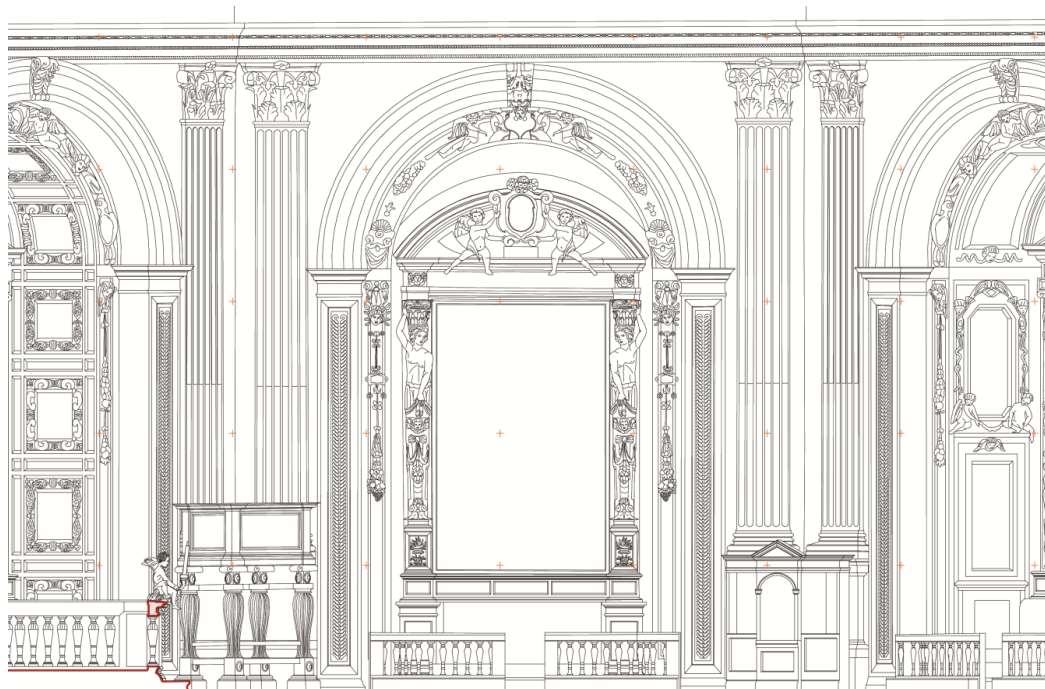


Figura 2. Dettaglio della sezione longitudinale. Originale in scala 1:50.

### La documentazione strutturale e diagnostica

La documentazione metrica prodotta costituisce un supporto indispensabile al progetto di restauro e consolidamento. Nello specifico, è stato possibile approfondire la conoscenza della fabbrica evidenziando per il vestibolo, i fuori piombo dei paramenti esterni e il disallineamento dei lacunari delle volte; per l'aula ottagonale e la cupola, gli spessori delle due calotte, i materiali e le tecniche costruttive, i collegamenti interni, il numero, la dimensione e la posizione dei costoloni e delle catene, il quadro fessurativo, gli interventi di consolidamento, i legami tra tecnica costruttiva e deformazioni.

Lo stato di degrado e i dissesti del vestibolo, in particolare del cupolino e delle volte a botte, già denunciati nel 1725 da Giovan Battista Bettini nella sua relazione corredata di rilievi dello stato di fatto (Romby, 1992), riguardano i fuori sesto delle formelle in pietra serena dei tre anelli sommitali del cupolino. E' interessante notare come la catena cerchiate assolve perfettamente la sua funzione strutturale mantenendo inalterata la posizione delle formelle a quote più basse. La parte superiore, invece, è libera di muoversi a causa del sottilissimo guscio di 25 cm, formato da 10 cm di pietra e 15 cm di rivestimento in laterizio. Per ovviare a questo problema è stato previsto l'inserimento di tiranti metallici capaci di saldare la pietra della formella al laterizio dell'estradosso (Figura 3).

Tra gli altri interventi di consolidamento proposti, si ricordano:

- il riposizionamento in piombo delle murature attraverso l'inserimento di catene metalliche;
- l'innalzamento della facciata principale per impostare il nuovo tetto;
- la costruzione di due contrafforti in facciata per coadiuvare l'intervento di restauro del cupolino e del tetto (Figura 4).

La deformazione più significativa è lo spanciamento esterno di tutti i prospetti eccetto quello settentrionale irrigidito dall'aula ottagonale.

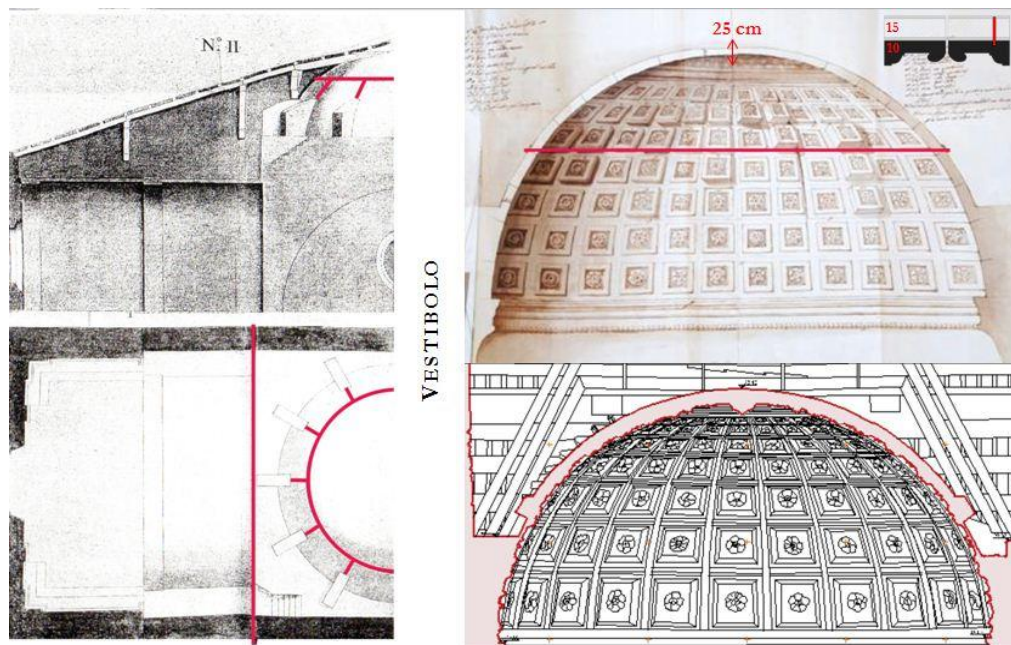


Figura 3. A sinistra, disegno del cupolino eseguito da Giovan Battista Bettini nel 1725. A destra: in alto, disegno del cupolino che evidenzia le formelle dislocate al di sopra della quota della catena di ferro; in basso, disegno realizzato dall'autrice nel 2009. In alto a destra, sezione della formella con evidenziato in rosso il tirante metallico.

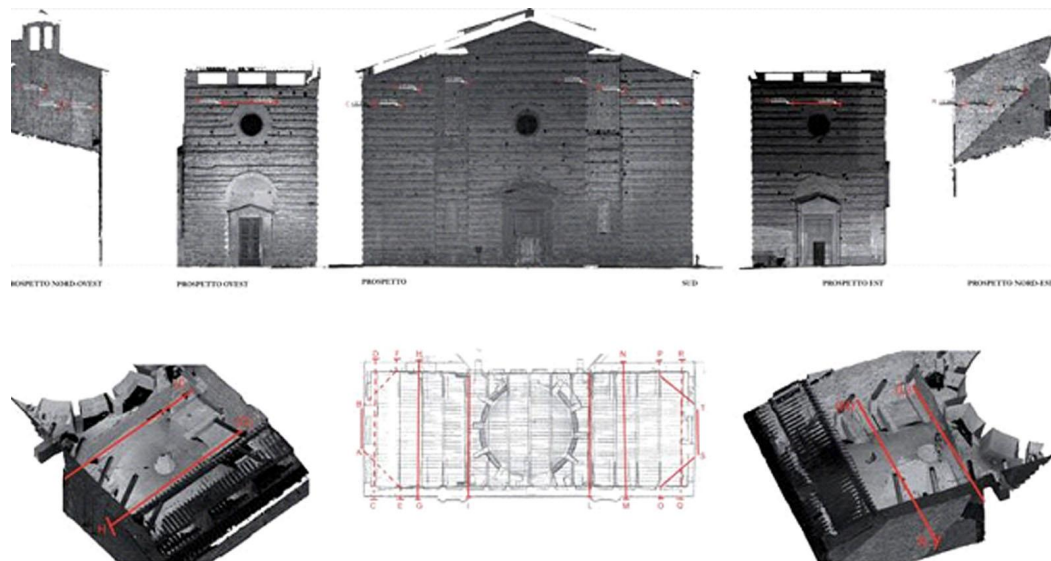


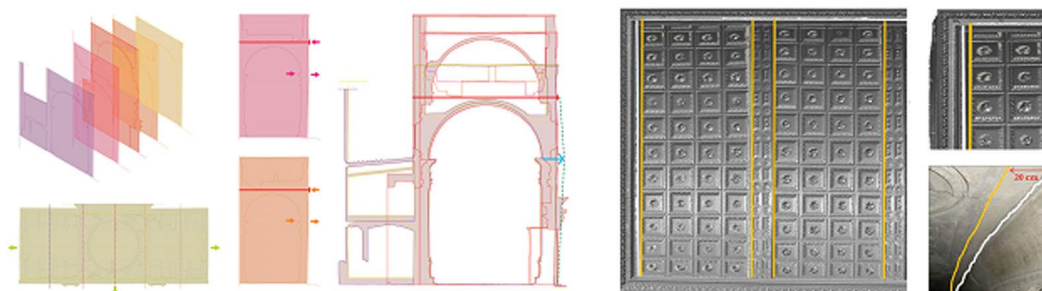
Figura 4. Viste del modello di punti dei quattro prospetti esterni e dell'estradosso del vestibolo. Le otto catene settecentesche sono evidenziate in rosso (tratteggiate quelle murate). I capochiavi sono stati tutti indicati con le lettere alfabetiche. Ai lati, alcune viste 3D del modello di punti con indicazione delle catene.



L'estrazione delle cinque sezioni trasversali ha evidenziato fuori piombo accentuati nelle due sezioni pressoché tangenti il cerchio d'imposta del cupolino. Questa tesi conferma le debolezze già riscontrate nel settecento e che, a quanto rilevato, continuano a sussistere nonostante l'inserimento delle catene.

La vista ortogonale di tutte le sezioni trasversali sintetizza eloquentemente la distribuzione della deformazione: massima in corrispondenza dell'imposta del cupolino, nulla in corrispondenza delle catene a dimostrazione del fatto che assolvono alla loro funzione strutturale (*Figura 5, sinistra*).

I fuori piombo letti nelle pareti perimetrali si traducono in una deformazione della volta a botte, accentuata nel prospetto est, probabilmente mai risanata dall'intervento settecentesco (*Figura 5, destra*).



*Figura 5. A sinistra, vista delle cinque sezioni trasversali del vestibolo: quelle in prossimità del cupolino evidenziano la rotazione esterna della facciata principale; la vista ortogonale di tutte le sezioni trasversali denuncia la massima deformazione in corrispondenza dell'imposta. A destra, modello di superficie 3D dell'intradosso del vestibolo. Particolare della volta a botte orientale. In giallo, la linea ideale che avrebbe dovuto seguire il perimetro; in bianco, la linea reale della volta deformata. Al lato, una foto di dettaglio della lacerazione, nel punto di massima deformazione, colmata da un cuneo di malta.*

Le deformazioni sono state quantificate su tutti i prospetti del vestibolo attraverso il confronto con un piano verticale di riferimento. Gli elaborati diagnostici hanno confermato quanto già emerso dalla lettura critica dei documenti storici e delle tavole architettoniche.

La mappa di elevazione, realizzata estraendo porzioni di punti ogni 5 cm, è rappresentata in falsi colori calibrati in modo da rappresentare i diversi livelli di elevazione del prospetto a partire da una quota zero (porzione pressoché in piombo, indicata in rosso).

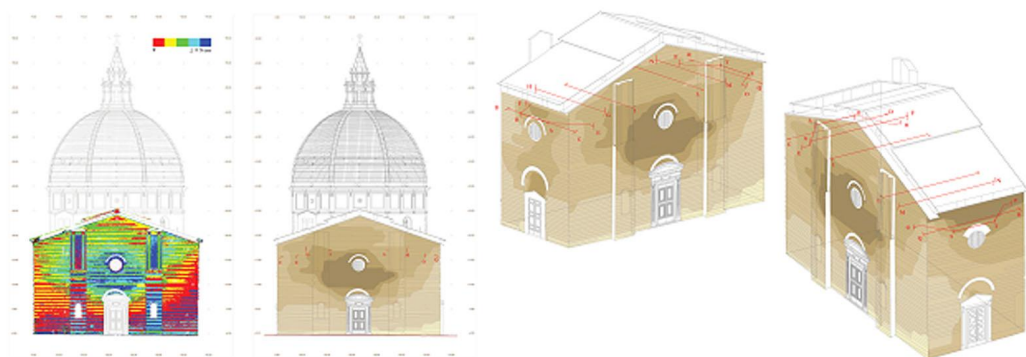
Per una maggiore leggibilità, le mappe di elevazione in falsi colori sono state ulteriormente elaborate in curve di livello (*Figura 6, sinistra*).

E' evidente, per la facciata principale, il massimo spanciamento nella parte centrale dell'ordine di 20 - 25 cm, in prossimità dell'imposta del cupolino, che si attenua, fino ad annullarsi in corrispondenza delle catene metalliche I e L.

Il prospetto settentrionale, invece, presenta deformazioni pressoché nulle grazie all'irrigidimento dovuto all'attiguo corpo ottagonale.

Per i prospetti laterali, si registra il massimo fuori piombo in prossimità dell'imposta delle volte a botte, maggiore nel prospetto sul cortile e minore nel prospetto sulla via Vitoni come era facile aspettarsi visto la notevole deformazione della volta a botte nello spigolo sud-est. Siamo, infatti, nell'ordine di 10 - 15 cm nel prospetto est e di 5 - 10 cm nel prospetto ovest.

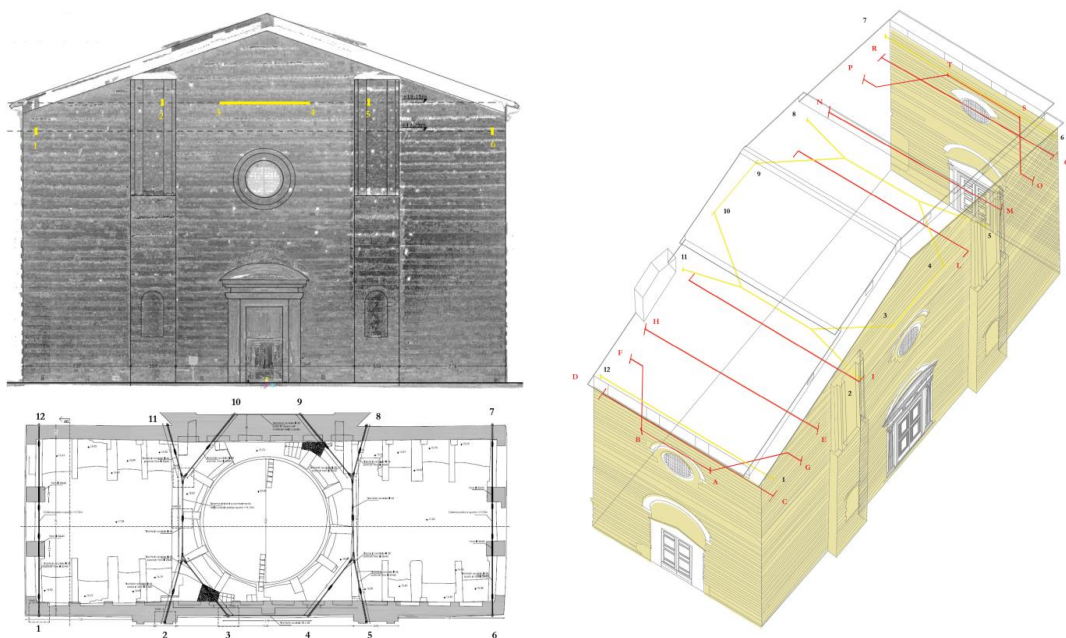
Anche in questo caso, lo spanciamento si attenua, fino ad annullarsi, in corrispondenza delle catene ST e BA.



*Figura 6. A sinistra, facciata principale del vestibolo: mappa di elevazione, rappresentata in falsi colori, degli eventuali fuori piombo dei prospetti (sinistra); mappa delle curve di livello, tracciate ogni 5 cm (destra).*

*A destra, modello 3D del vestibolo con la mappa delle curve di livello. I maggiori fuori piombo si riscontrano nella facciata principale con deformazione massima pari a circa 25 cm.*

La mappa ipsometrica è stata riportata sul modello 3D per avere una visione più completa dei fuori piombo e per una maggiore cognizione del processo causa-effetto, associando ad ogni deformazione la possibile inefficacia o inesistenza degli elementi strutturali (Figura 6, destra).



*Figura 7. A sinistra, progetto esecutivo di consolidamento con l'introduzione di un nuovo sistema strutturale (prof. Carlo Blasi, Università degli Studi di Parma)*

*A destra, modello 3D del vestibolo con indicazione delle catene settecentesche (in rosso) e delle nuove catene metalliche.*

Gli elaborati grafici forniti dal rilievo tridimensionale, hanno costituito una documentazione metrica di supporto al progetto esecutivo di consolidamento (prof. Carlo Blasi, Università degli Studi di Parma), che ha introdotto un ragno cerchiante il cupolino, costituito da dieci tiranti in acciaio, e due nuove catene metalliche in prossimità dei prospetti est e ovest (*Figura 7, sinistra*).

Nel modello 3D è possibile apprezzare il nuovo sistema strutturale, in giallo, e la relazione con le catene preesistenti, in rosso. Il calcolo strutturale ha confermato il calcolo delle deformazioni: sono stati inseriti nuovi elementi di irrigidimento nei punti di massimo fuori piombo come in facciata, la catena 3-4, e nei prospetti secondari le catene 1-12 e 6-7 (*Figura 7, destra*).

### **Conclusioni**

Le potenzialità delle recenti strumentazioni hanno generato nuove procedure operative, velocizzato ed economizzato la realizzazione di alcuni elaborati, consentito la definizione di nuovi prodotti e la loro diffusione.

Gli elaborati convenzionali, generalmente bidimensionali, sono tuttora efficaci nella rappresentazione di artefatti tipicamente a forma libera (ad esempio le rovine archeologiche) e quando si deve fare riferimento a particolari sezioni verticali o orizzontali. Il limite si avverte quando è necessaria la riproduzione della realtà con tutte le sue mancanze, eccezioni, permanenze, sovrapposizioni e interferenze; realtà plasmata dallo scorrere del tempo e da quelle forme mai disegnate ma semplicemente scolpite, che hanno arricchito il costruito oltre lo schema originario. A questo proposito, Saint-Aubin nel 1999 definisce il rilievo come *“uno strumento che cerca di ottenere la figurazione della forma effettiva della costruzione con le mancanze, le irregolarità, le modificazioni, le aggiunte, le eliminazioni, i restauri sovrainposti nel tempo; uno strumento didattico, giacché vuole permettere la comprensione del funzionamento dell’opera nella complessità della sua storia e analizzare i modelli ai quali si riferisce e le innovazioni che introduce; infine uno strumento per conoscere lo stato di salute, la struttura e i suoi cedimenti e cercare la terapia a partire da un documento irrefutabile”*.

### **Ringraziamenti**

Le operazioni di rilievo sono state sviluppate nell’ambito della convenzione di ricerca “Rilievo strumentale e restituzione grafica della Basilica di Santa Maria dell’Umiltà a Pistoia” stipulata tra il Laboratorio GeCo dell’Università degli Studi di Firenze e la Soprintendenza per il Patrimonio Storico Artistico ed Etnoantropologico per le province di Firenze, Pistoia e Prato (responsabile, arch. Paola Grifoni/arch. Alessandra Marino; progetto e direzione lavori, arch. Valerio Tesi).

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

### **Bibliografia**

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

Romby G. C. (1992), “La Basilica della Madonna dell’Umiltà di Pistoia: tre secoli di restauro”, *Proceedings of the Congress “Centenario del miracolo della Madonna dell’Umiltà a Pistoia”*, Pistoia, 87-110

Saint Aubin J. P. (1999), *Il rilievo e la rappresentazione dell’architettura*, Moretti&Vitali, Bergamo  
Tucci G., Nobile A., Riemma M. (2012), “Laser scanner surveys and the study of the geometry and structure of the dome in the Basilica della Madonna dell’Umiltà in Pistoia”, *Proceedings of the International Congress “Domes in the World”*, Florence, Italy, ISBN 9788840442112 [CD-ROM]