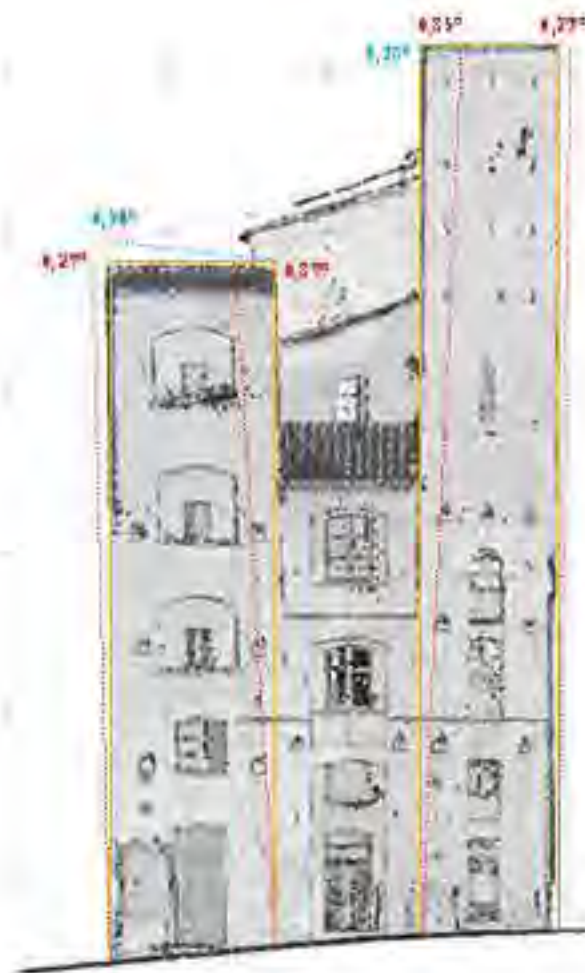


L'attività di ricerca si è sviluppata con l'obiettivo di sperimentare i metodi e le tecniche di acquisizione, gestione e rappresentazione tridimensionale mediante l'uso del laser scanner per offrire un valido supporto alla documentazione e alla diagnostica finalizzate alla conservazione del nostro patrimonio culturale costruito.

I casi studio indagati hanno dimostrato che, a partire dalla banca dati tridimensionale, sempre aggiornabile e interrogabile, è possibile modulare l'elaborazione in funzione degli obiettivi condotti da tutte le professionalità e le competenze coinvolte. Si propone, pertanto, un'attività innovativa della tecnica di rilievo laser scanning: l'attenzione non si pone solo sugli elementi artistici e architettonici ma si sposta anche sugli elementi costruttivi e costruttivi, su eventuali testimonianze di fessurazioni e deformazioni critiche per l'effettiva stabilità della struttura.

La necessità di disporre di un "modello irrefutabile", a cui riferire le scelte progettuali, costituisce l'essenza portante della ricerca.



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



DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA DEI SISTEMI ELETTRONICI

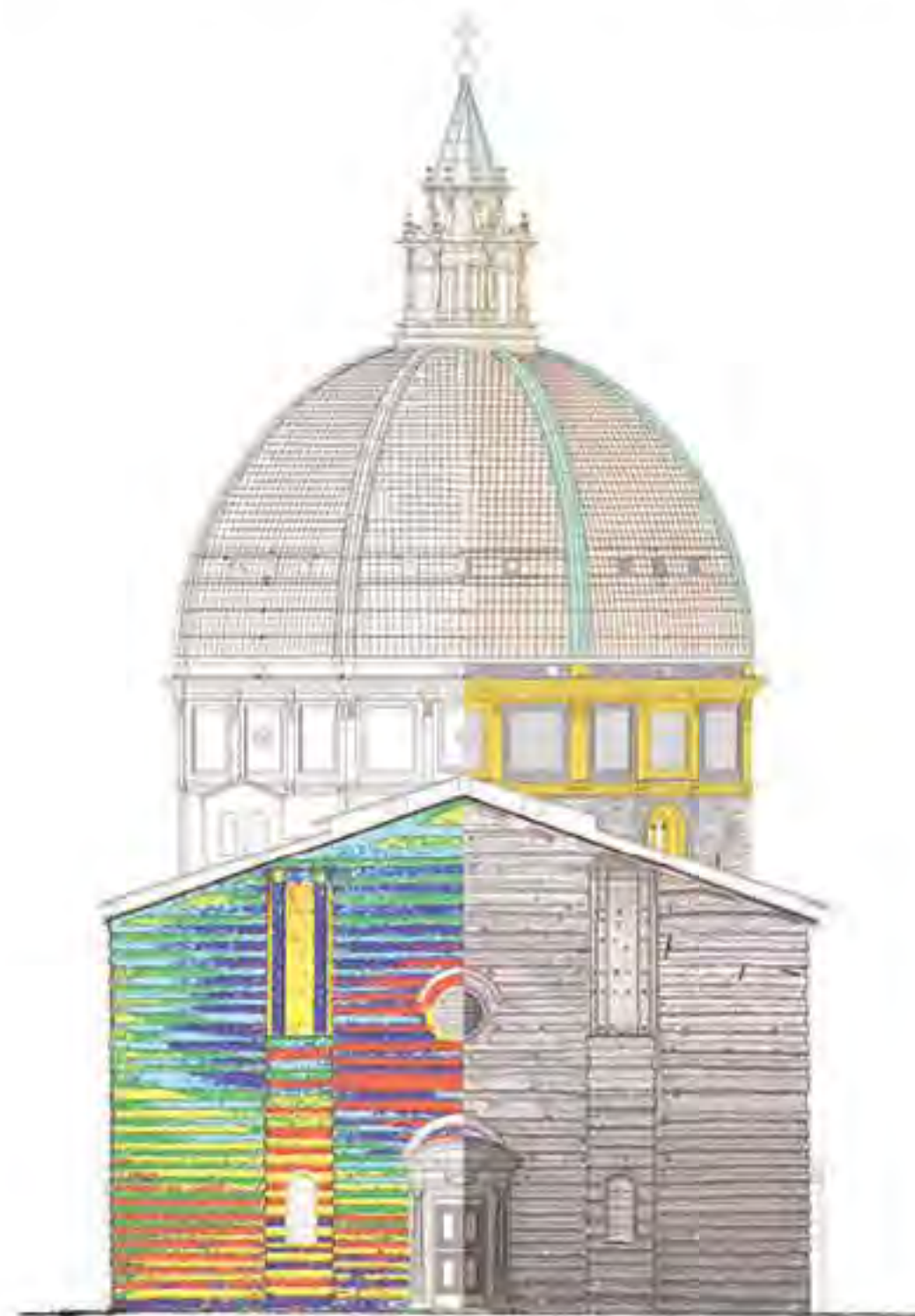
2019/000

TECNOLOGIE PER I BENI CULTURALI
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE

ALESSIA NOBILE

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



ALESSIA NOBILE

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA DEI SISTEMI ELETTRONICI

XXV CICLO



CURRICULUM IN
TECNOLOGIE PER I BENI CULTURALI

**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

CANDIDATO

DOTT.SSA ALESSIA NOBILE

COORDINATORE

PROF. CARLO ATZENI

TUTORE

PROF. GRAZIA TUCCI

ANNI

2010 - 2012

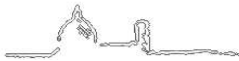
A 87



INDICE

INTRODUZIONE	1
Obiettivi e organizzazione della tesi	
1. CONTESTO SCIENTIFICO E OPERATIVO	7
Stato dell'arte delle tecniche 3D	
Campi di applicazione	
Repliche	
Reverse engineering	
Applicazioni mediche	
Intrattenimento	
Applicazioni spaziali	
Applicazione al campo dei Beni Culturali	
Creazione di archivi digitali	
Copie fisiche	
Computer Aided Restoration	
Ricostruzioni virtuali	
Monitoraggio	
Fruizione remota	
Creazione di musei ed ambienti virtuali	
Modelli 3D per la documentazione metrica e la lettura critica	
Architettura vernacolare in terra cruda (Siria)	
Rupe tufacea (Pianiano - Viterbo, Italia)	
Sala Consiliare (Prato, Italia)	
Cattedrale di San Nicola di Bari (La Rioja, Argentina)	
Modelli 3D per la comunicazione	
Cittadella (Tartous, Siria)	
Promenade Architecturale (Tiro, Libano)	
Cappella dei Magi di Benozzo Gozzoli (Palazzo Medici-Riccardi di Firenze, Italia)	
Reperti archeologici delle antichità Egee e Cipriote in Toscana	

2. SISTEMI A SCANSIONE 3D:	77
DALL'ACQUISIZIONE ALL'ELABORAZIONE	
Definizione e principi di funzionamento	
Principi di misura della distanza	
Sistemi a tempo di volo (ToF, Time of Flight)	
Sistemi a differenza di fase (Phase shift)	
Strumentazione	
Precisione angolare	
Precisione nella misura della distanza	
Risoluzione e "spot size"	
Caratteristiche della superficie	
Condizioni atmosferiche	
Risultato di una scansione	
Acquisizione dei dati	
Schemi di acquisizione	
Tipologie e disposizione dei target	
Registrazione dei dati	
Registrazione tramite punti omologhi	
Registrazione tramite punti di coordinate note	
Referenziazione tramite punti di coordinate note	
Ottimizzazione dell'allineamento - ICP (Iterative Closest Points)	
Elaborazione dei dati	
Estrazione di profili sezione	
Estrazione di orto-immagini	
3. LA BASILICA DI SANTA MARIA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA	109
La convenzione di ricerca	
Quadro storico	
I restauri dell'aula ottagonale e della cupola	
4. IL RILIEVO 3D DELLA BASILICA	121
Acquisizione e pre-processing dei dati	
5. LA DOCUMENTAZIONE METRICA DELLA BASILICA	131
Archiviazione dei dati	
Elaborazione dei dati	
Tavole architettoniche	
Confronto con i rilievi precedenti	
6. LA LETTURA DIAGNOSTICA DELLA BASILICA	153
I restauri e consolidamenti del vestibolo	
Analisi delle deformazioni del vestibolo	
Conoscenza dei materiali e delle tecniche costruttive	
Aula vitoniana	



Attico vasariano

Cupola vasariana

Analisi delle deformazioni del vestibolo

Analisi della tecnica costruttiva della cupola

Il quadro fessurativo della cupola

Individuazione delle catene nell'aula ottagonale e nella cupola

Analisi dei collegamenti verticali (attico vasariano - cupola)

7. IL PROGETTO RISEM. LE TORRI DI SAN GIMIGNANO 215

Il progetto RiSEM

San Gimignano

Il ruolo della geomatica nella definizione del rischio sismico

Il rilievo delle torri

Acquisizione metrica tridimensionale con laser scanner

Referenziazione in un unico sistema di riferimento

La restituzione grafica per la documentazione metrica

Torri Gemelle Salvucci

Torri Ardinghelli

Analisi delle trasformazioni costruttive

Analisi sulla geometria del modello 3D

Il modello 3D a supporto dell'analisi strutturale

Il laser scanner per il calcolo delle deformazioni

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE 283

BIBLIOGRAFIA 287

RINGRAZIAMENTI 299

RIASSUNTO

L'attività di ricerca si è sviluppata con l'obiettivo di sperimentare i metodi e le tecniche di acquisizione, gestione e rappresentazione tridimensionale mediante l'uso del laser scanner per offrire un valido supporto alla documentazione e alla diagnostica finalizzate alla conservazione del nostro patrimonio culturale costruito. L'ampia diffusione delle tecniche di scansione non ci consente ancora di considerare concluso un tema di ricerca che erroneamente oggi si identifica soprattutto con la fase di "acquisizione dei dati". Il problema è in realtà posposto alle fasi successive di elaborazione e rappresentazione e sono molti i quesiti a cui si cerca di rispondere in un tentativo di integrazione culturale tra restauro, geomatica ed elettronica: è insieme una sfida e una opportunità dove si tenta di superare le barriere linguistiche, dovute a differenti ambiti culturali, diversi approcci metodologici e vari percorsi formativi.

Lo studio è condotto a livello multi-scala:

*- a scala dell'edificio, con la **Basilica di Santa Maria dell'Umiltà di Pistoia**, nell'ambito della convenzione di ricerca stipulata tra il laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali dell'Università degli Studi di Firenze e la Soprintendenza per il Patrimonio Storico Artistico ed Etnoantropologico per le province di Firenze, Pistoia e Prato, in vista del restauro e del consolidamento dell'importante struttura rinascimentale.*

*- a scala urbana, con le **Torri di San Gimignano**, in occasione del progetto "Rischio Sismico negli Edifici Monumentali (RISEM)" finanziato dalla Regione Toscana e coordinato dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze, per la definizione del rischio sismico.*

I casi studio analizzati hanno portato alla consapevolezza che, a partire dalla banca dati tridimensionale, sempre aggiornabile e interrogabile, è possibile modulare l'elaborazione in funzione degli obiettivi interdisciplinari condivisi. Si propone, pertanto, un utilizzo nuovo della tecnica di rilievo laser scanning: l'attenzione non si pone specificatamente sugli elementi artistici e architettonici e lo scopo non è solo restituire in modalità tridimensionale un oggetto al fine di effettuare valutazioni qualitative di natura storica e culturale. L'idea è approcciarsi al dato laser con occhio critico nei confronti della struttura stessa e delle geometrie più o meno complesse. L'attenzione si sposta sugli elementi costitutivi e costruttivi, su eventuali testimonianze di fessurazioni e deformazioni critiche per l'effettiva stabilità della struttura. La necessità di disporre di un "modello irrefutabile", a cui riferire le scelte progettuali, costituisce l'ossatura portante della ricerca.



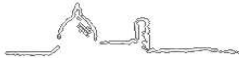
ABSTRACT

Goal of the research has been to test laser scanning acquisition, management and three-dimensional representation methods and techniques to provide a valid documentation and diagnostics support aimed at the preservation of our cultural built heritage. The widespread use of scanning techniques does not allow to consider concluded yet a research topic that today is mistakenly identified especially with the phase of data acquisition. Actually the problem is postponed to the later stages of processing and representation and there are many issues partially solved through an attempt of cultural integration between restoration, geomatics and electronics: it is both a challenge and an opportunity, which carries along an effort to overcome language barriers, due to different cultural backgrounds, methodological approaches and educational paths.

The study has been conducted with a multi-scale approach:

- *at the building scale, with focus on the **Basilica of Santa Maria dell'Umiltà in Pistoia**, within the research agreement signed by the Laboratory of Geomatics for Cultural Heritage of the University of Florence and the Soprintendenza per il Patrimonio Storico Artistico ed Etnoantropologico per le province di Firenze, Pistoia e Prato, in view of the restoration and reinforcement of the relevant Renaissance architecture;*
- *at the urban scale, within the project "Seismic Risk in Monumental Buildings (RISEM)" funded by the Region of Tuscany and coordinated by the Department of Civil and Environmental Engineering of the University of Florence, for the seismic risk evaluation related to the **San Gimignano towers**.*

The above-mentioned case-studies raised the awareness that, on the basis of the 3D data set, which can be updated and queried at any time, it's always possible to adjust the processing phase according to the fixed interdisciplinary goals. It is therefore proposed a new use of the laser scanning surveying technique: attention is not specifically given to the artistic and architectural elements and the aim is not only to represent an object in three-dimensions in order to make qualitative assessments on its historical and cultural value. The idea is to read data from laser scanning with the intent to review critically the structure and the more or less complex geometries. Focus is shifted on the constituent and constructive elements, on any evidence of cracks and deformations which may weaken the stability of the structure. The need for an "irrefutable model", which can be used to orient any restoration plan, globally frames the research.



INTRODUZIONE

La conoscenza di un sito è il primo passo verso la ricerca di una adeguata strategia di conservazione, e la documentazione costituisce il primo passo di questo processo conoscitivo” [1]

Negli ultimi anni l'impiego di tecnologie informatiche al campo dei Beni Culturali e delle Belle Arti è progressivamente aumentato: si assiste alla creazione di modelli digitali 3D di oggetti di differenti caratteristiche e dimensioni (monumenti, siti archeologici o reperti, architetture monumentali, ecc.) sia per la documentazione che per la conservazione e la visualizzazione.

Questa graduale crescita d'interesse deriva dalla disponibilità di nuove tecnologie per la digitalizzazione e dalla curiosità dei non-esperti verso strumenti in grado di consentire forme di esplorazione e documentazione innovative.

[1] *Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places: illustrated examples*. Rand Eppich, editor; Amel Chabbi, associate editor. The Getty Conservation Institute, Los Angeles 2007

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

L'attività di rilevamento è definita, da oltre cinquecento anni, con le operazioni di *misura* e *disegno*; tuttavia, bisogna aspettare l'inizio del XIX secolo per avere restituzioni grafiche di misure rigorose come suggerisce la celebre definizione del 1832 di Antoine Chrysostome Quatremère de Quincy “[...] dessinés et mesurés très exactement” [2].

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 2006 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 sovrapposti 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” [3].

Sebbene, però, l'interesse crescente nelle ricostruzioni 3D digitali sia evidente, è importante ricordare che:

- molti rilievi 3D realizzati con laser scanner richiedono costi elevati, una grande quantità di tempo per l'elaborazione dei dati e software e hardware dedicati;
- i rilievi realizzati con le macchine fotografiche digitali, anche se di basso costo, richiedono esperienza nella fase di acquisizione, software dedicato e interazione manuale;
- nuovi sensori capaci di acquisire dati in un particolare intervallo dello spettro elettromagnetico (IR, UV, ecc.) possono fornire informazioni specifiche sullo stato di conservazione o riconoscere dettagli non visibili all'occhio umano.

[2] Quatremère de Quincy A. C., *Dictionnaire historique de l'architecture*, voll. 2, Paris, 1832, v. *restauration*

[3] Saint-Aubin J. P., *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*, Moretti & Vitali, Bergamo, 2006

Alla luce di queste considerazioni, la scelta di un approccio, di una metodologia e di una tecnica corretti richiede una grande esperienza e la considerazione di differenti parametri.

OBIETTIVI E ORGANIZZAZIONE DELLA TESI

L'argomento centrale della tesi affronta e approfondisce, sulla base di numerose esperienze maturate nel corso dei tre anni presso il Laboratorio GeCo dell'Università degli Studi di Firenze (Geomatica per la Conservazione e la Comunicazione dei Beni Culturali, direttore: prof. Grazia Tucci), le problematiche connesse all'uso del laser scanner per i Beni Culturali. In particolare, la ricerca è focalizzata sulla stretta relazione che governa la documentazione metrica 3D alle indagini finalizzate alla lettura critica di grandi edifici monumentali.

Lo studio è condotto a livello multi-scala:

- dalla scala edilizia per l'analisi costruttiva e strutturale finalizzata al progetto di consolidamento e restauro della *Basilica di Santa Maria dell'Umiltà di Pistoia*;
- alla scala urbana per la definizione del rischio sismico delle *Torri di San Gimignano*.

I *case study* indagati hanno dimostrato che, a partire dalla banca dati tridimensionale, sempre aggiornabile e interrogabile, è possibile modulare l'elaborazione in funzione degli obiettivi condivisi da tutte le professionalità e le competenze coinvolte.

La tesi è articolata in 7 capitoli.

Il **primo capitolo**, introduttivo, espone una breve panoramica sullo stato dell'arte delle tecniche 3D e sui campi di applicazione (repliche, reverse engineering, applicazioni mediche, intrattenimento, applicazioni spaziali, Beni Culturali). In particolare, l'attenzione è concentrata sui Beni Culturali. Dopo una prima disamina delle applicazioni possibili (creazione di archivi digitali e monitoraggio di opere d'arte, fruizione remota, creazione di musei ed ambienti virtuali, computer aided restoration, copie fisiche e ricostruzioni virtuali), si introducono le due tematiche di maggiore interesse:

- i modelli 3D per la documentazione metrica e la lettura critica (*Architettura vernacolare in terra cruda in Siria* - modelli per le analisi costruttive e strutturali; *Rupe tufacea di Pianiano* - modelli per il progetto di consolidamento; *Sala Consiliare di Prato* - supporto metrico per la progettazione; *Cattedrale di San Nicola di Bari, La Rioja, Argentina* - supporto metrico per la conservazione programmata);
- i modelli 3D per la comunicazione (*Cittadella di Tartous in Siria, e Promenade Architecturale di Tiro in Libano* - supporto metrico per la valorizzazione del patrimonio culturale; *Cappella dei Magi di Benozzo Gozzoli, Palazzo Medici - Riccardi di Firenze* - per lo studio cromatico delle superfici pittoriche; *Reperti archeologici delle antichità Egee e Cipriote in Toscana* - per la creazione di un museo virtuale).

Il **secondo capitolo** riguarda l'analisi dei sistemi a scansione tridimensionali, dall'acquisizione all'elaborazione dei dati. Si affrontano i principi di funzionamento (sistemi a tempo di volo e sistemi a differenza di fase), la strumentazione disponibile sul mercato e le sue caratteristiche tecniche (precisione angolare e nella misura della distanza, risoluzione e spot size, caratteristiche della superficie e condizioni atmosferiche). Si percorre sommariamente il workflow di rilievo: dall'acquisizione dei dati con un progetto di presa (schemi di acquisizione, tipologie e posizionamento dei target) alla registrazione (allineamento con punti omologhi o con punti di coordinate note) alla referenziazione in un unico sistema di riferimento, all'ottimizzazione attraverso l'algoritmo ICP, fino all'elaborazione degli output grafici con estrazione di profili sezione e orto-immagini.

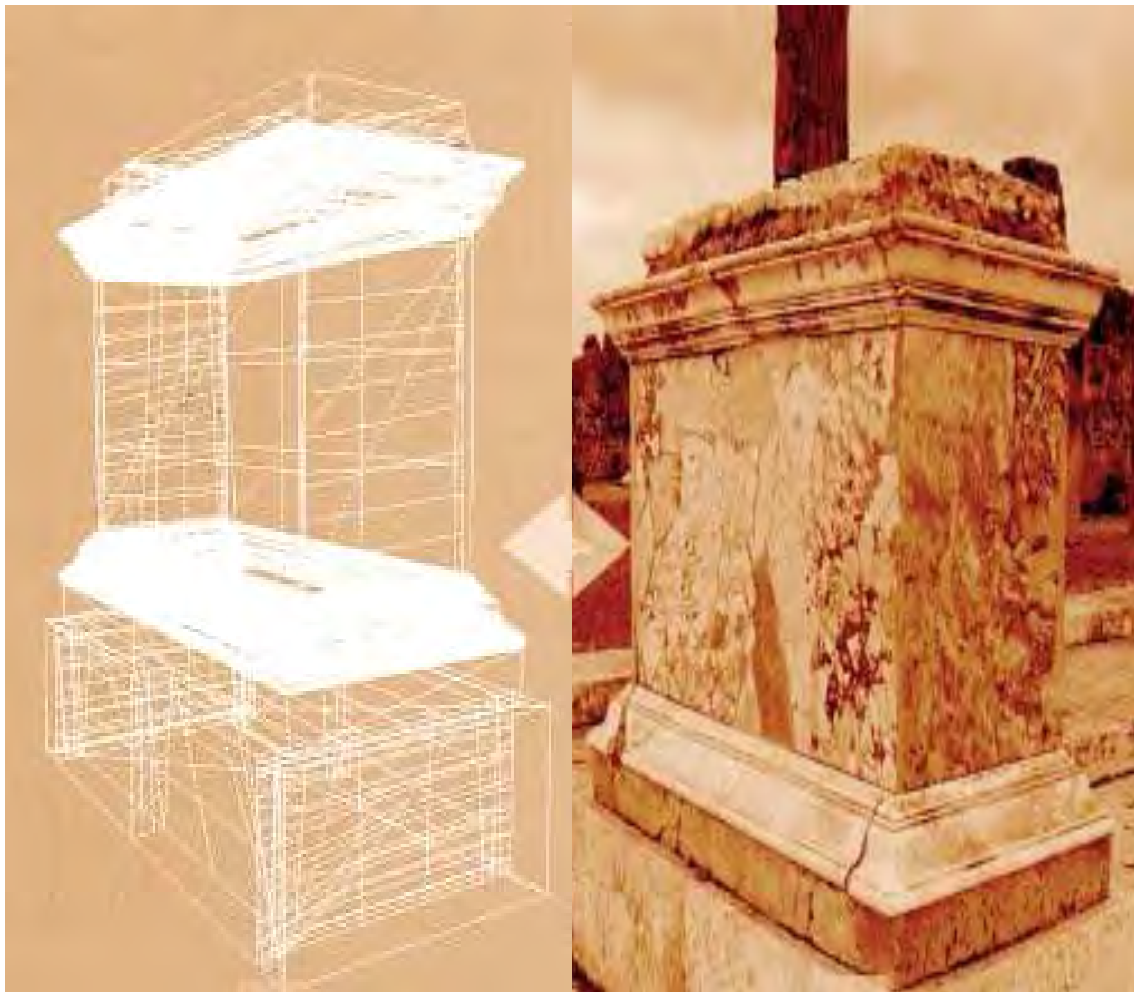
Il **terzo capitolo** presenta il primo caso studio della tesi, la Basilica di Santa Maria dell'Umiltà di Pistoia. Si espone sinteticamente il quadro storico concentrando l'attenzione soprattutto sulle lunghe vicende che hanno visto il cantiere di restauro protrarsi attraverso i secoli a causa dei primi dissesti verificatisi a completamento dell'imponente cupola vasariana.

Il **quarto** e il **quinto capitolo** descrivono l'approccio utilizzato sia in fase di acquisizione che del trattamento di dati metrici tridimensionali. Si tratta del primo rilievo metrico sistematico che ha fornito una indispensabile base per annotazioni tematiche relative ai materiali e allo stato di conservazione attuale. Il quinto capitolo è corredato da un corpus di elaborati grafici. Lo studio è il risultato di una proficua collaborazione tra istituti di ricerca universitari, istituzioni ecclesiastiche, fondazioni bancarie e Ministero per i Beni e le Attività Culturali.



Il **sesto capitolo** completa la documentazione della fabbrica con analisi tecnico-costruttive.

Il **settimo capitolo** presenta il secondo caso studio della tesi, le Torri di San Gimignano. Si affrontano, in particolare, le problematiche relative alla restituzione grafica di supporto alla definizione della vulnerabilità sismica. Si illustrano gli elaborati relativi alle Torri Salvucci e Ardinghelli.



CAPITOLO 1

CONTESTO SCIENTIFICO E OPERATIVO

STATO DELL'ARTE DELLE TECNICHE 3D

Il rilievo digitale e la creazione di modelli tridimensionali di oggetti e scene complesse ha ricevuto negli ultimi anni molto interesse da parte della comunità scientifica e del settore commerciale. Si assiste sempre più a restituzioni virtuali dell'ambiente che ci circonda, con ambientazioni e visualizzazioni 3D prodotte per varie applicazioni quali la documentazione, la conservazione, il restauro virtuale, la simulazione, la didattica, l'animazione, la cartografia, la gestione territoriale, il monitoraggio.

Uno degli esempi più noti è Google Earth, che associa mappe e immagini satellitari a modelli tridimensionali di terreni, città o singoli edifici. L'utilizzo di metodologie digitali nel settore cartografico è ormai diventato da diversi anni uno standard anche a livello produttivo [4].

Nel campo dei Beni Culturali, la documentazione geometrica di un oggetto o sito può essere definita come l'azione di acquisizione, elaborazione, presentazione e memorizzazione dei dati necessari per la determinazione, in un dato momento, della posizione, della forma e delle dimensioni dell'oggetto o del sito rilevato nello spazio tri-dimensionale [5].

Scopo della documentazione 3D attraverso tecnologie digitali è quindi quello di memorizzare il presente dei beni architettonici e archeologici, così come sono stati modellati nel corso del tempo e costituisce il necessario background per gli studi sul loro passato, così come per gli studi sul loro futuro e la loro

[4] Remondino F., Rizzi A., Agugiaro G., Jimenez B., Menna F., Nex F., Baratti G., **Rilievi e Modellazione 3D**, in: *Atti 15ª Conferenza Nazionale ASITA*, Reggio di Colorno, 15-18 novembre 2011, ISBN 978-88-903132-6-4, pp. 1825-1836

[5] UNESCO, *Photogrammetry applied to the Survey of Historic Monuments, of Sites and to Archaeology*, UNESCO editions, 1972

[6] Gruen A., Remondino F., Zhang L., **Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan**, *The Photogrammetric Record*, vol. 19, n. 107, 2004, pp. 177-199

conservazione. Inoltre, il rilievo 3D consente di disporre di modelli digitali del patrimonio, in caso di perdite o danneggiamenti [6].

Un rilievo metrico richiede un approccio sistematico. L'impiego di attrezzature sofisticate non mette al riparo da errori se non è accompagnato da metodologia corretta.

L'English Heritage Metric Survey Team definisce il rilievo come *la descrizione grafica di edifici e territorio tramite uno specifico standard, per fornire una base dati affidabile e ripetibile senza specifici input soggettivi*.

Si sottolinea la necessità dell'utilizzo di metodi noti e ripetibili affinché il disegno sia restituito col minimo apporto soggettivo senza con ciò trascurare il complesso passaggio tra osservazione personale e processo di misura.

Per creare modelli 3D di oggetti o luoghi ci sono diverse metodologie e approcci che possono essere generalmente raggruppati in due grandi famiglie (Fig. 1):

1) Metodi *Reality-based*

Rilevano e restituiscono, attraverso sensori attivi e passivi, la realtà. Queste metodologie, a contatto o non, misurano e modellano gli artefatti reali riproducendo un modello 3D virtuale e digitale che tende ad essere un calco della realtà o una sua schematizzazione in rapporto ad una determinata finalità e quindi secondo specifici parametri;

2) Metodi di *Computer grafica*

Generano modelli tridimensionali, attraverso software dedicati (Autodesk Maya, Autodesk 3DStudio, Google Sketch-up, Cinema 4D, ecc.), a partire da una semplice idea e senza impiegare alcuna misurazione rilevata.

Fig. 1 - Costruzione di modelli con metodologia di computer grafica (in alto) e reality-based (in basso) [Benedetti B., Gaiani M., Remondino F., **Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei**, Edizioni della Normale, ISBN 978-88-7642-353-6]



I sistemi *reality-based* si dividono in due grandi categorie: a contatto e senza contatto (Fig. 2).

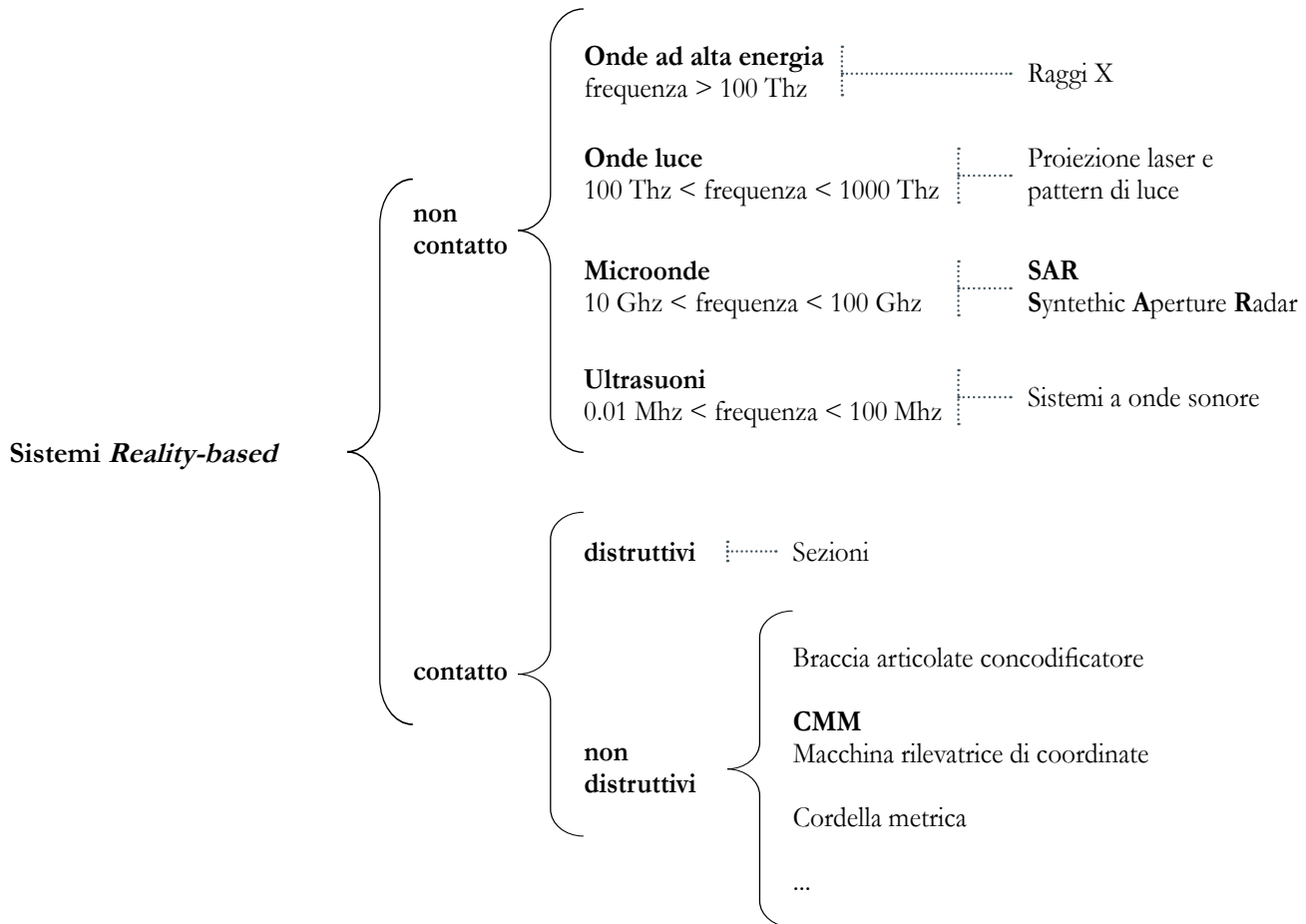


Fig. 2 - *Classificazione dei sistemi reality-based a contatto e non* [Benedetti B., Gaiani M., Remondino F., **Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei**, Edizioni della Normale, ISBN 978-88-7642-353-6]

I sistemi a contatto, non distruttivi, hanno bisogno di un'ingombrante parte meccanica e di tastatori che li rendono inadatti all'utilizzo su opere d'arte, su oggetti di elevate dimensioni o su superfici non rigide. Necessitano, inoltre, di lunghi tempi di lavoro per ottenere precisioni e accuratezze della misura. Questi inconvenienti sono spesso compensati dai sistemi senza contatto. Tra questi, i sistemi a onde elettromagnetiche nel campo del visibile, risultano molto accurati e si possono classificare, a loro volta, in due grandi famiglie (Fig. 3):

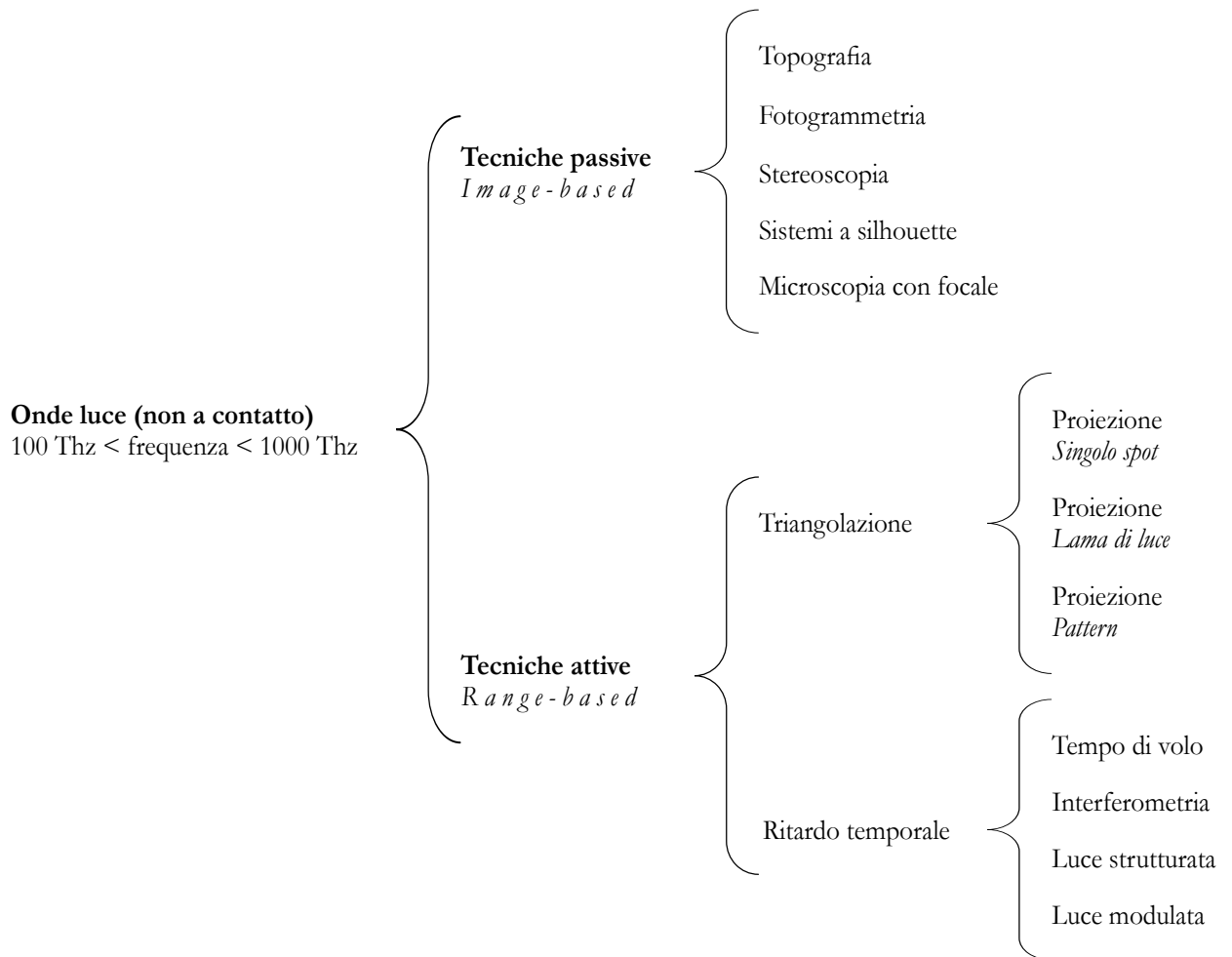


Fig. 3 - Classificazione delle tecniche ottiche, attive e passive [Carosso L., **Studio e applicazione dei sistemi ottici di rilevamento tridimensionale**, Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Sistemi Elettronici, Università degli Studi di Firenze, XX ciclo, 2008 (Tutore: Atzeni C.)]

1) **Sistemi basati su sensori passivi (metodi image-based)**: sfruttano la luce presente nell'ambiente per acquisire immagini da elaborare successivamente per derivarne informazioni 3D della scena osservata. Tra queste tecniche, la *fotogrammetria* è quella più conosciuta ed utilizzata per rilievi cartografici, architettonici, industriali e archeologici, con la precisione e affidabilità dei risultati come obiettivo principale [7].

Una tecnica simile è la *computer vision* che però ha come scopo primario

[7] Remondino F., El-Hakim S., **Image-based 3D modelling: a review**, *The Photogrammetric Record*, vol. 21, n. 107, 2006, pp. 269-291

[8] Barazzetti L., Scaioni M., Remondino F., **Orientation and 3D modeling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation**, *The Photogrammetric Record*, vol. 25, n. 132, 2010, pp. 356-381

[9] Pierrot-Deseilligny M., Clery I., **APEROS, An Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of Set of Images**, in: *LAPRS&SIS*, vol. 38, n. 5/W16, Trento, Italia, 2011, CD-ROM

[10] Remondino F., El-Hakim S., Gruen A., Zhang L., **Turning images into 3D models**, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, n. 4, 2008, pp. 55-64

[11] Vu H. H., Keriven R., Labatut P., Pons J. P., **Towards high-resolution large-scale multiview stereo**, in: *IEEE Proceeding Conference CVPR'09*, 2009, pp. 1430-1437

[12] Furukawa Y., Ponce J., **Accurate, dense and robust multiview stereopsis**, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, vol. 32, n. 8, 2010, pp. 1362-1376

[13] Pierrot-Deseilligny M., De Luca L., Remondino F., **Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation**, in: *Proceeding of 23th International CIPA Symposium*, Prague, Czech Republic, 2011

[14] Vosselman G., Maas H-G. (Eds), **Airborne and terrestrial laser scanning**, CRC, Boca Raton, 318, 2010, ISBN 978-1904445-87-6

l'automazione dell'intero processo di restituzione (2D o 3D) da immagini, riducendo quindi l'accuratezza dei risultati ottenuti.

Al momento il principale vantaggio dei sistemi passivi, e delle relative tecniche di elaborazione, risiede nel costo e nella trasportabilità dei sensori (soprattutto nel caso terrestre) nonché nel fatto che le immagini sono sempre reperibili in archivi storici o banche dati. L'automazione nel processo fotogrammetrico terrestre ha raggiunto livelli soddisfacenti, sia nella fase di orientamento [8, 9] che in quella di correlazione automatica [10, 11, 12, 13].

Sicuramente è richiesta una grande esperienza nell'acquisizione e nel processamento delle immagini. Le immagini possono essere acquisite da sensori montati su satelliti, aeree, droni (o più genericamente UAV). Recentemente i droni hanno avuto un notevole successo e sviluppo, sia nel campo archeologico che architettonico, permettendo di acquisire immagini nadirali o oblique con costi bassi e buona affidabilità.

2) **tecniche basate su sensori attivi (metodi range-based)** [14]: impiegano sistemi che emettono un segnale elettromagnetico (nel campo del visibile, infrarosso, raggi X, ecc.) che viene poi registrato dallo strumento al fine di derivare una misura di distanza (range). Strumenti range-based sono i laser scanner (terrestri o aerei), le stazioni totali, i GNSS, i radar, ecc. e, generalmente, sono progettati per uno specifico campo di utilizzo (pertanto per lavorare in un determinato raggio d'impiego).

Nel campo architettonico e dei Beni Culturali, i laser scanner hanno riscontrato un grande successo e hanno notevolmente aumentato la facilità con la quale possono essere acquisiti dati morfometrici relativi a oggetti piccoli o strutture ampie. Tuttavia, l'elevato numero di informazioni non strutturate richiedono lunghi tempi di editing per estrarre gli elementi geometrici più significativi della scena o crearne un modello geometrico poligonale.

Generalmente un processo che conduce dal rilievo alla modellazione 3D viene attuato combinando diverse tecniche, cercando di sfruttare i vantaggi e sopperire agli eventuali limiti di ciascuna tecnica. La scelta della tecnica migliore o della metodologia d'integrazione dipende da molti fattori: scopo del rilievo, dettaglio geometrico richiesto, tipo di oggetto, materiale, esperienza, budget del progetto, ecc. Identificare il migliore approccio è la prima e fondamentale fase per riuscire a raggiungere gli obiettivi prefissati.



CAMPI DI APPLICAZIONE

Un modello tridimensionale è il risultato di un processo di acquisizione e codifica binaria delle dimensioni e caratteristiche superficiali, colore incluso, di un oggetto fisico.

Abraham Moles, ancora prima della nascita dell'informatica della seconda generazione, spiega che “[...] *la quantità delle informazioni relativa aumenta a dismisura facendo ricorso a forme descrittive di livello d'iconicità più basso rispetto all'originale; per tutto ciò che è intrinsecamente tridimensionale come una vettura, una casa, ma anche una città, un territorio o un sito archeologico, la rappresentazione che si serve di modelli 3D, aiuta a migliorare non solo la visualizzazione, o la conservazione delle informazioni, ma soprattutto la loro definizione, semplificando l'organizzazione e integrando la restituzione con un sistema di dati conoscitivi*” [15].

I modelli 3D sono impiegati in varie applicazioni:

- repliche;
- reverse engineering;
- applicazioni mediche;
- intrattenimento;
- applicazioni spaziali;
- Beni Culturali.

[15] Moles A., **Teoria
informazionale dello schema**,
Versus, n. 2, 1972, pp. 29-37

Repliche

Dai modelli virtuali possono essere ricavati modelli fisici per documentare lo stato di fatto di un manufatto oppure ipotizzare integrazioni o ricostruzioni, in scala reale, di singoli elementi, o in scala ridotta, dell'intero oggetto, con tecniche di modellazione (Fig. 4) additive (prototipazione rapida, stampa 3D) o sottrattive (fresatrici CNC).

La prototipazione rapida, di recente sviluppo industriale, si differenzia dalle tecniche tradizionali di lavorazioni meccaniche perché, mentre queste ultime operano per asportazione di materiale ottenendo la forma voluta da un blocco, le tecniche RP operano su una base concettuale inversa, ossia per addizione di materiale, con la possibilità di poter ottenere forme anche molto complesse, impossibili da realizzare con le lavorazioni tradizionali, semplicemente aggiungendo materiale strato per strato.

Nonostante sia una tecnica piuttosto recente, i materiali e le macchine evolvono continuamente. Ogni casa costruttrice ha sviluppato e continua a sviluppare una propria tecnica con l'impiego di materiali molto differenti tra loro (polveri, liquidi, solidi).



Fig. 4 - Sistemi per la produzione di modelli fisici. A sinistra, macchine CNC: in alto, fresatrice verticale e in basso, orizzontale. In alto: a sinistra, strumento di prototipazione rapida; a destra, schema del funzionamento della tecnica Fused Deposition Modelling (FDM) che usa fili e barrette di materiale termoplastico, depositato su un vassoio da una testina capace di muoversi lungo 3 assi

Reverse engineering

Termine comunemente usato per indicare l'insieme di processi che, a partire da un oggetto reale antropico (in genere opere d'ingegneria quali per esempio dispositivi o parti meccaniche, scocche di automobili, carene di imbarcazioni, fusoliere, ali, ecc.), ne analizza in dettaglio i principi di funzionamento per creare una copia virtuale con eventuali variazioni. Le motivazioni che spingono alla realizzazione di un progetto di reverse engineering nascono quando il disegno del progetto originale è andato perduto o quando si vogliono effettuare analisi di conformità.

Il campo d'interesse è molto vasto e la tipologia di oggetti in questione è nella maggior parte dei casi di forma e dimensioni tali che non è possibile definire delle direttive operative. Il processo è comunque riconducibile a un processo di modellazione 3D inversa con l'aggiunta di particolari procedure di analisi spaziale. Il primo step del reverse engineering è il rilievo parziale o totale dell'oggetto di cui si vuole ricostruire il modello matematico; il secondo step è rappresentato dall'elaborazione dei dati ottenuti, attraverso operazioni di riduzione, chiusura buchi, smoothing, fino ad ottenere un file poligonale (es. formato STL) opportunamente "filtrato" e pulito da eventuali componenti o particolari presenti sulla digitalizzazione ma non necessari per la ricostruzione (Fig. 5).

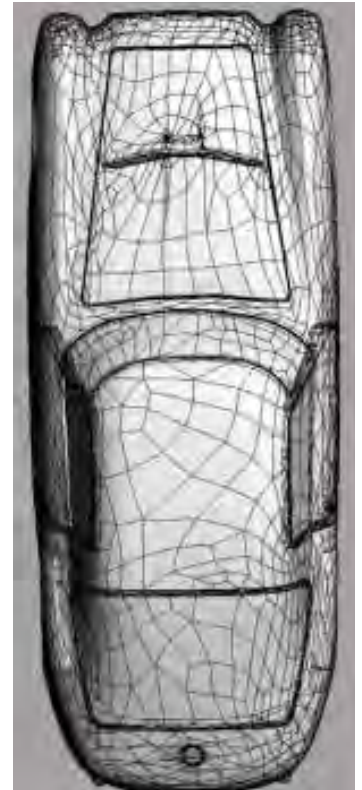


Fig. 5 - Ferrari 250MM del 1953. A destra, dall'alto: foto, modello di punti, modello di superficie, modello CAD. In alto, replica in scala 1:10 ottenuta da un modello di 75 Mb di triangoli [Sansoni G., Docchio F., **Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications**, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, n. 20, 2004, pp. 359-367]



Fig. 6 - Applicazioni mediche. Sopra, dall'alto: progettazione di protesi; scanner intraorale; schema di scansione del cavo orale; modello derivante e progettazione dell'impianto.

A destra, testa del paziente scannerizzata (i punti di interesse sono selezionati con un semplice mouse e sono mostrati in rosso). I dati permettono di individuare correttamente la zona da operare oppure simulare il risultato estetico desiderato o, ancora, di addestrarsi chirurgicamente.

Applicazioni mediche

In campo medico la digitalizzazione del corpo umano o di singoli organi ha grande importanza nella realizzazione di modelli virtuali per la didattica, per gli studi antropomorfici ed ergonomici e per lo studio al computer di nuove tecniche chirurgiche.

In particolare, i dati 3D hanno un ruolo fondamentale in tutti gli ambiti medicali che richiedono la ricostruzione di tessuti morbidi e duri nei diversi ordini di grandezza [16], quali:

- la produzione di elementi protesici esterni;
- l'analisi della superficie cutanea (misura della pulsazione arteriosa e della vibrazione delle corde vocali) e la diagnosi di malattie (cardiovascolari, epidermiche, ecc.);
- l'Image-guided surgery e le simulazioni chirurgiche;
- la biomeccanica, l'ortopedia;
- l'odontoiatria (Fig. 6).

[16] Guggia S., **Scanner laser 3D per applicazioni biomediche**, Tesi di laurea in Ingegneria Biomedica, Università di Padova, 2010 (relatore: Pelizzo M. G. / correlatore: Bonora S.)



Intrattenimento

La modellazione tridimensionale è usata anche in una sempre più vasta area della cinematografia. Per inserire, ad esempio, oggetti virtuali in movimento nelle sequenze filmate, si effettuano scansioni di modelli in scala ridotta che sono poi animati con l'aiuto del computer.

Un esempio di grande successo degli ultimi anni è il kolossal 3D di James Cameron "Avatar" del 2009. La tecnica basilare è la *Performance capture* realizzata con un mix di modelli tridimensionali (Fig. 7) connessi in modo diretto ai corpi degli attori che vengono letteralmente rivestiti da sensori e microtelecamere che li riprendono per tutta la durata delle scene, rilevando ogni dettaglio espressivo dei volti e rendendo immediatamente visibili questi sull'immagine al PC, l'Avatar per l'appunto. I dettagli espressivi del viso degli attori vengono ripresi costantemente da una telecamera montata in modo da riprenderli di continuo.

Le immagini sono trasmesse a un complesso sistema informatico che le elabora e rende possibili le espressioni facciali sull'avatar realizzato al computer. Allo stesso tempo decine di cameramen riprendono il tutto da diverse angolazioni così che in un momento successivo possano essere rielaborate in alta definizione (Fig. 8).

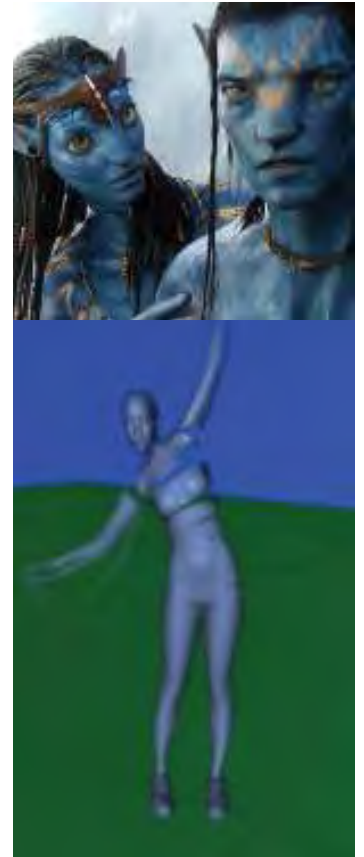


Fig. 7 - AVATAR. In alto, a destra il modello tridimensionale del personaggio Zoe; sopra, alcune immagini del backstage [<http://www.warlandia.it/zero/articoli.asp?action=mostra&ID=394>]

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

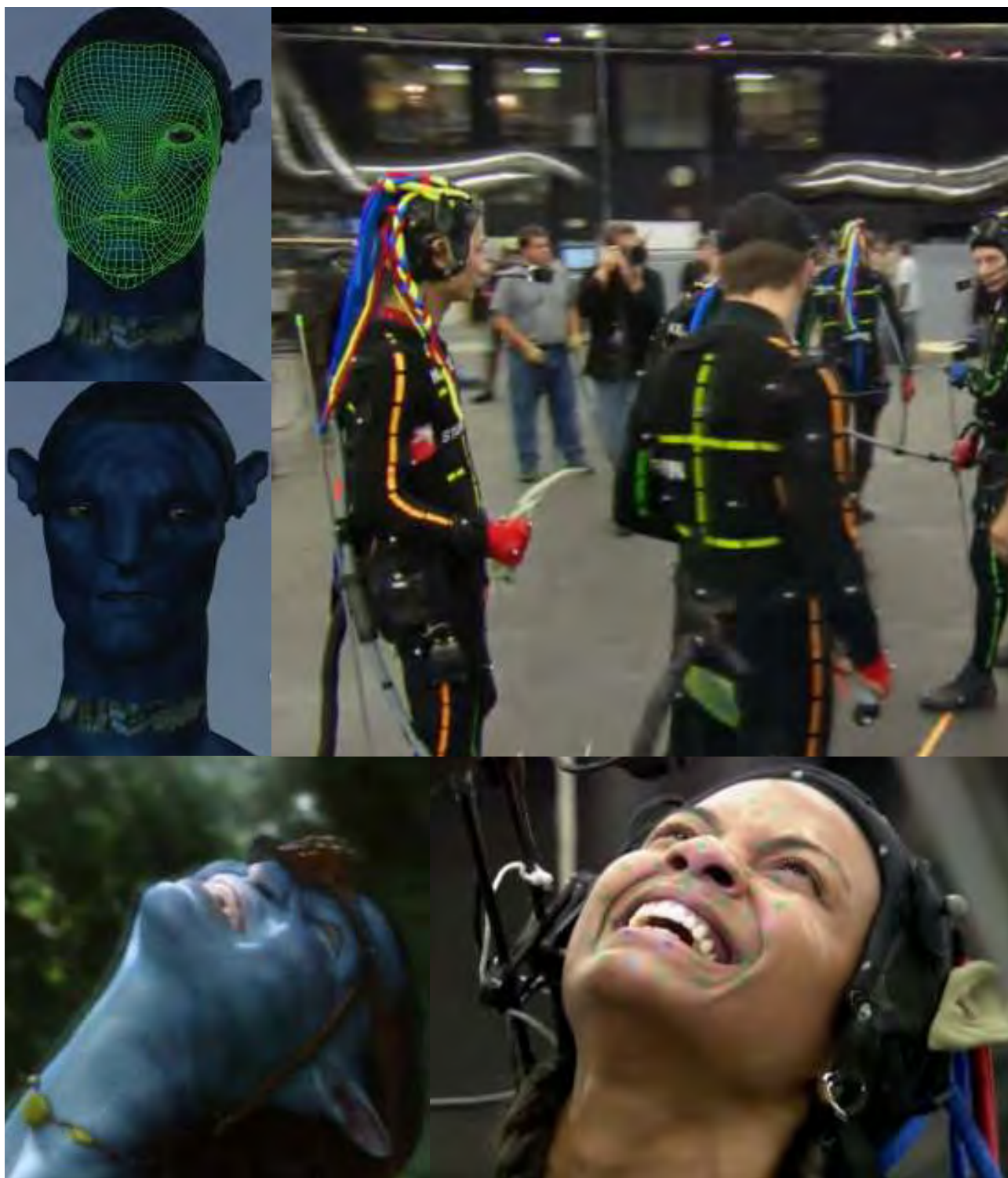


Fig. 8 - AVATAR. In alto, a sinistra il modello tridimensionale del personaggio Sam; sopra, alcune immagini del backstage [<http://www.warlandia.it/zero/articoli.asp?action=mostra&ID=394>]

Applicazioni spaziali

In ambito spaziale è stato sviluppato nel 2001, dall'*Institute for Information Technology del National Research Council of Canada* in collaborazione con la *Canadian Space Agency* e la *NASA*, un prototipo di laser range camera, chiamato *3D Advanced Space Vision System (ASVS)*. Lo strumento effettua una scansione della zona utilizzata per l'attracco ed elabora in tempo reale i dati ottenuti in modo tale da fornire una mappa digitale tridimensionale e favorire una più agevole manovra di avvicinamento del pilota.

I modelli precedenti, gli *Space Vision System (SVS)*, dotati di normali telecamere 2D (Fig. 9) in grado di riprendere la zona d'attracco, sono stati sostituiti dai 3D ASVS perché avevano il grave svantaggio di produrre un'importante ambiguità nella visione bidimensionale a causa della presenza di fonti di luce intense, come quella solare.



Fig. 9 - *Space Vision System (SVS)* [<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/missions/sts-115/vision.asp>]

APPLICAZIONE AL CAMPO DEI BENI CULTURALI

I modelli tridimensionali per le applicazioni ai Beni Culturali hanno l'obiettivo principale di fornire agli operatori del settore nuovi mezzi di conoscenza essendo rappresentazioni digitali fedeli e misurabili dell'oggetto reale.

Le recenti tecnologie per l'acquisizione digitale hanno aperto prospettive innovative nel campo della conservazione, della riproduzione, dello studio e della fruizione di opere scultoree, architettoniche ed archeologiche.

I primi esempi di applicazione delle tecnologie di scansione tridimensionale ai Beni Culturali sono state sperimentate dal *National Research Council Canada* estendendosi, negli ultimi anni, all'intero panorama internazionale. La stessa Italia, grazie alla ricchezza del suo patrimonio storico artistico, ha avviato una serie di interessanti applicazioni.

A partire dal 1997 furono eseguiti due pionieristici progetti di acquisizione:

- la **Pietà di Michelangelo** (Figg. 10, 11), gruppo scultoreo in marmo alto più di due metri conservato presso il Museo dell'Opera del Duomo di Firenze. Il progetto, sviluppato dal *IBM T. J. Watson Research Center* di Yorktown Heights in collaborazione con il Museo dell'Opera del Duomo di Firenze, ha previsto l'acquisizione 3D attraverso l'uso di una camera a proiezione di luce strutturata dotata di 6 CCD, che consentiva di raggiungere una risoluzione laterale di circa 2 mm.



Fig. 10 - Pietà di Michelangelo. In alto, foto del modello 3D. In basso, a sinistra, lo scanner utilizzato nel progetto, Virtuoso ShapeCamera.





Fig. 11 - Pietà di Michelangelo. Acquisizione 3D e modello texturizzato [fig. 2 di Bernardini F., Rushmeier H., Martin I. M., Mittleman J., Taubin G., **Building a Digital Model of Michelangelo's Florentine Pietà**, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, pp. 59-67]

Fig. 12 - Madonna col Bambino. A destra, in alto, foto della statua; in basso, sequenza delle riprese individuali della testa e delle spalle e modello complessivo 3D

- la **Madonna con Bambino** (Fig. 12) di Giovanni Pisano, statua scolpita a tutto tondo e conservata nella Cappella degli Scrovegni di Padova. Il progetto, sviluppato dal *National Research Council Canada* in collaborazione con l'Università di Padova, ha previsto l'acquisizione 3D attraverso l'uso di un laser a triangolazione (Biris) in grado di produrre misure con risoluzione di 0,5 mm.



Nel 1998 è stato avviato il **Digital Michelangelo Project**, condotto a Firenze da ricercatori della Stanford University, nell'ambito del quale venne realizzato il modello tridimensionale del David di Michelangelo (Fig. 13) conservato presso la Galleria dell'Accademia. E' stato usato un laser scanner a triangolazione associato ad un sistema di movimentazione meccanica appositamente progettato per coprire l'intera estensione della statua, alta 5 m e posta su un piedistallo alto quasi due metri, ottenendo un risoluzione attorno a 0,25 mm.

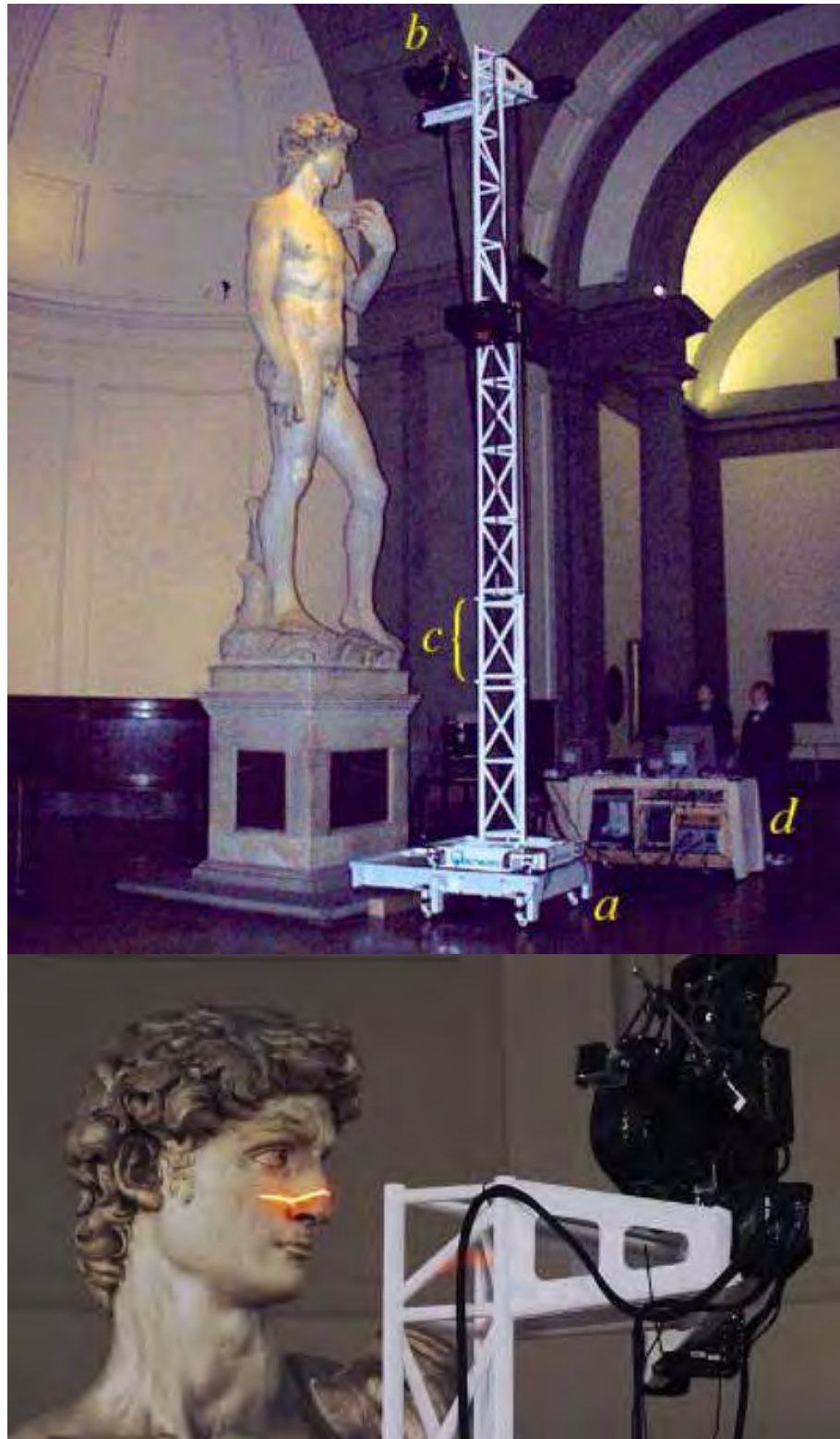
Dopo il 1998 sono stati numerosi gli esempi di applicazione ai Beni Culturali, anche da parte dell'Università degli Studi di Firenze. Gli esperimenti più



**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

*Fig. 13 - David di Michelangelo.
Acquisizione 3D della statua.
La piattaforma di base (a) sostiene
il traliccio sul quale è montato lo
strumento di misura (b).
Un modulo di traliccio (c) è stato
aggiunto in fase successiva per
aumentare l'altezza di presa,
inizialmente sottodimensionata
rispetto alla realtà.
Lo scanner è gestito da un banco di
lavoro mobile (d).
In basso, un dettaglio della fase di
acquisizione del volto del David*



significativi riguardano:

- la **Maddalena** di Donatello (Fig. 14), una grande scultura lignea conservata nel Museo dell'Opera del Duomo. Il progetto, sviluppato dal Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni dell'Università degli Studi di Firenze in collaborazione con l'Institute for Information Technology del National Research Council of Canada e il Museo dell'Opera di Santa Maria del Fiore di Firenze a partire dal 2000, ha previsto l'impiego dello scanner Optonet a proiezione di frange, dotato di un proiettore LCD e di una camera CCD.



Fig. 14 - Maddalena di Donatello. Da sinistra, foto della statua; immagine del modello 3D costituito dalle 374 range maps, ognuna di colore diverso; alcune foto della fase di presa e modello 3D di parte del viso e di un dettaglio dell'occhio destro [Guidi G., Pieraccini M., Ciofi S., Damato V., Beraldin J. A., Atzeni C., **Tridimensional digitizing of Donatello's Maddalena**, *Ieee International Conference on Image Processing (ICIP 2001)*, Grecia, Thessaloniki, 7-10 Ottobre 2001, n. 10, pp. 578-581]

- l'**Adorazione dei Magi** di Leonardo da Vinci (*Fig. 15*), dipinto a olio su tavola conservato nella Galleria degli Uffizi di Firenze. Il progetto, sviluppato nel 2001, ha previsto l'impiego di una range camera 3D basata sulla triangolazione ottica con proiezione di pattern luminosi. E' stato realizzato un modello tridimensionale del grande dipinto nel quale sono stati evidenziati, per la prima volta, i notevoli scostamenti dalla planarità originale del supporto ligneo e i difetti della superficie pittorica.

Fig. 15 - Adorazione dei Magi di Leonardo. Foto del dipinto



- il **David di Donatello** (*Fig. 16*), scultura in bronzo conservata nel Museo nazionale del Bargello di Firenze. Il progetto, sviluppato nel 2003 dal Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni dell'Università degli Studi di Firenze in collaborazione con l'Institute for Information Technology del National Research Council of Canada, ha previsto l'impiego del laser radar a tempo di volo LR200. Sono stati selezionati cinque punti di vista intorno alla statua in modo da acquisire



Fig. 16 - David di Donatello. In alto, a sinistra, foro della statua; a destra, immagini del modello 3D. Al lato, alcuni dettagli [Guidi G., Cioci A., Spinetti A., Atzeni C., Cassani C., Lupus A., Digital Three-dimensional modeling of Heritage by frequency-modulated laser radar: the case of Donatello's David, in: *Electronic imaging & Visual Arts (EVA) Proceedings*, Firenze, 2004, pp. 261-266]

la maggior parte della sua superficie. L'intera scultura è stata scansionata in modalità automatica da ogni punto di vista, selezionando in maniera appropriata le dimensioni delle aree da acquisire. Sebbene il tempo per ogni punto di vista sia risultato relativamente lungo a causa della velocità di scansione limitata (50 punti al secondo), un grande vantaggio è derivato dalla possibilità di lasciare il sistema a lavorare per lunghi periodi, come ad esempio la notte, senza la necessità di intervento umano (Fig. 17).

Fig. 17 - David di Donatello. Foto della scena di lavoro [Cioci A., Spinetti A., Carosso L., Atzeni C., Cassani C., Lupus A., **Digital Three - Dimensional Modeling of Heritage by Frequency - Modulated Laser Radar: the case of Donatello's "David"**, in: *6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST) Proceedings*, The Eurographics Association, Pisa, 2005, pp. 89-96]



I modelli 3D offrono, dunque, un ampio ventaglio di utilizzi nei settori:

- della catalogazione e classificazione (creazione di archivi digitali);
- della riproduzione materica (creazione di copie fisiche);
- del Computer Aided Restoration (a supporto del restauro);
- della ricostruzione virtuale;
- del monitoraggio;
- della creazione di ambienti virtuali;
- della fruizione remota.



Creazione di archivi digitali

I modelli 3D costituiscono un'importante ed innovativa risorsa nella creazione di archivi digitali nei campi della catalogazione e della classificazione.

La **catalogazione** del patrimonio storico e artistico, disciplinata dall'art. 17 del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 42/2004), è da considerarsi fondamentale per la generale attività di tutela, sia sotto il profilo della conoscenza delle opere e della programmazione degli interventi finalizzati alla conservazione delle stesse, sia perché le conoscenze sistematicamente organizzate offrono un valido supporto all'azione preventiva ed efficace contro le azioni criminose che colpiscono le testimonianze artistiche e culturali del nostro paese. Indispensabile, pertanto, ai fini della gestione, valorizzazione e, in particolare, della tutela dei beni culturali, l'atto scientifico della catalogazione è da intendersi come raccolta organizzata del maggior numero di informazioni su un'opera d'arte, che consente un sistematico rilevamento dei beni di notevole interesse storico-artistico del territorio nazionale, sia di proprietà del demanio o di enti, che di proprietà privata. Il decreto attribuisce al Ministero, con il concorso delle Regioni e con l'eventuale collaborazione delle Università, il compito di individuare e definire metodologie comuni di raccolta, di scambio, accesso ed elaborazione dei dati a livello nazionale. Tale innovazione, sia metodologica che tecnologica, investe non solo i metodi di catalogazione informatizzata, ma esprime anche una rinnovata visione del ruolo delle diverse istituzioni che operano nell'ambito della tutela, conoscenza e valorizzazione del patrimonio artistico e culturale, favorendo una proficua collaborazione, principalmente in termini di programmi concordati e di standard di catalogazione validi su tutto il territorio nazionale.

Nell'ambito della catalogazione, i metodi tradizionali di documentazione presentano limiti evidenti. L'introduzione di accurati modelli tridimensionali permette di:

- preservare nel tempo una descrizione "completa" delle caratteristiche di forma del bene;
- conservare stringhe bibliografiche, apparati testuali, suoni, immagini, disegni, fotografie, filmati e modelli, organizzati per la trasmissione e la fruizione;
- riunificare opere appartenenti a collezioni fisicamente distanti fra loro;
- consultare e studiare le opere da remoto e/o da web.

Si riporta, a titolo esemplificativo, il progetto **CENOBIMUM** (Cultural Electronic Network Online: Binding up Interoperably Usable Multimedia - <http://cenobium.isti.cnr.it/>) sviluppato dal Kunsthistorisches Institut Max Plank in Florenz in collaborazione con l'ISTI/CNR di Pisa dal 2006 al 2010 (Fig. 18). Scopo del progetto è rendere accessibili, in formato virtuale, capitelli di chiostrini romanici nell'area mediterranea dei secoli XII e XIII. Da un lato i capitelli vengono presentati nel loro contesto architettonico e storico, dall'altro il progetto supporta esigenze di ricerca, di insegnamento e di tutela dei Beni Culturali tramite l'utilizzo di fotografie digitali ad alta risoluzione, modelli 3D, panoramiche e un'applicazione informatica interattiva. I primi capitelli oggetto di studio sono stati quelli dei chiostrini di Monreale e Cefalù in Sicilia, quelli di Sant'Orso ad Aosta, in quanto principali cicli di capitelli istoriati in Italia; sono previste nuove campagne in Spagna.

Nonostante siano stati compiuti diversi tentativi di individuare standard digitali per il patrimonio culturale nel campo dell'archiviazione digitale di oggetti tridimensionali, tra cui si ricorda il "Core of Architecture" sviluppato dal Getty Trust, le metodologie e gli strumenti individuati sono stati spesso vaghi e non consistenti, solitamente tipologicamente eterogenei tra loro, talvolta riferiti a problematiche bidimensionali già superate, e spesso incapaci di restituire il valore aggiunto della tridimensionalità rispetto al disegno su supporto cartaceo.

La maggior parte di questi sforzi dimostra peraltro lacune nell'affidabilità di delle informazioni e nell'utilizzo appropriato degli strumenti di rappresentazione, problemi a lungo discussi dai ricercatori nell'ambito di conferenze e workshop su queste tematiche, senza però giungere all'elaborazione di standard e linee guida per un utilizzo condiviso e sempre univocamente leggibile.

"[...] La conservazione in forma digitale del patrimonio culturale richiede sforzi da parte di governi, amministrazioni, del mondo industriale e delle istituzioni incaricate della conservazione del patrimonio storico. All'interno dell'attuale dibattito su questo tema è necessario rafforzare la cooperazione internazionale e la solidarietà al fine di consentire a tutti i Paesi la creazione, la diffusione, la conservazione e l'accesso continuo al proprio patrimonio digitale" [17].

[17] UNESCO, *Charter on the Preservation of the Digital Heritage*, 2003



Fig. 18 - Progetto CENOBIMUM: Possibilità di confrontare due modelli 3D nella stessa schermata [http://cenobium.isti.cnr.it/index.php]



Tuttavia, la catalogazione da sola non è sufficiente ad assistere, ad esempio, gli scavi archeologici e la gestione dei siti archeologici; spesso, una delle esigenze alla base del lavoro di archeologi e di studiosi che devono interpretare i reperti e ipotizzare una ricostruzione virtuale del sito, è quella di avere a disposizione

una sorta di abaco di elementi architettonici che, sebbene attualmente inseriti in un contesto e interrelati fra loro, possano essere analizzati anche come elementi isolati, considerati indipendentemente dalle loro attuali connessioni spaziali, ai fini di una ri-lettura e interpretazione dell'esistente e di ciò che non esiste più.

E' per rispondere a tali obiettivi che nasce la **classificazione semantica**, ossia il processo di segmentazione caratterizzato dall'individuazione dei singoli elementi di un modello 3D e della loro terminologia, dall'identificazione delle relazioni tra loro esistenti e dalla definizione dei volumi che essi occupano.

Creare modelli digitali di manufatti significa dare forma ad un sistema conoscitivo in grado di organizzare un modello semantico al quale può essere riferito il sistema di gestione e richiamo delle informazioni. Si tratta di una collezione di oggetti gerarchicamente organizzati, identificati attraverso un preciso vocabolario architettonico, scomponibili in sub-elementi a partire dalla loro analisi e composizione formale e strutturale. L'organizzazione gerarchica degli elementi presuppone una particolare attenzione verso le modalità con cui gli oggetti sono assemblati da punti di vista tipologici e morfologici.

Uno dei più evidenti vantaggi di un meccanismo di modellazione semantica, oltre ad un migliore controllo topologico, è la possibilità della generazione di un meccanismo a multi-risoluzione basato su caratteristiche semantiche architettoniche, e quindi la possibilità di creare modelli a differente risoluzione, mantenendone chiara la leggibilità come elementi tipologicamente codificati [18].

A titolo esemplificativo, si riporta il progetto **Fortuna visiva di Pompei** (<http://pompei.sns.it>) sviluppato, a partire dal 2002 e ancora in corso, dalla Scuola Normale Superiore di Pisa in collaborazione con la Soprintendenza Speciale per Beni Archeologici di Napoli e Pompei e Sistemi Informativi Liberologico S.r.l.

(Fig. 19).

L'obiettivo principale è di integrare in un unico archivio digitale strutturato, che sia implementabile e consultabile on-line, tutte le risorse ed i contenuti digitali esistenti sul sito archeologico di Pompei. Il Sistema Informativo Unificato (SIU) integra anche un progetto scientifico promosso e realizzato in collaborazione dalla Soprintendenza Speciale per Beni Archeologici di Napoli e Pompei con la partnership del Deutsches Archäologisches Institut in Rom (DAIR).

[18] Gaiani M., Benedetti B., Apollonio F. I., **Teorie per rappresentare e comunicare i siti archeologici attraverso modelli critici**, *SCIRES-IT (SCientific RESearch and Information Technology)*, CASPUR-CIBER Publishing, vol. 1, Issue 2, ISSN 2239-4303, DOI 10.2423/i22394303v1n2p33, 2011, pp. 33-70

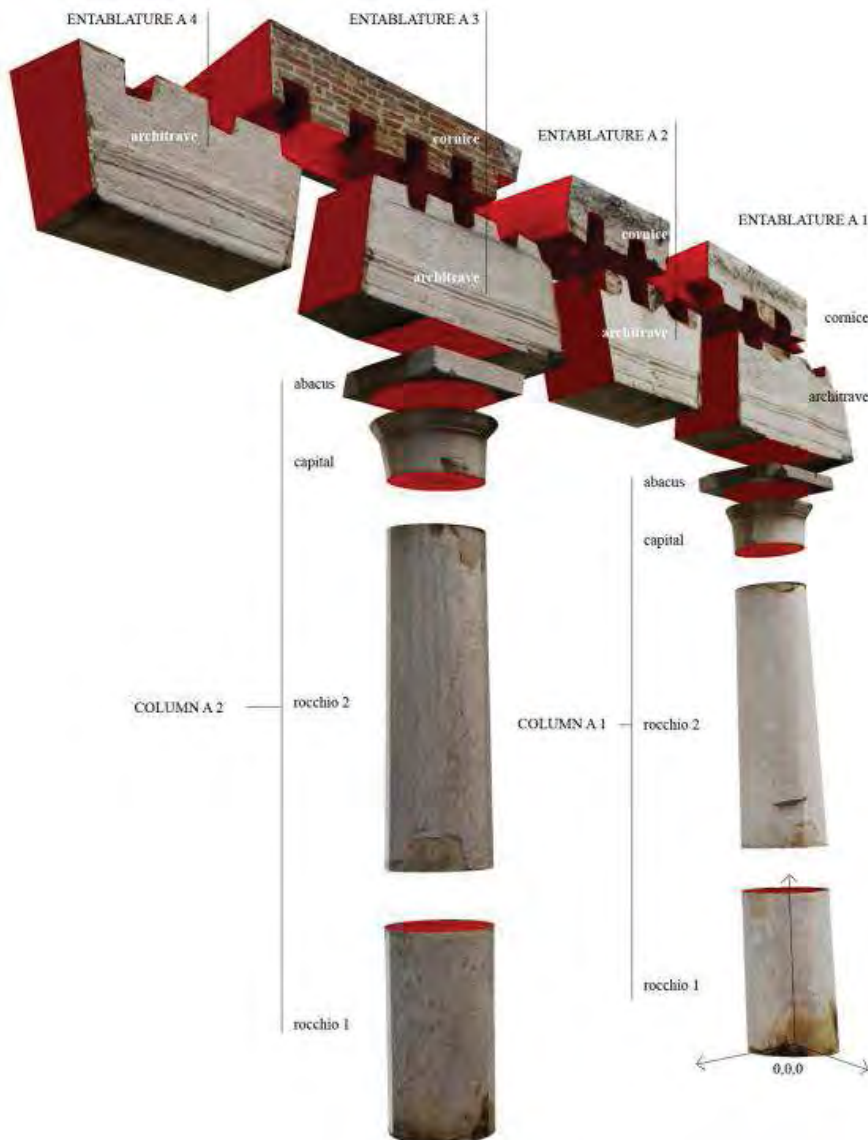


Fig. 19 - Sito archeologico di Pompei, interfaccia web del 3D GIS SIU (Sistema Informativo Unificato): in alto, struttura semantica del modello 3D del reperto 243-252; a destra, in alto, reperto 148; al centro, base dati iconografica del reperto 147; in basso, reperto 243. Selezionando le unità in cui è stato suddiviso il modello 3D, si può accedere alle corrispondenti informazioni conservate nel database archeologico [Manferdini M., Remondino F., Baldissini S., Gaiani M., Benedetti B., **3D modeling and semantic classification of archaeological finds for management and visualization in 3D archaeological databases**, in: *14th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM) Proceedings*, Limassol, Cyprus 2008, pp. 221-228]

Copie fisiche

La disponibilità di un modello digitale 3D rende possibile, con le attuali tecnologie, di realizzarne anche riproduzioni materiche in diversi materiali (materiali plastici, resine, materiali lapidei, gesso, ecc.). Queste tecnologie sono assolutamente non distruttive e permettono di ottenere un'elevata precisione di riproduzione.

La possibilità di poter riprodurre rapidamente un'opera qualsiasi facilita notevolmente la produzione di copie da sostituire all'originale (in caso di restauro, esposizione ad agenti inquinanti e così via). Tale tecnica è destinata a sostituire, nel futuro, l'impiego dei calchi in gesso (*Fig. 20*) per i suoi evidenti vantaggi:

- accuratezza più elevata;
- indeformabilità (i calchi, normalmente prodotti con materiale siliconico, tendono a deformarsi col tempo, soprattutto nel caso che l'oggetto da riprodurre sia di grande formato);
- possibilità di generare copie in qualsiasi scala di riproduzione;
- è una tecnica non distruttiva e non invasiva (l'originale non viene mai toccato in alcuna maniera), mentre invece sono noti gli effetti parzialmente distruttivi del calco in silicone (rimozione di patine o di porzioni di materiale non coerente);

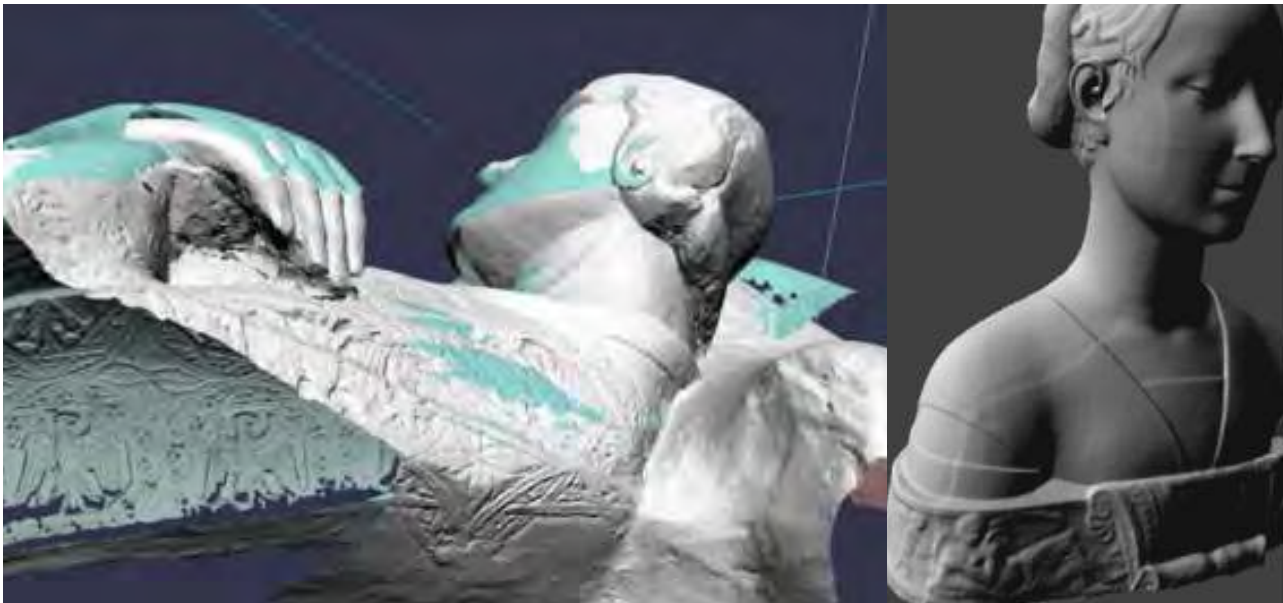


Fig. 20 - Acquisizioni 3D da calchi in gesso. A sinistra, il modello 3D di Arrigo VII giacente: la comparazione della scansione dell'originale (in verde) e della scansione del calco (in grigio), ha evidenziato una deformazione del calco di alcuni centimetri (soprattutto nella zona delle mani e del cuscino). A destra, nel modello 3D del busto di Laurana, sono evidenti le linee di giuntura dei due gusci

- non presenta linee di saldatura (come nel caso delle copie da calco, in corrispondenza alla giustapposizione tra le varie porzioni del calco in silicone).

Si ricorda, inoltre, che le attuali disposizioni legislative dell'art. 107 del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, D. Lgs 42/2004, recita:

"[...] È di regola vietata la riproduzione di beni culturali che consista nel trarre calchi dagli originali di sculture e di opere a rilievo in genere, di qualunque materiale tali beni siano fatti. Sono ordinariamente consentiti, previa autorizzazione del soprintendente, i calchi da copie degli originali già esistenti. Le modalità per la realizzazione dei calchi sono disciplinate con decreto ministeriale". In tale normativa si fa specifico riferimento a procedure di replica con metodologie non a contatto quali fotogrammetria, olografia laser, scanner tridimensionali.

A titolo esemplificativo, si riportano alcuni esempi di copie:

- **Tomba di Tutankhamon** (Figg. 21, 22), replica realizzata dalla Foundation for Digital Technology in Conservation di Madrid, in occasione del 90° anniversario della scoperta, per creare una visita sostitutiva al museo del Cairo (2009).

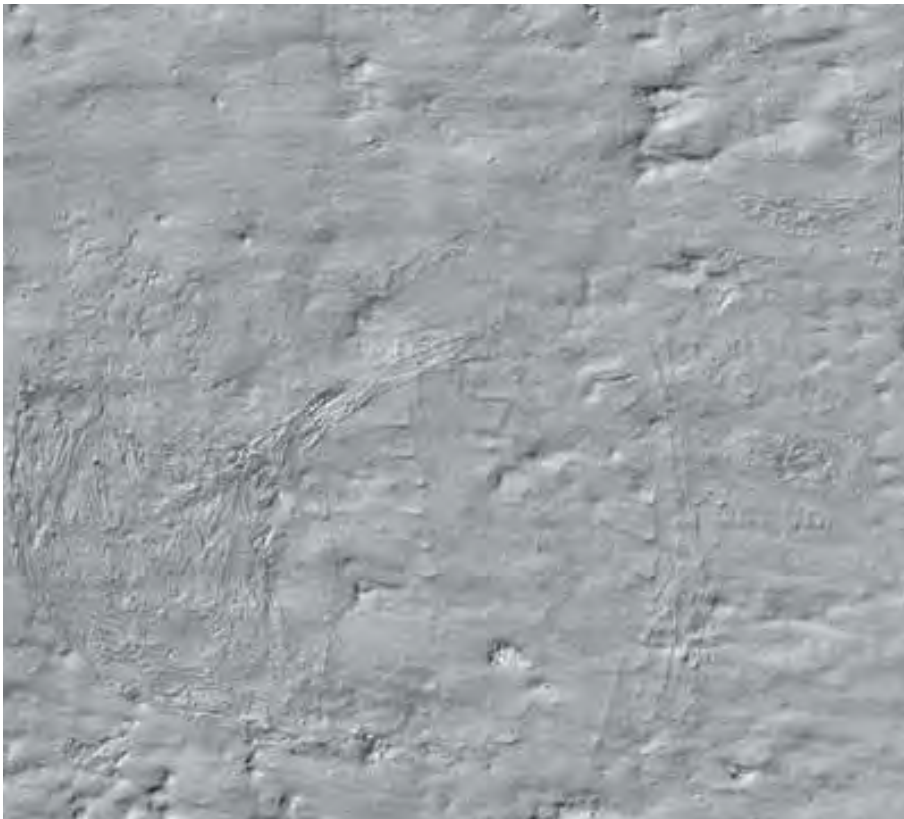
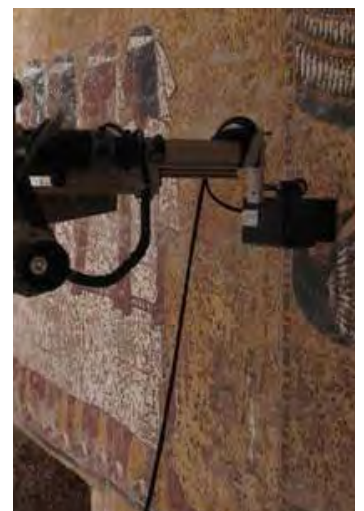


Fig. 21 - Camera di sepoltura di Tutankhamon. In basso, rilievo con Seti laser scanner ad una risoluzione di 100 micron; a sinistra, modello 3D (100 milioni di punti al m²). In alto, alcune fasi dell'installazione della replica [http://www.factum-arte.com/publications_PDF/Tutankhamun_Report_may2009.pdf]



**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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



Fig. 22 - Camera di sepoltura di Tutankamon. A destra, Macchina CNC (Computer Numerical Control). A sinistra, in alto, riproduzione solida derivata dal modello 3D; in basso, riproduzione solida con applicazione della stampa trasferibile ottenuta dal rilievo fotografico. In basso, alcune immagini dell'installazione della replica [http://www.factum-arte.com/publications_PDF/Tutankhamun_Report_may2009.pdf]



Computer Aided Restoration [19]

Il settore del Computer Aided Restoration fornisce strumenti di supporto al restauro di opere d'arte attraverso l'impiego di mezzi informatici.

Essenzialmente è possibile distinguere due principali modalità d'uso dei modelli digitali 3D nel supporto al restauro: come *strumento di indagine*, ossia come strumento diretto di lavoro nelle fasi di indagine e studio; come *strumento di documentazione/presentazione*, ossia come media ottimale per referenziare spazialmente e presentare ogni altro tipo di informazione.

A titolo esemplificativo, si riporta il caso **The Digital Michelangelo Project** [<http://graphics.stanford.edu/projects/mich>], sviluppato dalle Università di Stanford e Washington in collaborazione con ISTI/CNR di Pisa (1998 - 2004).

I dati 3D sono stati utilizzati, come strumento di indagine, per:

- caratterizzare le diverse classi di esposizione della superficie del David ad agenti precipitativi esterni, quali pioggia o polveri. Una simulazione ha permesso di ottenere una serie di risultati, qualitativi e quantitativi, che permettono di descrivere spazialmente come siano distribuite le aree della superficie del David sottoposte in misura maggiore all'impatto di agenti precipitativi esterni (Fig. 23).

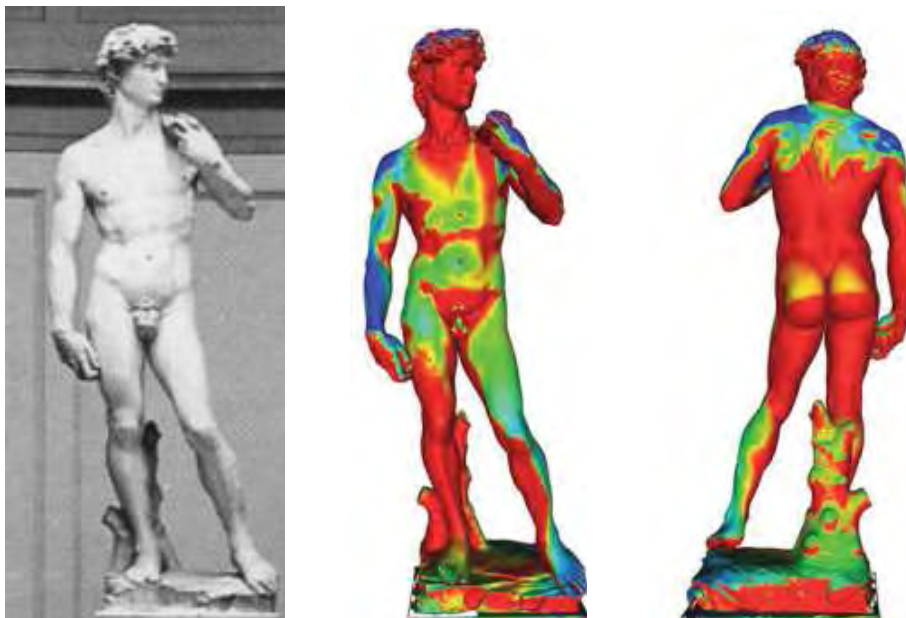


Fig. 23 - David di Michelangelo. A sinistra, foto dell'originale conservato alla Galleria dell'Accademia di Firenze. A destra, modello 3D, visualizzato in falso colore, esposto virtualmente a polveri e altri contaminanti con un angolo di caduta di +/- 10 gradi dalla verticale. In rosso, assenza di ricaduta; in blu, massima densità di ricaduta

[19] Scopigno R., **Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale**, in: S. Campana, R. Francovich (a cura di) *Laser Scanner e GPS: Paesaggi Archeologici e Tecnologie Digitali*, Edizioni All'Insegna del Giglio, 2005, pp. 41-68

- calcolare grandezze fisiche, tra cui particolare importanza hanno assunto il baricentro, la sua linea di caduta verticale ed il volume della statua, poiché ritenute informazioni estremamente importanti per una valutazione delle condizioni statiche dell'opera. Tali misurazioni sono state effettuate, dal Visual Computing Lab del CNR di Pisa, direttamente sul modello digitale dopo opportune elaborazioni (messa a piombo, chiusura dei buchi relativi ad aree non coperte dal rilievo digitale, semplificazione della geometria, ecc.). Le grandezze misurate sono: la posizione spaziale del *baricentro* della statua, localizzato in prossimità dell'inguine; la *proiezione verticale* del baricentro sul basamento della statua (Figg. 24, 25). Infine, è stato calcolato il volume di 2.098 m³; la superficie di 19.47 m² e l'altezza di 516 cm (inclusa la parte scolpita del basamento).

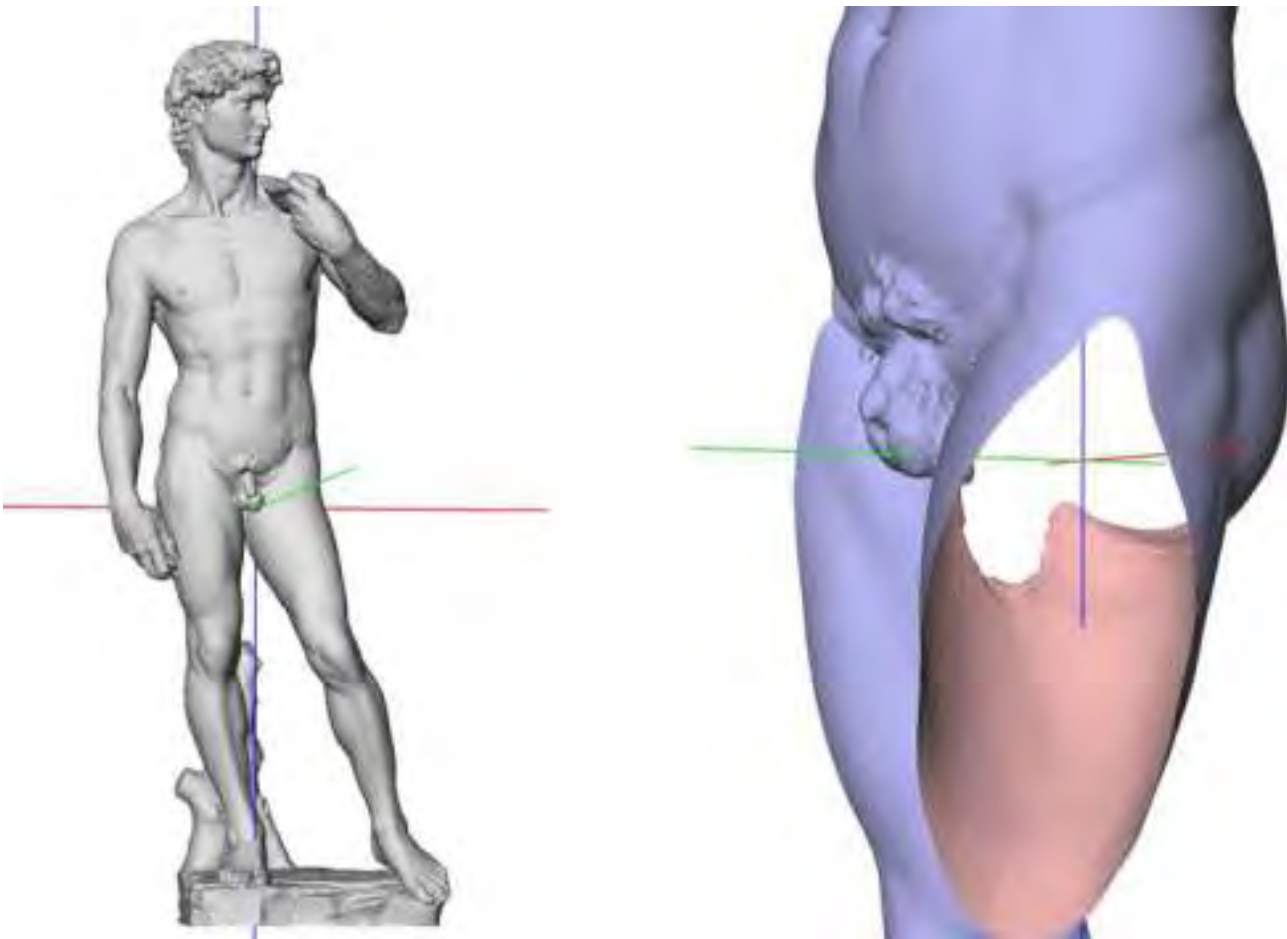


Fig. 24 - David di Michelangelo. Calcolo della posizione spaziale del baricentro e della linea di proiezione verticale (in blu).

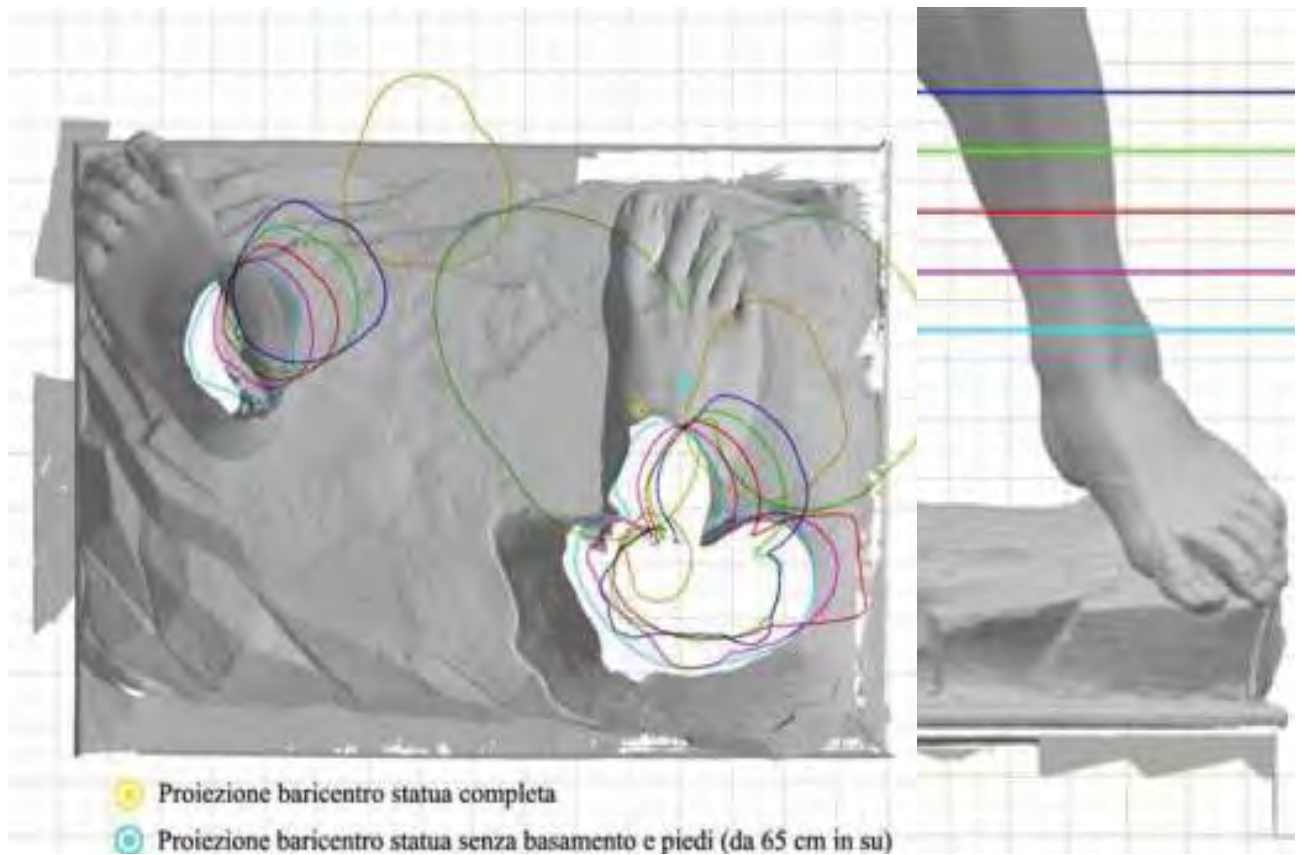


Fig. 25 - David di Michelangelo. Visualizzazione della linea di proiezione in pianta e di alcuni profili sezione (caviglie, ginocchia e inguine). Si noti l'eccentricità del baricentro della statua completa (giallo) rispetto al baricentro della statua senza basamento e piedi (celeste)

- valutare il quadro fessurativo generato dall'inclinazione che la statua aveva assunto a causa di un cedimento disuniforme del terreno di fondazione sotto i carichi derivanti dalla statua (Fig. 26). I moderni strumenti numerici di analisi strutturale hanno permesso di indagare efficacemente sulla veridicità dell'origine del dissesto. Le modellazioni condotte sono state varie, con differenti livelli di approfondimento e sofisticazioni. L'analisi condotta in condizione di perfetta verticalità ha mostrato chiaramente come le zone posteriori del broncone e della caviglia sinistra corrispondano ai punti di maggiori tensioni di trazione (Fig. 27). Il confronto tra le immagini ottenute dalla analisi FEM e le foto della statua non lascia margini a possibili dubbi: le zone maggiormente sollecitate sono proprio quelle nelle quali si sono formate le lesioni (Fig. 28).

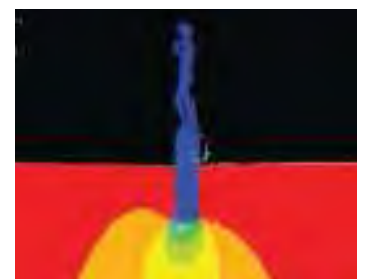


Fig. 26 - David di Michelangelo. Modellazione del terreno sotto la statua (andamento qualitativo) in vista laterale. Si noti la dissimmetria delle tensioni verticali, con una propensione a tensioni (e quindi cedimenti) maggiori nella parte anteriore

I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

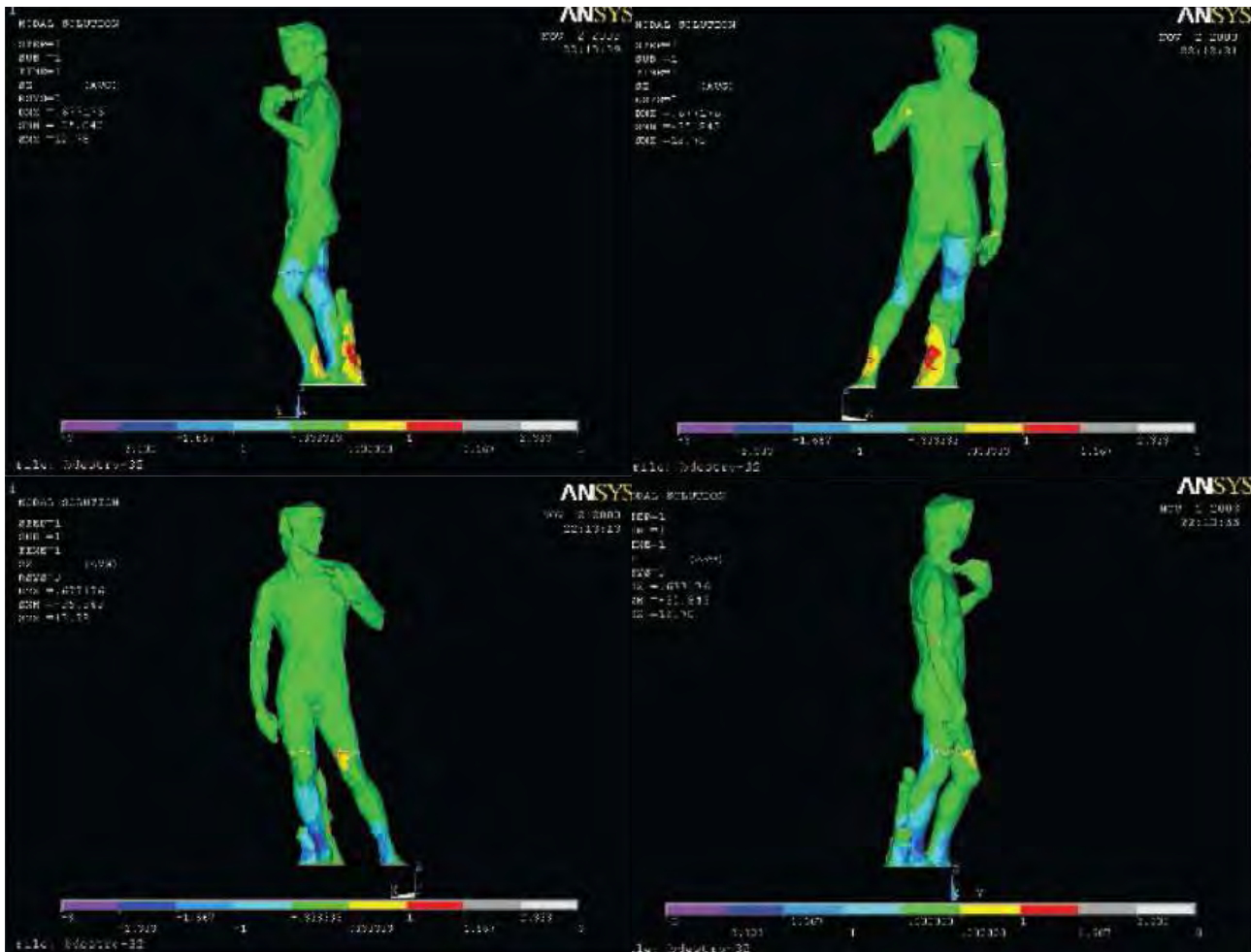


Fig. 27 - David di Michelangelo. Distribuzione delle tensioni verticali nelle condizioni attuali

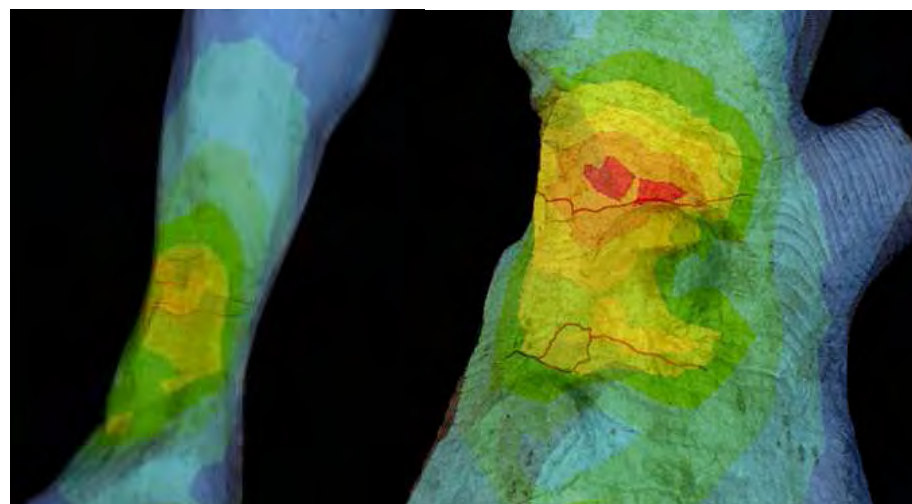


Fig. 28 - David di Michelangelo. Confronto tra quadro fessurativo e zone di massima tensione di trazione

I dati 3D sono stati utilizzati, come strumento di documentazione/presentazione, per:

- indicizzare i dati e rendere evidente la loro referenziazione sulla superficie della statua;
- mappare direttamente sulla superficie digitale alcune informazioni correlate, come ad esempio il campionamento in luce UV, realizzato su supporto fotografico dai tecnici dell'Opificio delle Pietre Dure, che evidenzia la presenza di tracce di materiali organici (Fig. 29).
- riprodurre lo stato di conservazione della superficie marmorea. A seguito di un'accurata ripresa fotografica (Fig. 30), i tecnici dell'OPD hanno riportato su ogni foto, tramite trasparente, lo stato della superficie: presenza di vene o macchie

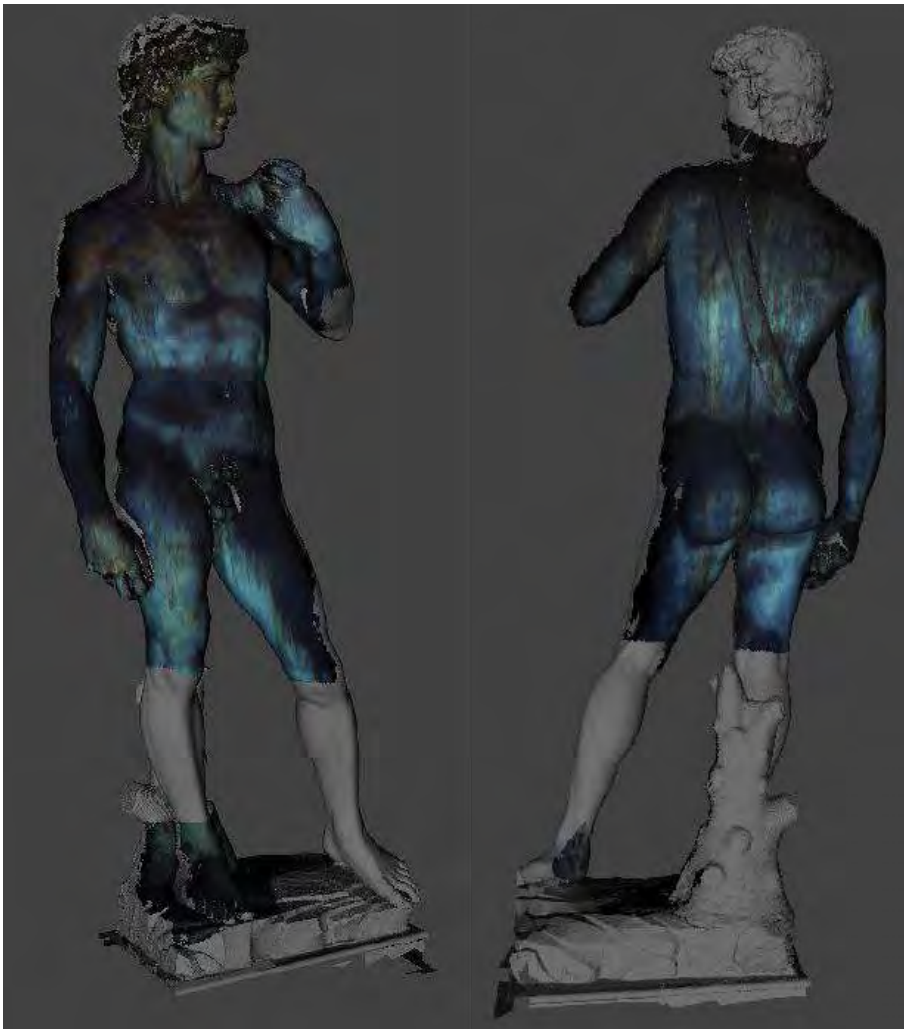


Fig. 29 - David di Michelangelo. Mapping di una immagine UV sulla corrispondente sezione del modello digitale della statua

o depositi, consunzione (*Fig. 31*). Tali elaborati grafici sono stati successivamente digitalizzati e proiettati sul modello 3D (*Fig. 32*).

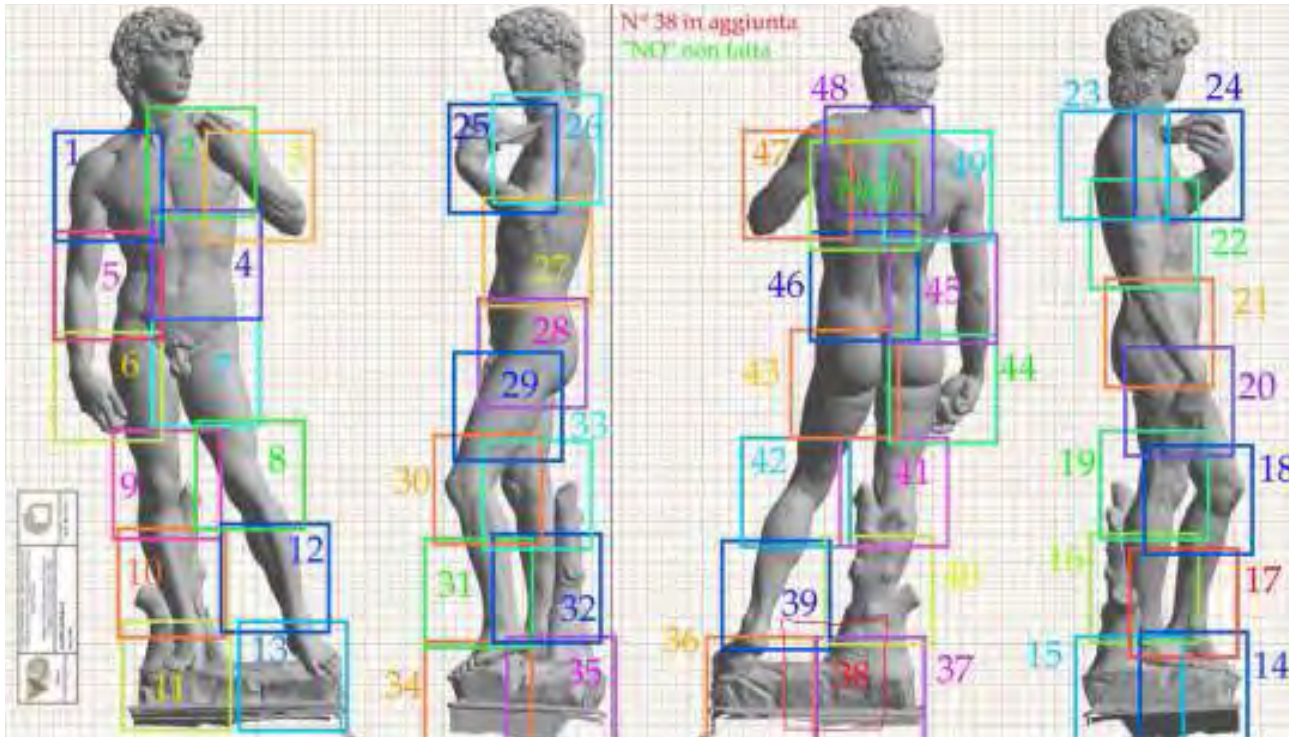


Fig. 30 - David di Michelangelo. Il piano di ripresa per il rilievo fotografico realizzato sia prima che dopo l'azione di restauro



Fig. 31 - David di Michelangelo. Alcuni esempi di rilievi prodotti dai restauratori dell'OPD per documentare lo stato di conservazione e degrado della superficie della statua

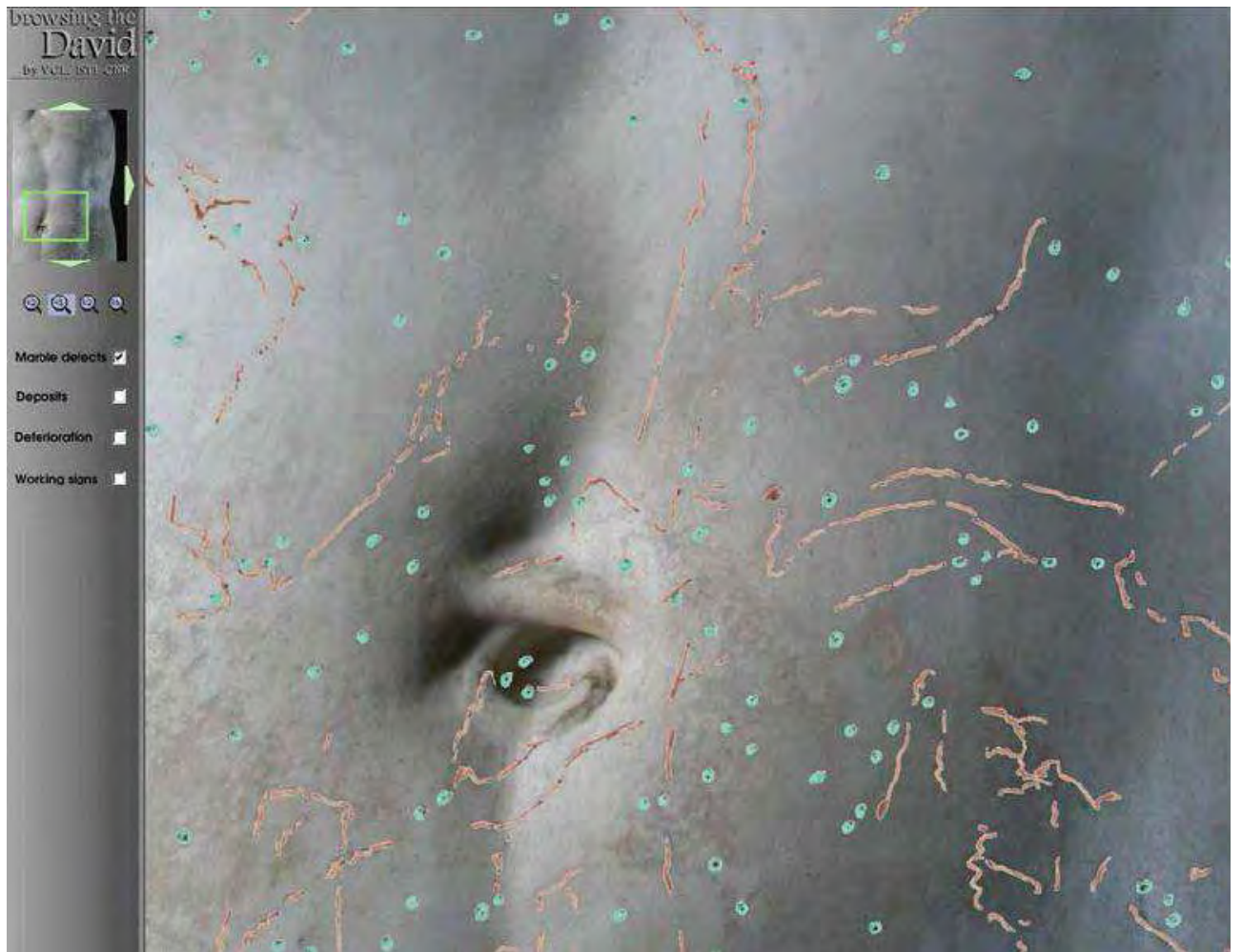


Fig. 32 - David di Michelangelo. Immagine del sistema interattivo per il browsing delle immagini fotografiche e dei rilievi prodotti dai restauratori

Ricostruzione virtuale

Un ulteriore utile impiego dei modelli 3D consiste nel ricostruire e simulare virtualmente l'aspetto originale di opere d'arte ormai parzialmente perdute, smembrate o distrutte. Un calzante esempio è fornito dalla ricostruzione del **monumento funebre di Arrigo VII**, scolpito da Tino di Camaino all'inizio del XIV secolo e situato originariamente all'interno del Duomo di Pisa. La memoria storica delle 15 statue che lo componevano è andata perduta a causata del suo smantellamento pochi anni dopo l'inaugurazione. La ricerca storico/artistica, ha permesso di riconoscere alcune opere come facenti parte del monumento funebre.

I modelli 3D ottenuti per scansione digitale di tutte le statue del monumento (*Fig. 33*), realizzati dall'ISTI/CNR di Pisa nel 2003 - 2004, sono stati utilizzati per studiare le ipotesi ricostruttive esistenti in letteratura e per produrne di nuove con l'obiettivo di riportare virtualmente la celebre opera d'arte nella sua originale struttura architettonica (*Fig. 34*).

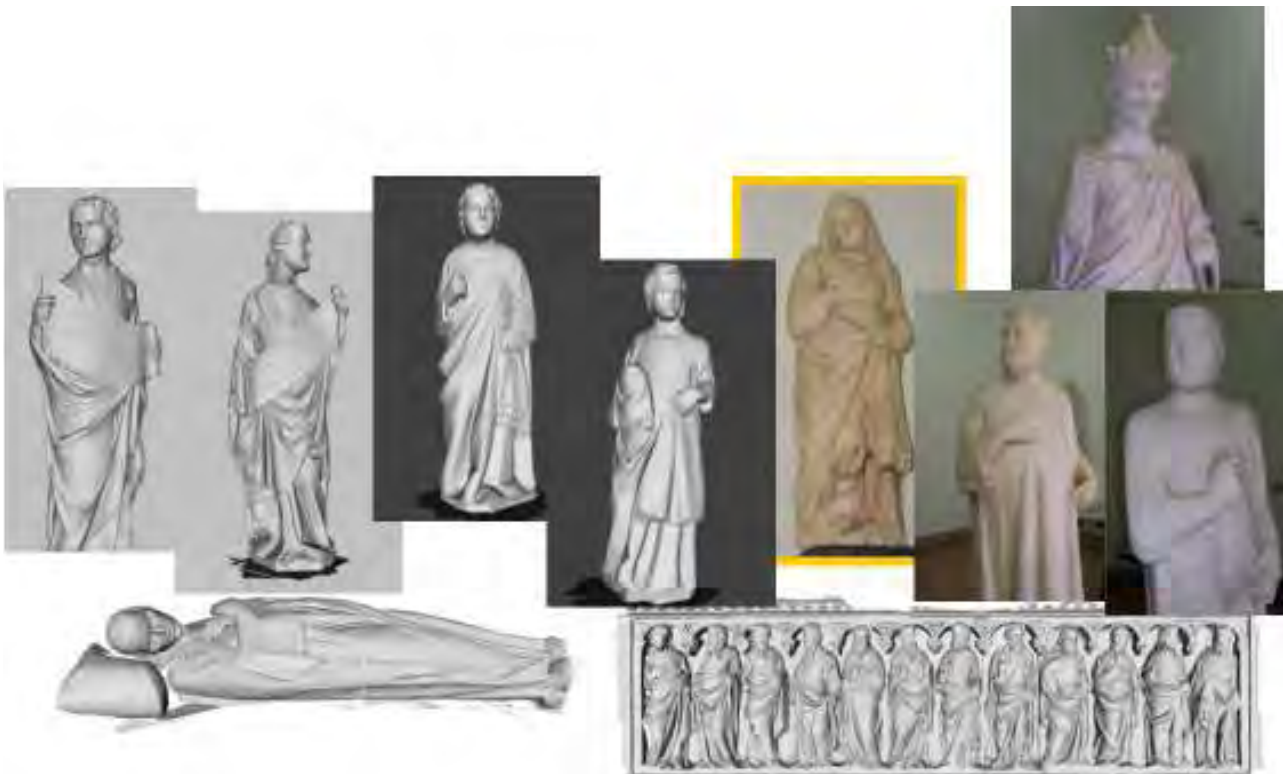


Fig. 33 - Monumento funebre di Arrigo VII. Opere scultoree facenti parte del sepolcro



Fig. 34 - Monumento funebre di Arrigo VII. Ipotesi ricostruttive e ricostruzione virtuale del sepolcro

Monitoraggio

Il patrimonio artistico necessita di un continuo monitoraggio del proprio stato di conservazione, in particolare di quelle opere esposte continuamente, ed inevitabilmente danneggiate, ad agenti atmosferici ed inquinanti. A tal proposito acquisizioni digitali molto accurate, fatte con una certa cadenza temporale possono mettere in risalto microdeformazioni, microspaccature, usure ed alterazioni dell'opera, tramite il confronto con modelli precedentemente acquisiti e memorizzati, rendendo possibili opportuni interventi da parte dei restauratori per evitare danni irreversibili.

Si riporta, a titolo esemplificativo, il progetto di analisi dell'**Adorazione dei Magi** del Vasari, compiuto nel 2010 dal Dipartimento BEST del Politecnico di Milano in collaborazione con l'Università di Palermo, la Fondazione Bruno Kessler di Trento e Art-Test. La ricerca ha previsto il rilievo 3D non invasivo e l'analisi multi-spettrale del dipinto al fine di individuarne le eventuali deformazioni (Fig. 35).

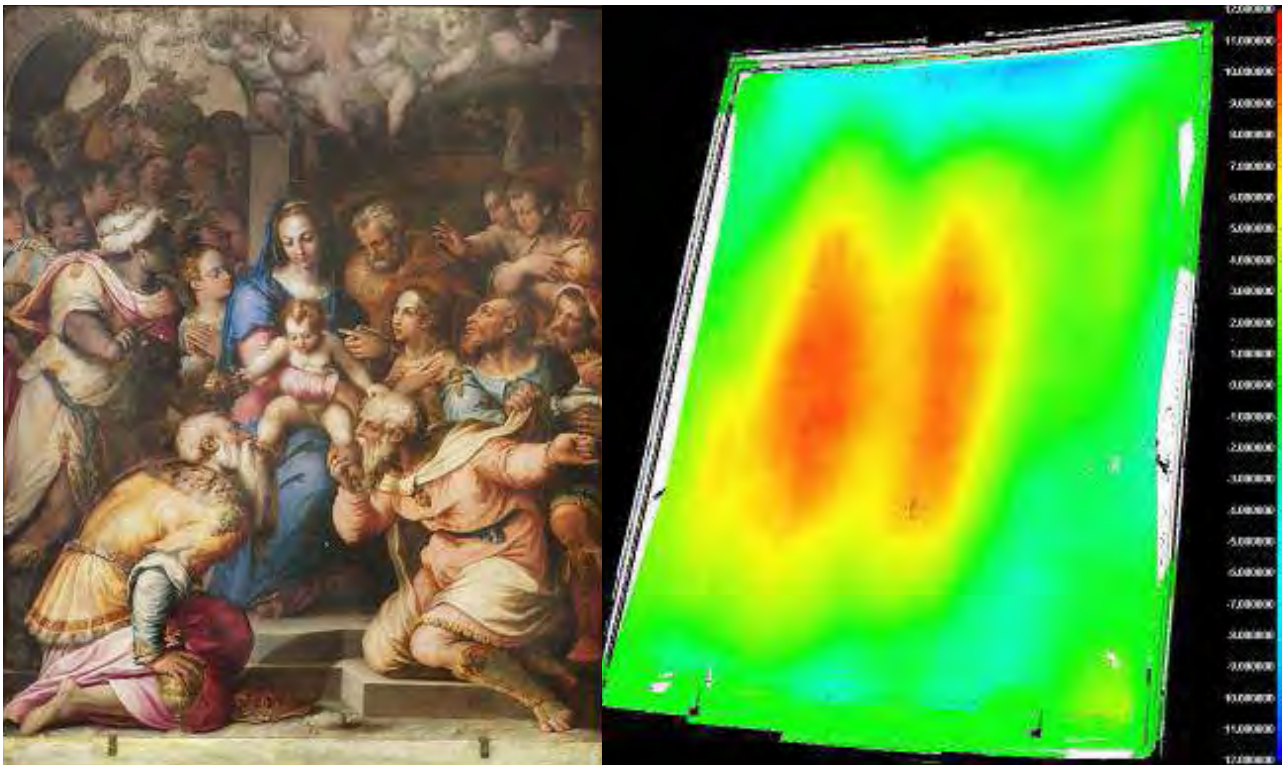


Fig. 35 - "Adorazione dei Magi" di Vasari. A sinistra, il dipinto; a destra, il modello 3D della tavola con l'analisi delle deformazioni (in rosso lo spanciamento di 1,1 cm rispetto al piano medio)

Creazione di ambienti virtuali

Molte opere si trovano, oggi, in contesti architettonici molto diversi dai luoghi dove erano originariamente collocate. E' possibile ricreare tali luoghi come ambienti virtuali tramite la computer graphics così da poter collocare i modelli digitali tridimensionali delle opere d'arte nel loro contesto originario.

Si vengono così a creare dei musei e degli ambienti virtuali in cui si realizzano visite interattive che consentono agli utenti di apprezzare le opere così come sono state pensate, volute e realizzate originariamente.

Inoltre è possibile ricostruire pezzi mancanti su opere scultoree o architettoniche in modo da poter vedere l'aspetto originario di tale opera, come è già stato fatto ad esempio per il Partenone.

Un grande esempio di visita virtuale attraverso un modello 3D è il progetto **Rome Reborn** (Fig. 36), sviluppato in circa dieci anni da un team internazionale di studiosi delle Università della Virginia, di Los Angeles (Ucla) e di altre collaborazioni internazionali, tra le quali quella del Politecnico di Milano (INDACO Lab) e del Comune di Roma (<http://www.romereborn.virginia.edu/>). Il modello tridimensionale, semplificato e texturizzato sulla base del modello generato dal rilievo di un plastico di Roma antica, è stato realizzato attraverso tecniche di modellazione procedurale (Fig. 37).



Fig. 36 - Rome Reborn. Sopra, plastico di Roma Antica e acquisizione con Laser Radar LR2000 MetricVision per lungo raggio e Vivid 910 per i primi piani. A destra, modello 3D ottenuto dalla scansione del plastico di Roma Antica [Guidi G., Frischer B., et al., **Virtualizing Ancient Rome: 3D Acquisition and Modeling of a Large Plaster-of-Paris Model of Imperial Rome**, in: *Videometrics VIII*, January 18-20, 2005, California, San Jose, USA SPIE, vol. 5665, pp. 119-133]

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

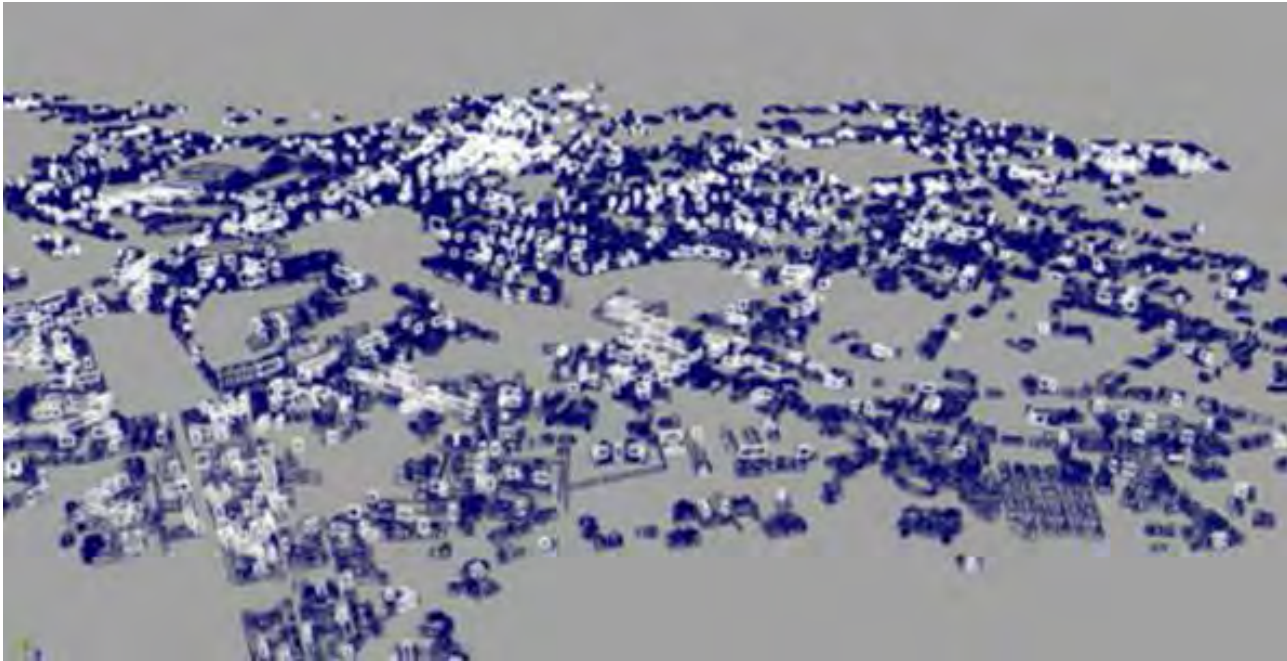


Fig. 37 - Rome Reborn. In alto, sfermata di Autodesk Maya: in bianco sono rappresentati i modelli wireframe delle diverse forme iniziali che sono stati utilizzati come input per la modellazione procedurale. In basso, a sinistra, finestre del software di modellazione procedurale CityEngine: in alto, modello iniziale volumetrico; in basso, geometria dettagliata generato dal CGA shape [Dylla K., Frischer B., et al., **Rome Reborn 2.0: A Case Study of Virtual City Reconstruction Using Procedural Modeling Techniques**, in: *37th Proceedings of the CAA Conference*, March 22-26, 2009, Williamsburg, Virginia, Archaeopress, Oxford 2010, pp. 62-66]. Sotto, modello 3D di Rome Reborn [<http://www.romereborn.virginia.edu/>]



Fruizione remota

Spesso le opere d'arte sono poste in luoghi chiusi al pubblico, o inaccessibili, oppure non visibili perché temporaneamente in fase di restauro.

Per ovviare a questi problemi si sono diffusi recentemente i collegamenti remoti tramite infrastruttura internet o strumenti immersivi così da allargare l'accessibilità alle opere e favorirne la comprensione storica e artistica grazie, soprattutto, alle possibili associazioni con altre opere o con documenti significativi. A seconda dei gradi di fruizione si parla di realtà virtuale e realtà aumentata.

La realtà virtuale è la simulazione di uno spazio tridimensionale reale o immaginario, generato con tecnologie digitali, percepito con mezzi visivi (o più genericamente sensoriali), e che fornisce l'illusione di essere vero.

La realtà aumentata è la sovrapposizione dell'informazione virtuale alla realtà o alla rappresentazione del reale (video, foto), tale da avere l'impressione che la prima esista veramente [20].

Un esempio, contenente entrambi i livelli di esplorazione, è il **ciclo di affreschi "Storia della Vera Croce"** di Piero della Francesca (Figg. 38, 39), nella chiesa di



Fig. 38 - Ciclo pittorico di Piero della Francesca. Navigazione immersiva nel modello [<http://www.museumsandtheweb.com/mw2009/papers/lavin/lavin.html#fig5>]

[20] Sylaiou S., Liarokapis F., Kotsakis K., Patias P., **Virtual museums, a survey and some issues for consideration**, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 10, Issue 4, 2009, pp. 520-528

Fig. 39 - Ciclo pittorico di Piero della Francesca. Vista del modello navigabile sul web e dotato di foto ad alta risoluzione delle singole scene, commento testuale e commento audio [<http://projects.ias.edu/pierotruecross/>]



S. Francesco di Arezzo, una delle massime espressioni della pittura italiana del primo Rinascimento. Il modello interattivo, creato nel 2009, dall'Università di Princeton in collaborazione con l'Università della California, la Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa e l' Institute for Advanced Studies di Lucca (IMT), offre la navigazione all'interno della cappella in qualsiasi direzione per vedere i dipinti, soprattutto quelli posti a più di quaranta metri sopra il pavimento.

E' disponibile anche la visualizzazione immersiva con dispositivi stereoscopici come, ad esempio, Head Mounted Display e CAVE.

Si ricorda, anche, il caso del **Virtual Museum of Iraq**, sviluppato nel 2009 dal Ministero degli Affari Esteri in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle

Ricerche, ospita nelle sale virtuali le ricostruzioni digitali, per la maggior parte in 3D, di una selezione delle opere più significative provenienti dal territorio iracheno. In particolare, contiene 70 reperti, 40 modelli 3D, 100 immagini di repertorio, 22 filmati e 18 siti archeologici (Fig. 40).

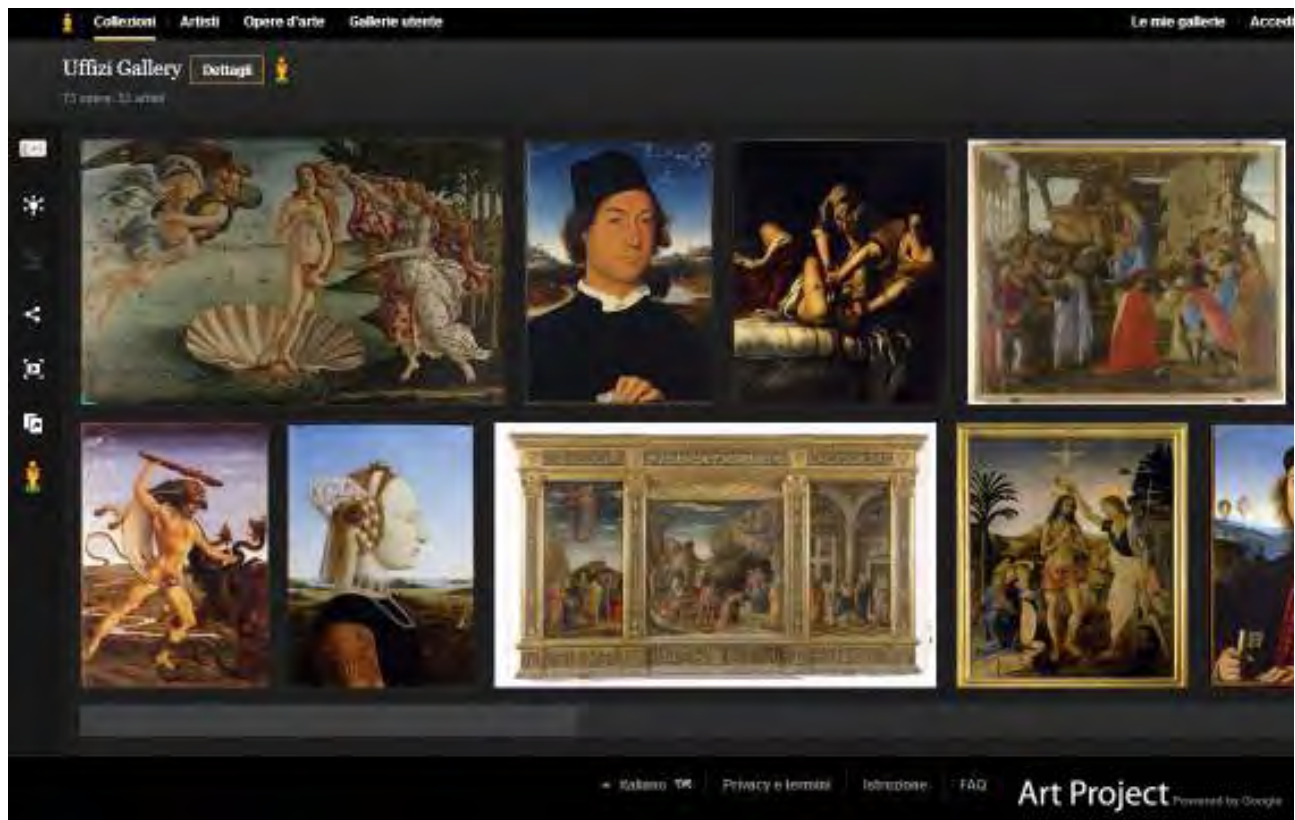


Fig. 40 - Museo Virtuale dell'Iraq. Vista delle otto sale del museo ed esplorazione della Sala Accadica Neo-Sumerica. In basso, vista del modello 3D della statua di Gudea nella Sala Accadica Neo-Sumerica [<http://www.virtualmuseumiraq.cnr.it/homeITA.htm>]

Più recentemente, nel 2011, Google ha dato il via al progetto **Art Project** (Figg. 41, 42), che consente di percorrere virtualmente i corridoi dei principali musei del mondo con la possibilità di visualizzare ad alta risoluzione alcune delle opere di maggior prestigio ed accedere ai relativi approfondimenti. Il progetto, che ha evidenti fini promozionali, vede la partecipazione di alcune tra le più importanti istituzioni museali, tra cui il *Metropolitan Museum of Art* di New York, la *Tate Britain Gallery* di Londra e gli *Uffizi* di Firenze.

Gli esempi citati, basati sull'uso di programmi della virtual reality consentono, dunque, agli utenti di visionare i dettagli delle opere, offrendo una particolare fruizione che altrimenti sarebbe impossibile, ma soprattutto permettono di divulgare al grande pubblico la conoscenza di opere non fruibili nella realtà per problemi conservativi.

Fig. 41 - Google Art Project.
Galleria degli Uffizi di Firenze
[<http://www.googleartproject.com/>]



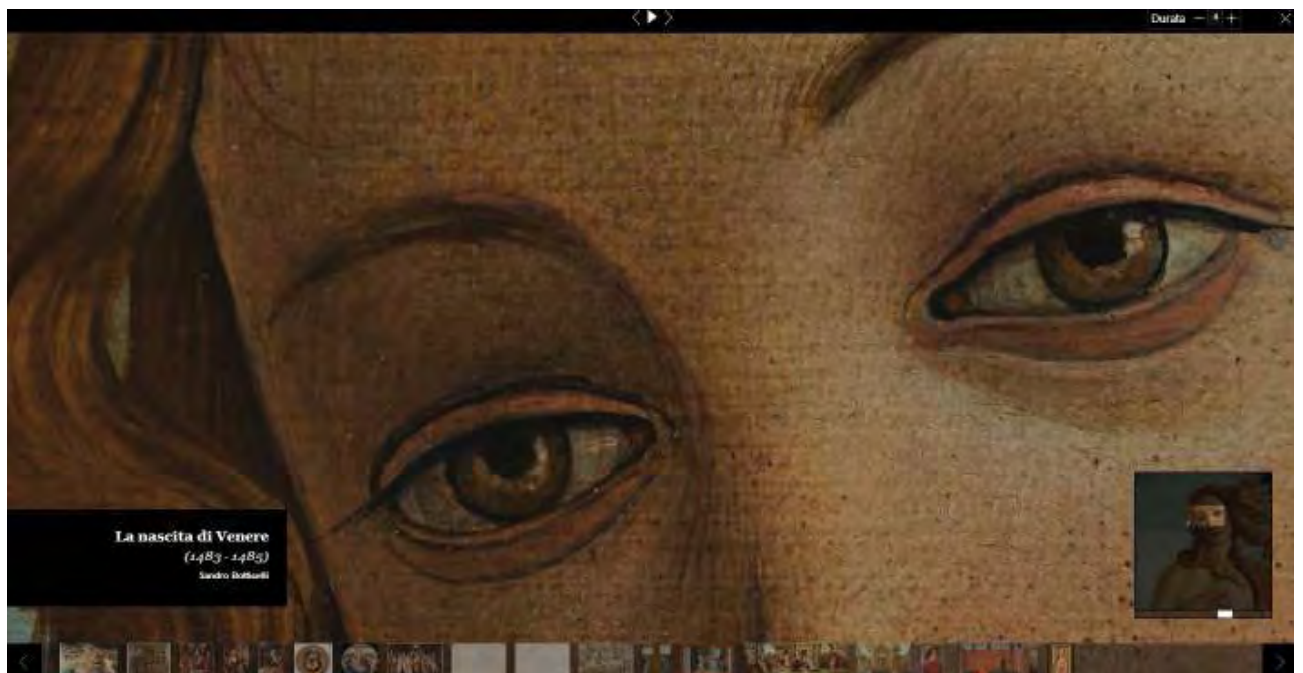
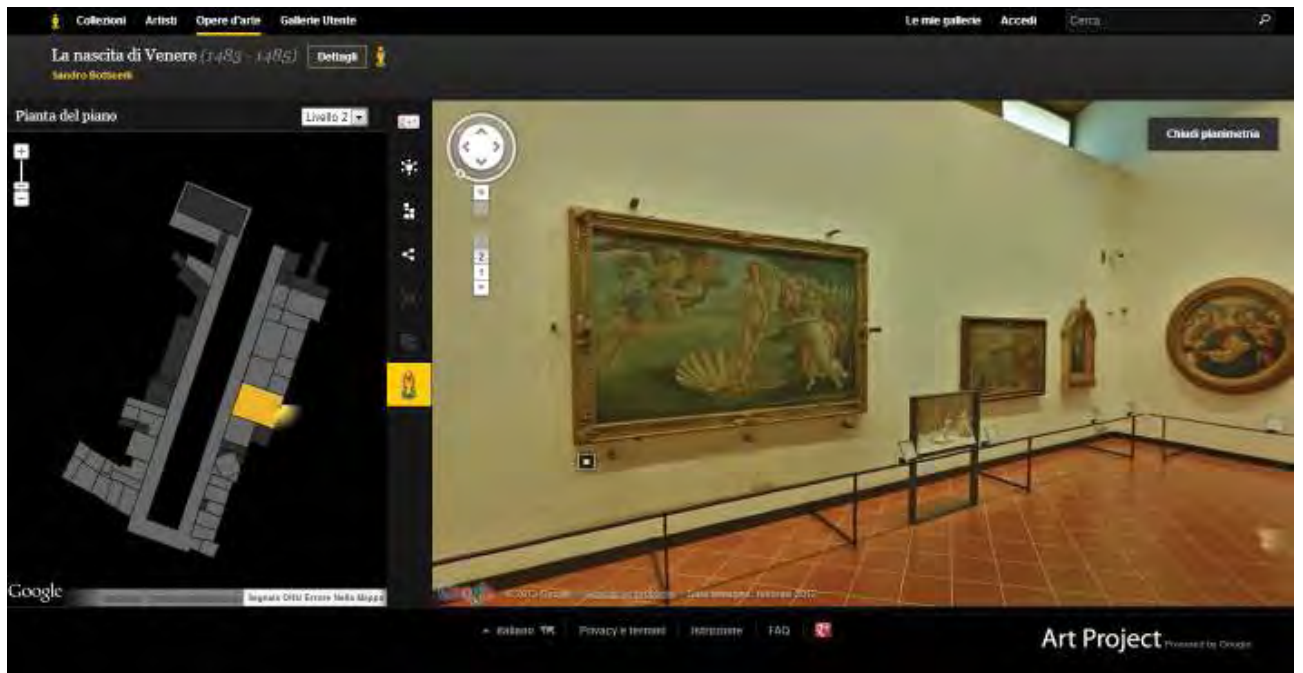


Fig. 42 - Google Art Project. Galleria degli Uffizi di Firenze. In alto, visita virtuale all'interno della sala del museo attraverso la tecnologia di Street View. In basso, dettaglio dell'immagine del dipinto "La nascita di Venere" di Botticelli. La visualizzazione ad alta risoluzione (gigapixel) è possibile grazie alla modalità Artwork View. Complessivamente il progetto vede coinvolti 151 musei di 40 paesi, 1061 immagini di opere in alta risoluzione di 8.200 artisti

Seguono alcuni casi studio significativi, affrontati negli ultimi anni, sviluppati per rispondere ad obiettivi di carattere metrico, scientifico, critico, diagnostico ma anche divulgativo e comunicativo.

MODELLI 3D PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA LETTURA CRITICA

Architettura vernacolare in terra cruda in Siria

Supporto metrico, tecnico, strutturale ed etnografico;

Rupe tufacea di Pianiano

Supporto metrico e strutturale per il progetto di consolidamento;

Sala Consiliare di Prato

Supporto metrico per il workshop di progettazione dello spazio pubblico;

Cattedrale di San Nicola di Bari (La Rioja, Argentina)

Supporto metrico per la redazione delle tavole tematiche e per la conservazione programmata.

MODELLI 3D PER LA COMUNICAZIONE

Cittadella di Tartous (Siria)

Promenade Architecturale di Tiro (Libano)

Supporto metrico e divulgativo per sensibilizzare l'opinione pubblica e valorizzare il patrimonio culturale;

Cappella dei Magi di Benozzo Gozzoli

(Palazzo Medici - Riccardi di Firenze)

Supporto per il percorso museale e per la valorizzazione cromatica delle superfici pittoriche;

Reperti archeologici delle antichità Egee e Cipriote

Toscana

Supporto per l'analisi scientifica e la divulgazione in un museo virtuale.

ARCHITETTURA VERNACOLARE IN TERRA CRUDA - SIRIA

2007 - 2009

Coupoles et Habitats

Progetto di ricerca dell'Unione Europea Culture 2007

Coordinamento scientifico: *prof. S. Mecca (Università degli Studi di Firenze)*



In alto, vista panoramica di un villaggio a nord della regione di Aleppo

In basso, planimetria e rispettive sezioni verticali dell'unità abitativa di Oum Aamoud Seghir (originale in scala 1:200)

I villaggi rurali, abitati da pastori e contadini, sono caratterizzati da manufatti in terra cruda, espressione di una cultura costruttiva radicata e funzionale dalle origini molto antiche (documentate anche in bassorilievi ittiti ed assiri).

Tutte le cellule abitative sono frutto della ripetizione di uno schema di base: una scatola muraria pressoché quadrata, di piccole dimensioni, coperta da un conoide o paraboloido a base circolare, di altezza uguale circa a quella dei muri di imposta. Si tratta, sostanzialmente, di false cupole o pseudo cupole, in quanto realizzate con l'aggetto progressivo di ricorsi orizzontali.

Nei villaggi presi in considerazione sono stati esaminati i manufatti significativi per dimensioni, aspetto, stato di conservazione al fine di ottenere informazioni sulla tecnica di esecuzione, la geometria, il materiale, la condizione statica e funzionale.

I dati 3D, acquisiti con laser scanner distanziometrico a differenza di fase, HDS6000 (Leica Geosystems), hanno costituito un supporto geometrico-morfologico attendibile per le finalità scientifiche previste dal progetto.

La conformazione tridimensionale delle unità abitative è stata sintetizzata in elaborati vettoriali e bidimensionali estraendo dal modello di punti profili sezione orizzontali e verticali. Sono state realizzate le sezioni ambientali per le unità abitative di Oum Aamoud Seghir e Joub Maadi.

Altre unità sono state indagate alla scala della cellula abitativa, realizzando una sezione orizzontale (alla quota di circa 1 m dal piano di calpestio) e sezioni verticali (longitudinale, trasversale e diagonale).

Identificazione e caratterizzazione delle tecnica costruttiva

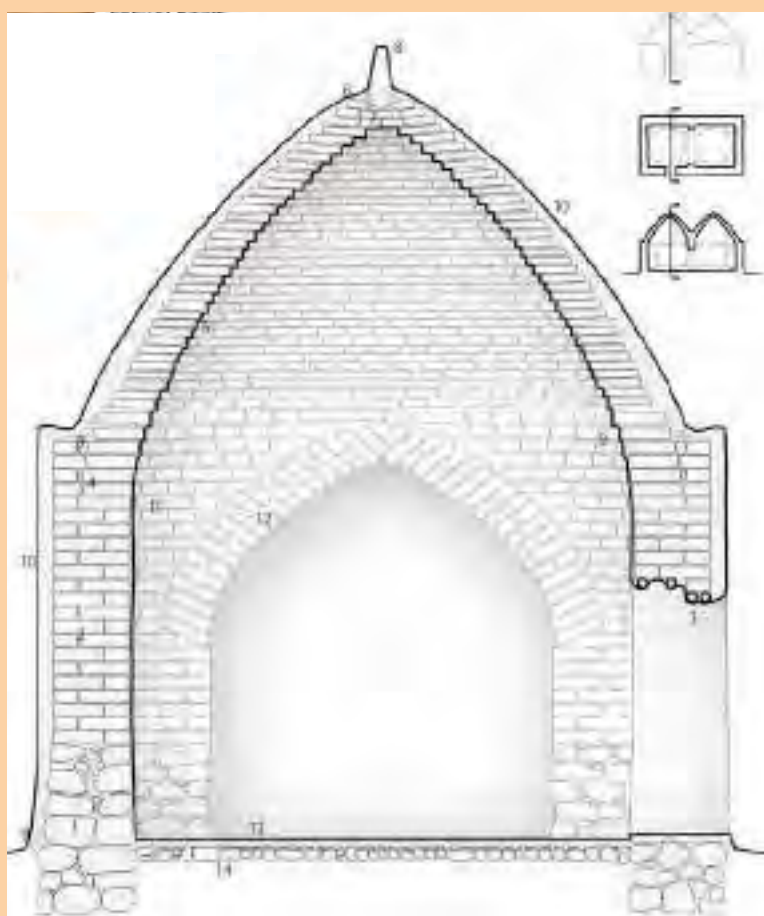
La documentazione metrica corretta del profilo e della dimensione degli elementi principali ha permesso di ipotizzare verosimilmente la tecnica costruttiva, il numero e la posizione dei materiali impiegati.

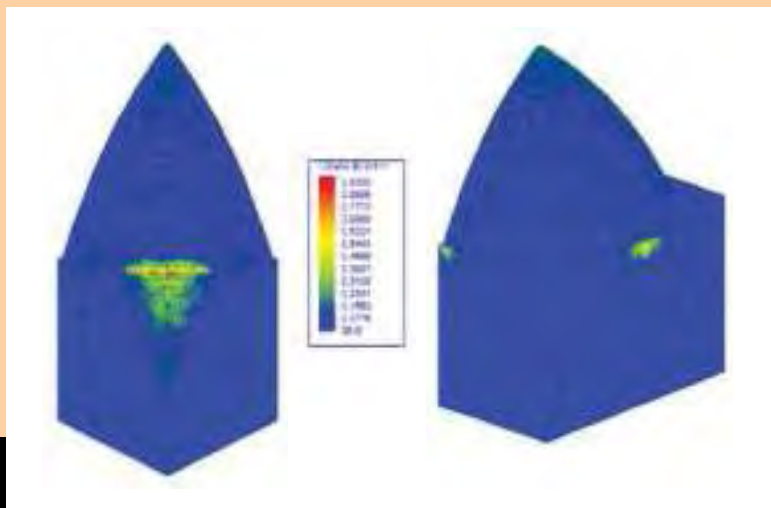
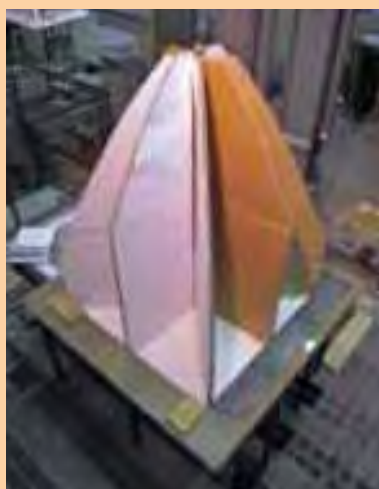
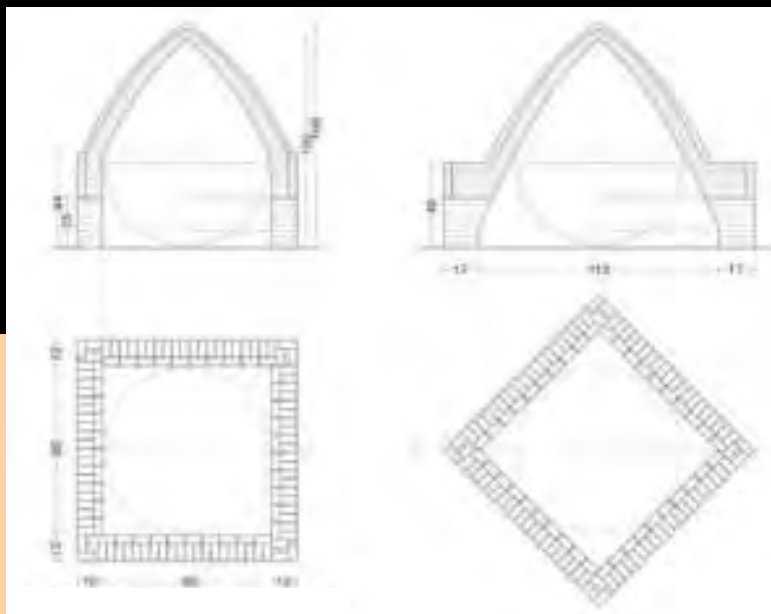
I ricorsi orizzontali dei mattoni della cupola, sporgenti progressivamente verso l'alto, culminano con un blocco di pietra rendendo il profilo finale della costruzione simile ad un cono piuttosto che ad una semisfera.

Le fondazioni della struttura sono costituite da pietre grossolane; il basamento da pietre miste a terra abbondante; la cella di base e la cupola da mattoni essiccati al sole e intonaco di terra cruda di vario spessore. Le pareti della cella sono soprattutto a tre e quattro teste; raramente a due teste. I mattoni usati nella cupola sono molto più sottili di quelli usati nella base per controllare più agevolmente la curva.

L'identificazione delle soluzioni costruttive adottate gioca un ruolo determinante per la comprensione del comportamento strutturale.

*In alto, pianta verso il basso e verso l'alto, integrata con curve di livello ogni 0.50 m, e sezioni verticali di una cellula nel villaggio di Er Rabeeb (originale in scala 1:50).
Al lato, sezione verticale materica della cupola di Er Rabeeb
In basso, disposizione dei mattoni di chiusura della cupola*





*In alto, sezione orizzontale e sezioni verticali, centrale e diagonale, usate per costruire il modello in scala 1:5
 Al centro, fase iniziale e finale della costruzione del modello
 In basso, modello matematico sottoposto a carichi reali*

Punti deboli

Materiale in terra - fragile e vulnerabile all'azione degli agenti atmosferici sfavorevoli

Pennacchio - elemento di raccordo tra il quadrato della scatola di base e il cerchio d'imposta della cupola.

Archi - elementi di collegamento tra celle contigue soggetti a carico doppi rispetto alle pareti perimetrali.

Tantour - elemento di chiusura della cupola

Modello in scala 1:5

Realizzato, a partire dalle sezioni orizzontali e verticali elaborate dal modello di punti, per ricostruire il processo di costruzione e per valutarne la vulnerabilità.

Il materiale usato è terra argillosa del Valdarno avente caratteristiche simili a quelle del materiale originale.

I test strutturali eseguiti sul modello hanno evidenziato inaspettate qualità resistenti. Esiste una forte solidarietà tra il quadrato della base e il cerchio della cupola al punto tale che non si è verificata nessuna sconnessione importante nel pennacchio.

Documentazione strutturale

Per supportare le indagini strutturali sono stati estratti profili sezione orizzontali ogni 50 cm a partire dall'imposta della cupola fino al *tantour*, raffittiti a 10 cm per tutto lo sviluppo del pennacchio. Anche l'elaborazione delle sezioni diagonali si è rivelata particolarmente utile alla comprensione delle informazioni sugli angoli della scatola quadrata di base.

Il materiale impiegato ha bassa capacità di trazione rispetto, invece, ad un'accettabile resistenza a compressione. Queste proprietà meccaniche, insieme all'elevato livello di rigidità della geometria, producono un modello matematico dai danni pressoché inesistenti. In particolare, per raggiungere lo stato di crollo sarebbe necessario

aumentare tali carichi fino a sei volte il loro valore reale.

Organizzazione degli spazi

La restituzione bidimensionale delle unità abitative, più semplici come Er Raheb, e più complesse come Oum Aamoud Seghir, ha permesso di analizzare accuratamente l'organizzazione degli spazi vitali delle famiglie che li abitano. In particolare, troviamo:

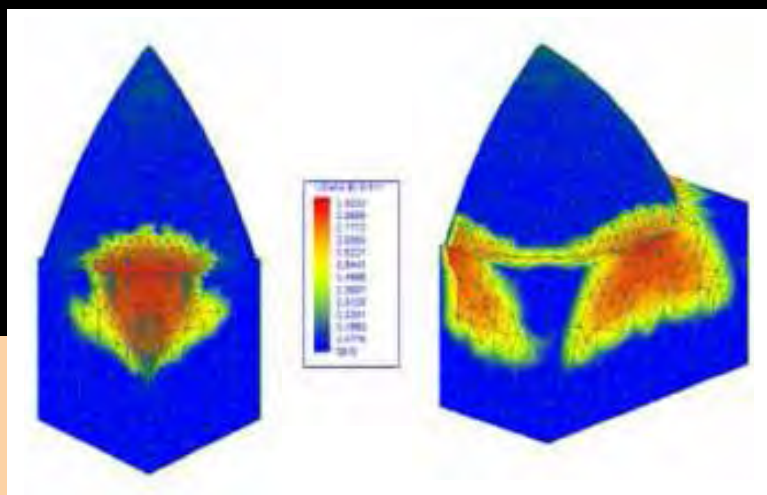
- cortile (C)
- cellule abitative (D)
- pollaio (E)
- recinzioni animali (F)
- ricovero per bestiame (H)
- stoccaggio (S)

L'orientamento dell'unità abitativa è spesso nord-sud, con apertura principale verso sud in modo da sfruttare al massimo l'irraggiamento solare e proteggersi dai forti venti orientali molto comuni in queste zone.

Lo spazio interno può essere costituito da una singola cella o, più spesso, da due celle comunicanti da un arco di dimensioni pari alla parete divisoria. Ha carattere multifunzionale: di giorno serve come area di residenza e riparo dal clima rigido; di notte si trasforma in camera da letto con materassi disposti sul pavimento.

L'interno non ha arredi fissi. Coperte e, in alcuni casi, materassi sottili sono impilati in un angolo. Gli oggetti sono posti in nicchie ricavate nello spessore della muratura.

Tucci G., Bonora V., Nobile A., Tokmakidis K., **Geomatic methods of surveying e Surveying and documenting corbelled dome architectures**, in: Mecca S., Dipasquale L. (a cura di), *Earthen Domes and Habitats. Villages of Northern Syria: An architectural tradition shared by East and West*, Pisa, Edizioni ETS, 2009, ISBN 978-884672535-6, pp. 157-162 e pp. 297-311



*In alto, modello sottoposto a carichi aumentati di sei volte il valore reale
Al centro, organizzazione degli spazi dell'unità abitativa di Oum Aamoud Seghir
In basso, spaccato assometrico dell'unità abitativa di Er Raheb e alcuni dettagli degli interni*

RUPE TUFACEA DI PIANIANO - VITERBO

2009 - 2010

Rilievo topografico plano-altimetrico e restituzione grafica della rupe del borgo di Pianiano

Convenzione di ricerca con il *geom. N. Luciani*
Coordinamento scientifico: *prof. G. Tucci (Università degli Studi di Firenze)*



*In alto, vista sud-ovest del borgo
Al centro, prospetto occidentale. Originale in scala 1:100
In basso, vista 3D del prospetto meridionale del modello di punti*

Il borgo di Pianiano, frazione del comune di Cellere nella Tuscia viterbese, segue la storia del territorio: assoggettato alla signoria prima degli Orsini e poi dei Farnesi con il loro Ducato di Castro, diventa parte del dominio dello Stato Pontificio quando viene abitato da una colonia albanese.

Obiettivo del lavoro è stato quello di fornire un'attenta indagine conoscitiva dell'esistente, attraverso accurate indagini geometriche, utile al progetto di consolidamento programmato del *II Accordo integrativo dell'Accordo di Programma Quadro "Difesa del Suolo e protezione della Costa (APQ5)"*, sottoscritto dal *Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare*, dal *Ministero dell'Economia e delle Finanze* e dalla *Regione Lazio* (tecnici incaricati: arch. G. Ridolfi, ing. S. Bocci, dott. L. Papacchini e geom. N. Luciani).

I dati 3D, acquisiti con laser scanner distanziometrico a differenza di fase, HDS6000 (Leica Geosystems), sono stati referenziati in un sistema di riferimento cartografico, attraverso l'impiego del ricevitore GPS 1200 (Leica Geosystems), per una corretta determinazione dei parametri geo-strutturali degli ammassi rocciosi. Il modello complessivo di punti presenta una passo di campionamento centimetrico pressoché uniforme tale da riprodurre le

caratteristiche significative degli edifici e descrivere dettagliatamente i fronti rocciosi per l'esecuzione di analisi geo-strutturali.

Documentazione strutturale

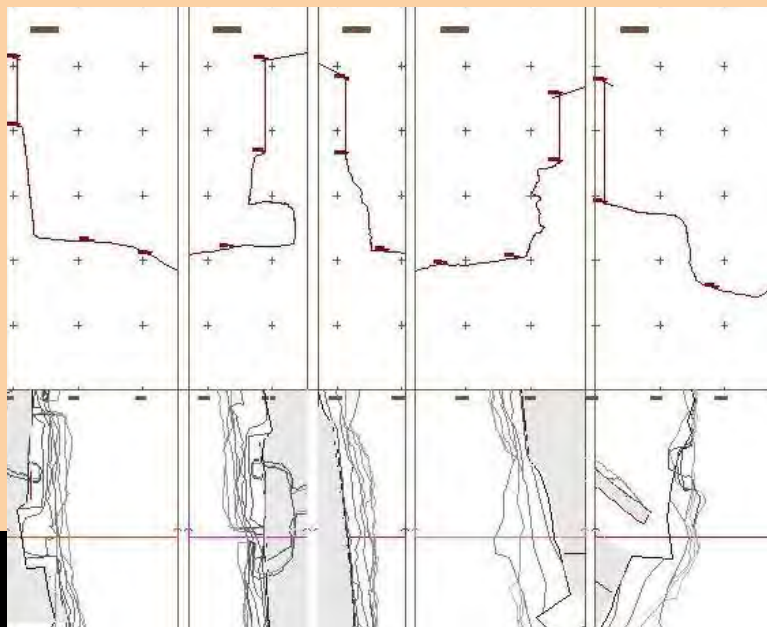
Per rispondere alle esigenze dei progettisti e degli strutturisti sono state elaborate:

- 1 *planimetria generale* realizzata integrando la pianta delle coperture con le curve di livello, equidistanti 1 m, lungo il costone tufaceo;
- 24 *sezioni verticali* nei punti più significativi individuati sulla rupe;
- 14 *prospetti* eseguiti con piani di volta in volta paralleli al fronte degli edifici.

Gli elaborati grafici hanno fornito tutte le informazioni metriche necessarie alla progettazione del consolidamento dell'abitato instabile grazie, soprattutto, alle innumerevoli possibilità offerte dal modello 3D: l'individuazione dei profili sezione significativi; le misurazioni specifiche su alcune porzioni; il corretto andamento della linea di base della rupe, della linea di terra e della linea di gronda degli edifici; sono state ricavate direttamente dal modello di punti, attendibile referente del reale, sempre aggiornabile e continuamente interrogabile.

Un rilievo tradizione, viceversa, avrebbe richiesto numerosi ulteriori sopralluoghi per integrare le misurazioni necessarie agli interventi previsti (palificate vive, muri di contenimento, chiodature, bonifiche di piante infestanti, disaggi, ecc.).

Tucci G., Nobile A., Ridolfi G., Papacchini L., **La rupe tufacea di Pianiano (VT): dal rilievo integrato al progetto di consolidamento dei centri abitati instabili**, in: *Atti della XIV Conferenza Nazionale ASITA, Brescia, 9-12 novembre 2010*, 2010, ISBN 978-88-903132-5-7, pp. 1649-1654



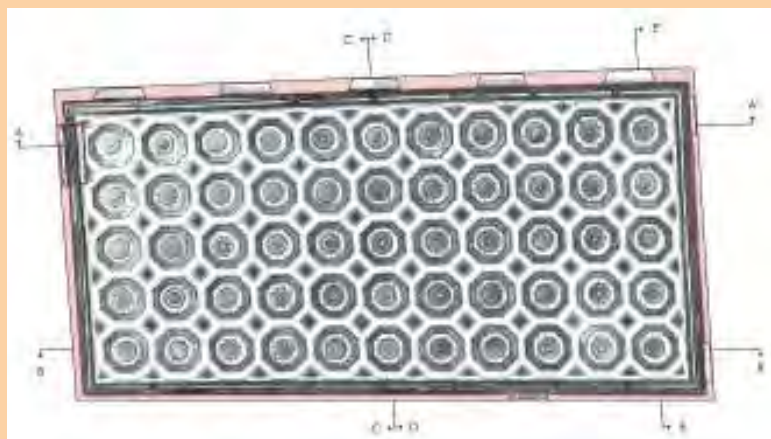
*In alto, planimetria generale. Originale in scala 1:100
In basso, profili sezione trasversali estratti nel prospetto occidentale*

SALA CONSILIARE DI PRATO

2010

Rilievo architettonico della Sala Consiliare a supporto dello svolgimento del workshop Salone Consiliare di Prato: trasformazione di uno spazio pubblico dal Medioevo alla contemporaneità

Convenzione di ricerca con l'Amministrazione comunale di Prato
Coordinamento scientifico: prof. G. Tucci (Università degli Studi di Firenze)



La Sala, che ospita il fulcro della Quadreria comunale, rappresenta il nucleo più antico del palazzo pubblico (1290) che, insieme al loggiato sottostante, è ancora individuabile sul prospetto tardo-settecentesco dell'edificio. Obiettivo del lavoro è stato fornire la documentazione metrica dello stato di fatto a supporto del *Workshop Salone Consiliare di Prato: trasformazione di uno spazio pubblico dal Medioevo alla contemporaneità*, organizzato dall'Amministrazione Comunale di Prato al fine di:

- valorizzare le caratteristiche storico/architettoniche e politico/rappresentative;
- riqualificare gli arredi e l'impiantistica;
- attribuire una valenza simbolica, non soltanto funzionale, alla nuova organizzazione proposta;
- realizzare uno spazio flessibile, polifunzionale e tecnologico, fruibile anche per eventi e manifestazioni pubbliche.

Bonora V., Nobile A., Tucci G., **Modulo D11 – Scansione laser terrestre**, in: *Dispense dei corsi per Operatore Geomatico*, Corsi di specializzazione pratica GeoCampus, Leica Geosystems, 2011, pp. 40



A destra. In alto, foto della Sala Consiliare; in basso, estrazione di un profilo sezione orizzontale dal modello complessivo di punti

Sopra. In alto, sezione orizzontale, con vista verso l'alto (la visualizzazione è in silhouette e in scala di grigi). In basso, Sezione trasversale ibrida: vettoriale integrato con le orto-immagini del modello di punti e i fotopiani degli affreschi sulla testata occidentale (a sinistra, la "Madonna col Bambino in trono fra i santi, Giovanni Battista e Stefano, e angeli"; a destra, la "Giustizia militante"). Originali in scala 1:50

CATTEDRALE DI SAN NICOLA DI BARI

LA RIOJA - ARGENTINA

2009 - 2012

Cursos Internacionales de Postgrado de Geomática para la Conservación Edilicia de Bienes Culturales

Acuerdo de colaboración cultural y científica con la *Universidad Nacional de La Rioja (Argentina)*
Coordinamento scientifico: *prof. G. Tucci (Università degli Studi di Firenze)*

Il lavoro nasce nell'ambito dell'accordo di collaborazione culturale e scientifica tra la Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze (Italia) e la scuola di Architettura dell'Università Nazionale della Rioja (Argentina).

La Cattedrale, classificata come *edificio storico* dal Governo della Provincia di La Rioja per i suoi valori sociali, culturali, urbani, architettonici e religiosi, fu costruita sulla preesistente Chiesa Matrice distrutta da un forte evento sismico. La nuova costruzione, su progetto dell'architetto Juan Bautista Arnaldi, fu inaugurata nell'anno 1912.

Lo spunto per la ricerca è stato fornito dall'opportunità di eseguire, per la prima volta, un rilievo completo dell'organismo architettonico avvalendosi delle nuove tecnologie a scansione tridimensionale.

Lo studio è stato condotto in modo da poter costituire un "caso esemplare" di sinergia fra molteplici approcci e metodiche disciplinari in vista della creazione di una "banca dati" indispensabile per l'avviamento di un piano d'indagini articolato su più fronti e suddiviso in più fasi; per il monitoraggio dell'evoluzione del degrado, stimandone la pericolosità nel breve, medio e lungo periodo; per la messa a punto di strategie e procedure di *preservation management* conformi alle logiche e ai protocolli operativi della "conservazione programmata".

Ariaudo E., Bonora V., Colucci S., Nieto Ortiz M. J., Nobile A., Romanazzi M., Salvadeo V., **Rilievi metrici / Relevamientos métricos**
Rilievi tematici / Relevamientos temáticos, in: Tucci G. (a cura di), *1912-2012: la cattedrale di San Nicola di Bari a La Rioja. Studi e rilievi per il centenario. 1912-2012: la Catedral de San Nicolás de Bari de La Rioja*, Estudios y relevamientos para el centenario, EUDELAR – Universidad Nacional de la Rioja, Argentina, 2012, ISBN 978-987-1364-16-9, pp. 226-234

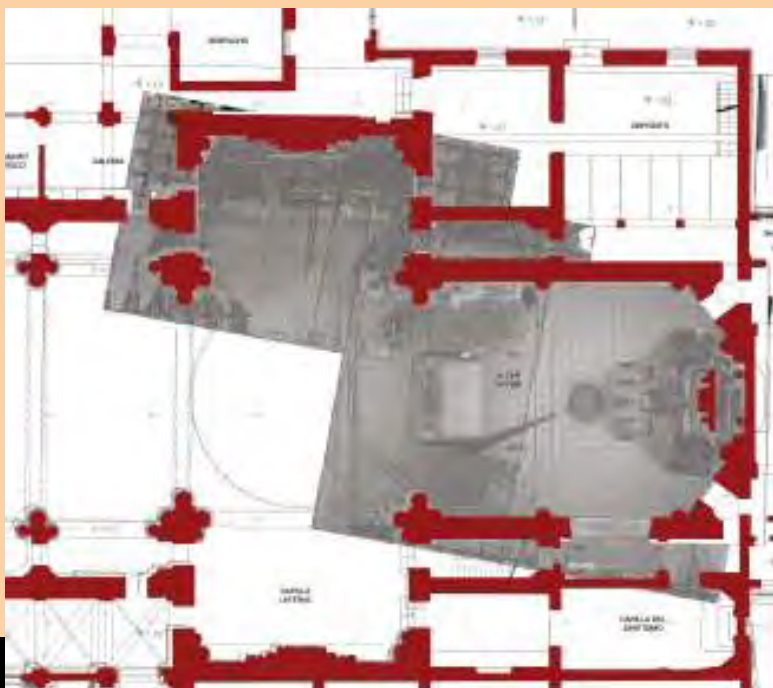


*Vista del prospetto principale del modello complessivo di punti
In scala di grigi l'esterno e in silhouette gli interni*



MAPPE MATERICHE

	intonaco simil-pietra colore naturale
	copertura ardesia in zinco
	copertura lamiera in zinco
	intonaco impermeabile cementizio latex per esterni
	legno
	carpenteria con vetrate
	rete metallica



Documentazione tematica

Dallo studio sono emersi i seguenti fenomeni:

- deposito superficiale, usura di elementi architettonici, fessure, distacchi dei materiali, pessimo stato dello strato di supporto;
- depositi superficiali di fuliggine e altre sostanze negli ornati in marmo delle porte, nelle colonne e nelle balaustrate di terrazzi e balconi;
- esfoliazioni della pellicola pittorica, fessurazioni sia superficiali che in profondità, distacchi dai substrati e alterazioni cromatiche sulle pareti superiori e sugli archi;
- grande deterioramento dei dipinti murari della cupola centrale con distacchi dello strato pittorico e corrosione nelle parti metalliche a causa delle infiltrazioni di

*A destra, vista del modello di punti texturizzato del Camarin
In alto, tavola materica del prospetto principale. Originale in scala 1:50
In basso, dal modello di punti sono stati estratti profili sezione e viste ortogonali attraverso la definizione di un opportuno piano di riferimento*

MAPPE DIAGNOSTICHE

-  alterazione cromatica
-  integrazione cementizia
-  assenza
-  concrezione
-  crosta
-  macchia
-  deposito superficiale
-  infiltrazioni
-  efflorescenza
-  umidità di risalita
-  lacuna - mancanza
-  fessurazioni

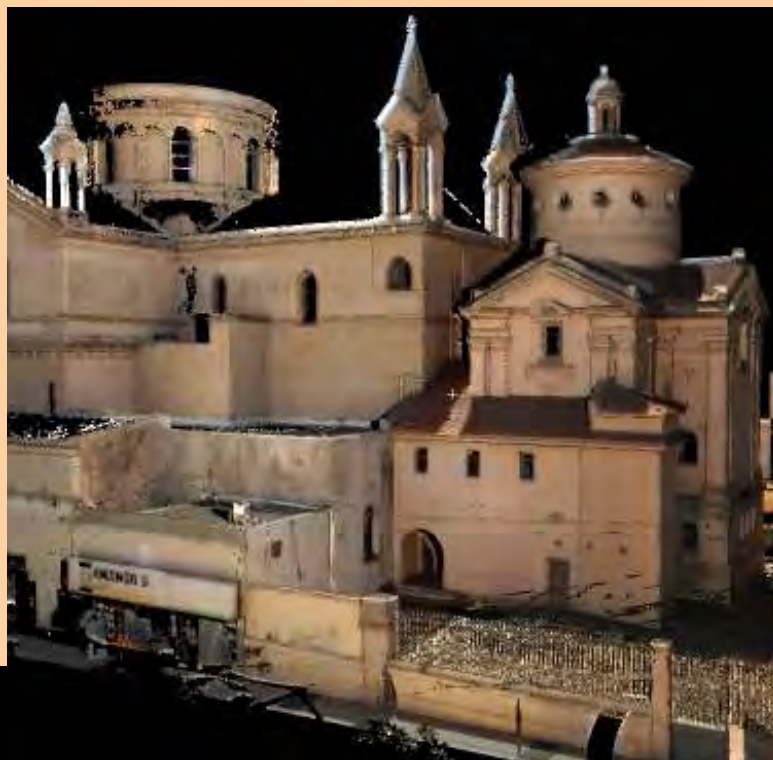


acqua dalla copertura e cattiva tenuta delle vetrate superiori;

- deterioramento della carpenteria metallica;
- importante decolorazione nelle pitture murarie dell'interno

La mancanza di una regolare cura manutentiva, soprattutto negli ultimi decenni, ha indotto la redazione di carte tematiche dello stato di conservazione di tutto il complesso.

Tucci G., Bonora V., Nobile A., **Il rilievo dell'edificio nel suo stato attuale / El relevamiento del edificio al estado actual**, in: Tucci G. (a cura di), *1912-2012: la cattedrale di San Nicola di Bari a La Rioja. Studi e rilievi per il centenario. 1912-2012: la Catedral de San Nicolás de Bari de La Rioja*, Estudios y relevamientos para el centenario, EUDELAR – Universidad Nacional de la Rioja, Argentina, 2012, ISBN 978-987-1364-16-9, pp. 184-225



*In alto, tavola diagnostica del prospetto secondario. Originale in scala 1:50
In basso, vista del modello di punti texturizzato del prospetto laterale*

CITTADELLA TARTOUS - SIRIA

2009 - 2011

Mare Nostrum

Progetto di ricerca dell'Unione Europea **Euromed Heritage IV**

Coordinamento scientifico: *prof. C. A. Garzonio (Università degli Studi di Firenze)*



In alto, vista panoramica della Cittadella di Tartous durante l'acquisizione laser scanning dai tetti adiacenti la Cappella dei Cavalieri

In basso, integrazione della planimetria esistente della situazione attuale (linee nere) con la planimetria estratta dalla modello complessivo di punti (linee rosse). Originale in scala 1:200

Sei paesi del Mediterraneo (Siria, Libano, Grecia, Italia, Malta e Tunisia) partecipano al progetto europeo *Mare Nostrum: A Heritage Trail along the Phoenician maritime routes and through the historic port cities*, con l'obiettivo di valorizzare il patrimonio culturale attraverso la comunicazione e la promozione del turismo sostenibile.

Sono stati scelti i siti pilota di Tartous (Siria) e Tiro (Libano).

Tartous, uno dei principali insediamenti dei Cavalieri Templari, è caratterizzata da una *Cittadella* chiusa da un doppio sistema mura concentriche. Tra le costruzioni più importanti si menzionano la Cappella dei Cavalieri e il sistema di gallerie crociate.

La ricerca è stata condotta con due finalità:

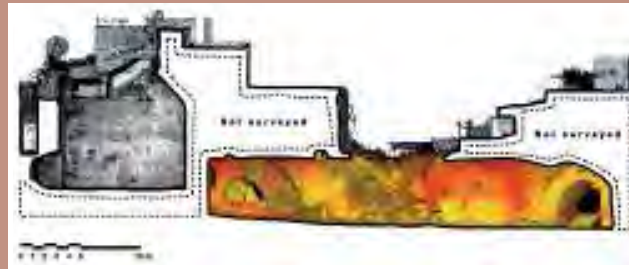
- *scientifica*, attraverso l'acquisizione di dati metrici con sistemi a scansione 3D, di supporto alle analisi sui materiali e le tecniche costruttive, sullo stato di conservazione e per il progetto di riqualificazione;
- *divulgativa*, attraverso l'acquisizione fotografica con panorami sferici per la creazione di tour virtuali, itinerari turistici, poster esplicativi, video e prodotti multimediali su CD/DVD e web.

Prodotti scientifici

I dati 3D, acquisiti con laser scanner distanziometrico a differenza di fase, HDS6000 (Leica Geosystems), hanno permesso di integrare le indagini sui materiali e le tecniche costruttive (*gruppo di ricerca coordinato dal prof. L. Marino dell'Università degli Studi di Firenze*). E' stato possibile misurare forme e dimensioni dei conci, il loro corretto posizionamento e la tecnica costruttiva con la quale sono stati assemblati.

Prodotti divulgativi

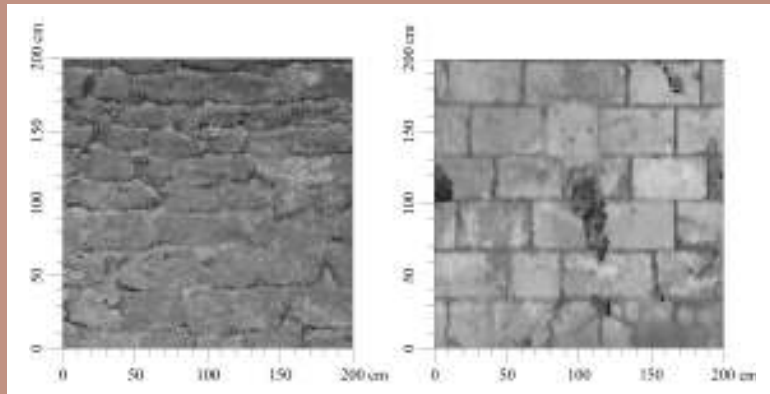
La *Cittadella* di Tartous è stata documentata con tecniche digitali innovative disponibili per la produzione di panorami sferici, mosaici di immagini ad alta risoluzione e immagini digitali stereo.



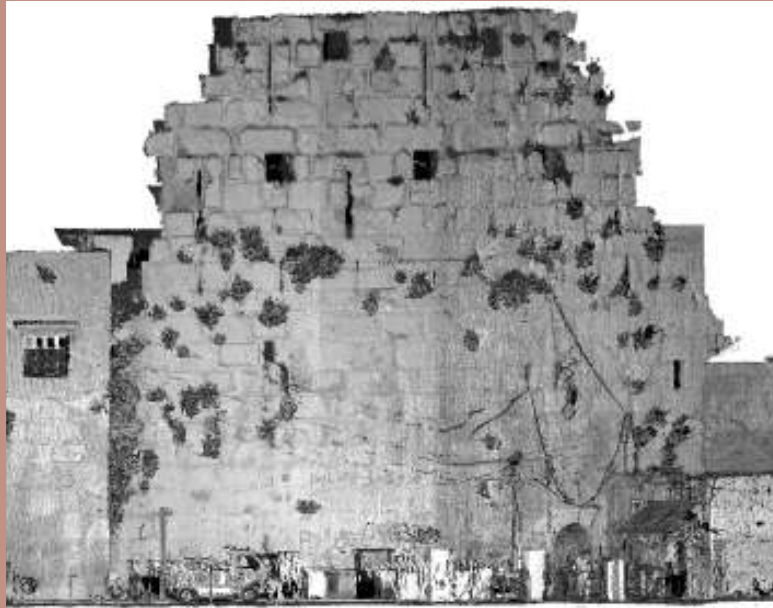
Sono state scattate più di 10.000 con fotocamera Nikon D90s reflex. Le foto sono rappresentative dei diversi aspetti della missione: mostrano i luoghi, le architetture, i paesaggi, i residenti e la produzione dell'artigianato locale. Per gli spazi più complessi o particolarmente ampi è stata usata una testa panoramica sferica, combinato con un obiettivo fish-eye da 15 mm. Sono stati prodotti più di 50 panorami, ognuno con dimensioni finali superiori ai 200.000 pixel per lato.

Le immagini panoramiche sono state utilizzate per realizzare spazi virtuali interconnessi in un tour.

Allo stesso modo, sono stati predisposti, per fini comunicativi, video esplorativi del modello di punti.



In alto, sezioni verticali passanti per la Cappella dei Cavalieri e per il sistema di gallerie. Originali in scala 1:50
 Al centro, campioni estratti dalla nuvola di punti: a sinistra, porzione di muratura del sistema di gallerie caratterizzata da piccoli blocchi di forma piuttosto irregolare; a destra, porzione di muratura della Cappella dei Cavalieri costituito da blocchi parallelepipedi perfettamente squadrati
 In basso, interfaccia web del tour virtuale di Tartous. A destra, mappa del tour con indicazione degli hot spots [online: <<http://www.eb4-marenostrium.net/virtualltour/pano/index.php>> (visitato il 15/12/2012)]



In alto, panorama sferico all'interno del sistema di gallerie crociate. Sopra, porzione di mura dell'antica cinta muraria crociata (a sinistra il modello di punti). A sinistra, video esplorativo all'interno del modello di punti

Tucci G., Algostino F, Bucalossi L., Conti A., Nobile A., **Cultural Heritage and Sustainable Valorization in the Governorate of Tartous with Reference to the Euromed IV Project: The Contribution of Geomatics**, in: Ioannides M., Fellner D., Georgopoulos A., Hadjimitsis D.G. (eds.), *Project Paper Proceedings of EuroMed 2010, 3rd International Euro-Mediterranean Conference "Digital Heritage", Limassol, Cyprus, November 8-13 2010*, LNCS 6436, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, ISSN 0302-9743, ISBN-13 978-3-642-16872-7, pp. 399-408

Sei paesi del Mediterraneo (Siria, Libano, Grecia, Italia, Malta e Tunisia) partecipano al progetto europeo *Mare Nostrum: A Heritage Trail along the Phoenician maritime routes and through the historic port cities*, con l'obiettivo di valorizzare il patrimonio culturale attraverso la comunicazione e la promozione del turismo sostenibile.

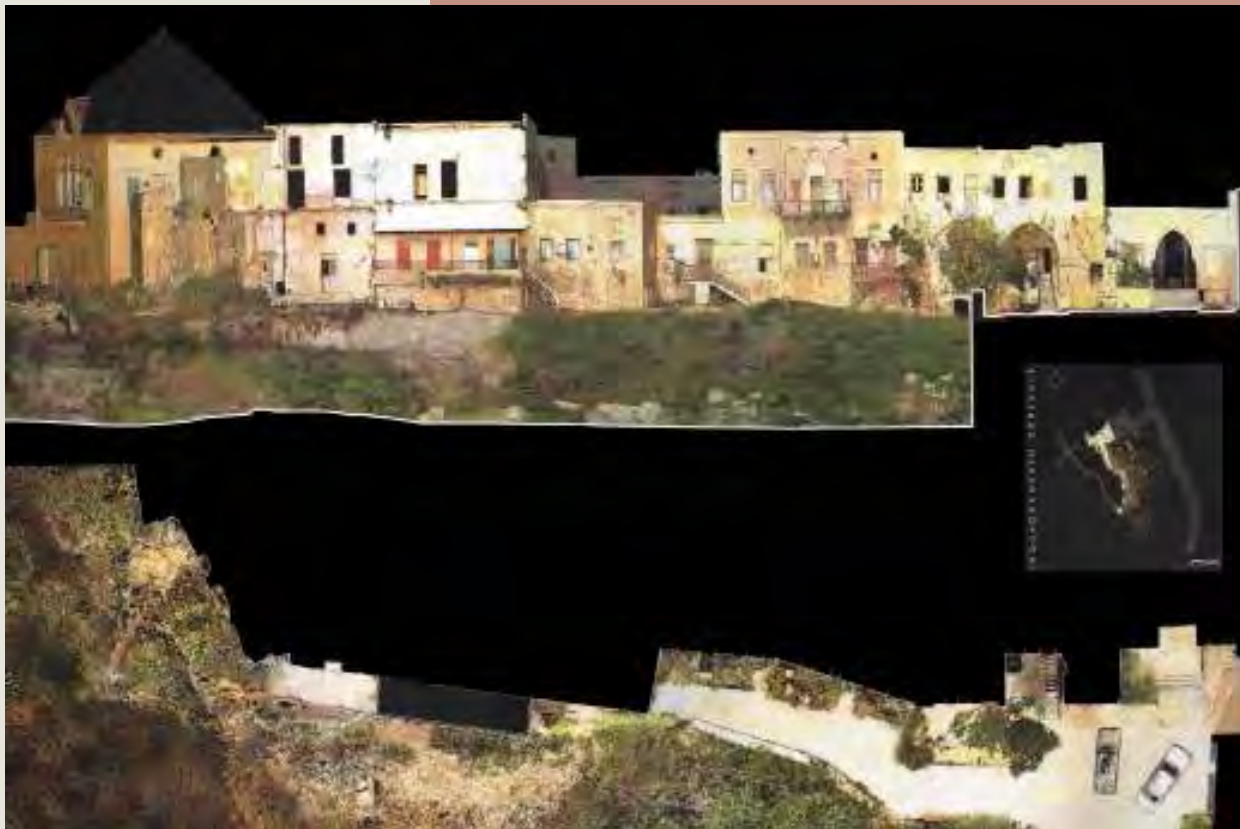
PROMENADE ARCHITETURALE TIRO - LIBANO

2009 - 2011

Mare Nostrum

Progetto di ricerca dell'Unione Europea **Euromed Heritage IV**

Coordinamento scientifico: *prof. C. A. Garzonio (Università degli Studi di Firenze)*



Sono stati scelti i siti pilota di Tartous (Siria) e Tiro (Libano).

Tiro è una città costiera nella quale si susseguirono, nel corso dei millenni, numerose popolazioni che la dominarono lasciando segni indelebili.

A partire dal 1975 fu pesantemente colpita dalla guerra civile libanese e sottoposta a una lunga occupazione israeliana fino al 2000. Un nuovo conflitto armato con Israele, nel 2006, ha portato nuovi ingenti danni materiali alla città.

Nel 1984 è stata inserita nella lista dei Patrimoni dell'umanità dell'UNESCO.



*In alto, planimetria e sezione prospetto della Promenade Architecturale. Tavole architettoniche integrate con viste ortogonali del modello di punti texturizzato. Originale in scala 1:100 [Camurri F., **Interventi conservativi in "Situazioni di crisi": il centro storico di Tiro, Libano. Tesi di Laurea in Architettura, Università degli Studi di Firenze, a. a. 2010-2011 (Relatore: Sabelli R. / Correlatori: Garzonio C. A., Mengozzi G., Tucci G.)**]. In basso, vista 3D texturizzata dell'ingresso alla Cittadella*



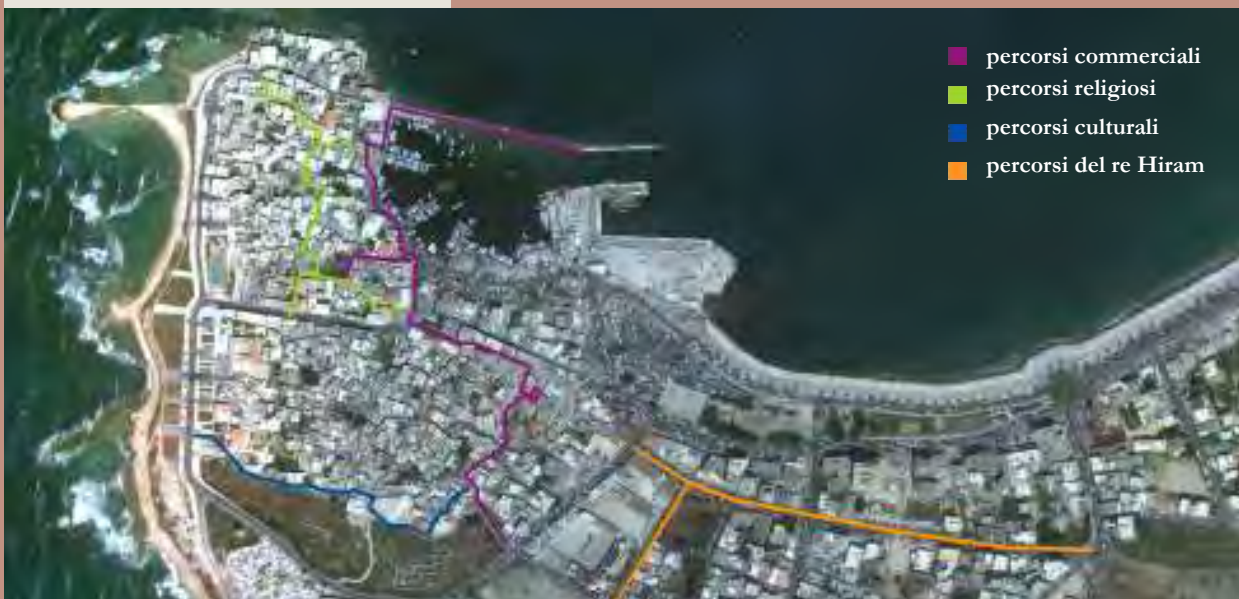
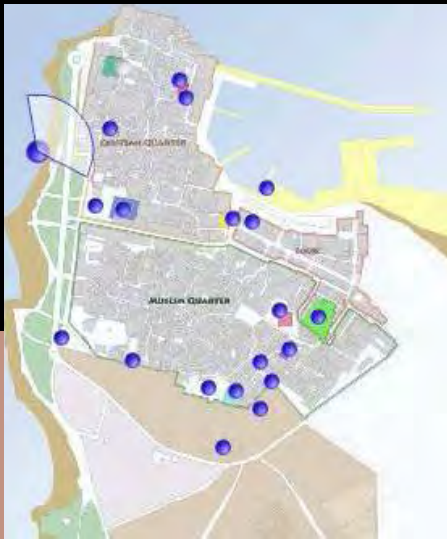
La ricerca è stata condotta con due finalità:

- *scientifica*, attraverso l'acquisizione di dati metrici con sistemi a scansione 3D, di supporto alle analisi sui materiali e le tecniche costruttive, sullo stato di conservazione e per il progetto di riqualificazione;
- *divulgativa*, attraverso l'acquisizione fotografica con panorami sferici per la creazione di tour virtuali, itinerari turistici, poster esplicativi, video e prodotti multimediali su CD/DVD e web.

Prodotti scientifici

I dati 3D, acquisiti con laser scanner distanziometrico a differenza di fase, HDS6000 (Leica Geosystems), sono stati integrati con il valore RGB derivante dalle immagini panoramiche sferiche. Sono stati elaborati sezioni orizzontali e verticali della Promenade Architecturale di accesso alla Cittadella di supporto al progetto di riqualificazione e restauro (*gruppo di ricerca coordinato dal prof. R. Sabelli dell'Università degli Studi di Firenze*).

*In alto, planimetria e sezione prospetto della Promenade Architecturale. Progetto di restauro. Originale in scala 1:100 [Camurri F., Interventi conservativi in "Situazioni di crisi": il centro storico di Tiro, Libano. Tesi di Laurea in Architettura, Università degli Studi di Firenze, a. a. 2010-2011 (Relatore: Sabelli R. / Correlatori: Garzonio C. A., Mengozzi G., Tucci G.)]
In basso, panorami sferici di alcuni siti culturali scelti per il tour virtuale e il percorso turistico*



- percorsi commerciali
- percorsi religiosi
- percorsi culturali
- percorsi del re Hiram

Prodotti divulgativi

Il progetto si pone come obiettivo fondamentale il turismo sostenibile attraverso attività mirate a promuovere la partecipazione della comunità al processo decisionale; riscoprire il passato nell'ottica di un collegamento con le altre città portuali del Mediterraneo; rafforzare e indirizzare le azioni delle autorità locali per la tutela e la riqualificazione del patrimonio materiale e immateriale; promuovere l'artigianato tradizionale. Tra gli output mappe turistiche nelle quali sono indicati gli itinerari culturali, commerciali e religiosi.



In alto, interfaccia web del tour virtuale di Tiro [online: <<http://www.eb4-marenostrum.net/virtualtour/pano/index.php>> (visitato il 15/12/2012)]

Al centro, interfaccia web con indicazione dei percorsi turistici

In basso, un momento di interazione ludico della scrivente con i bambini locali

CAPPELLA DEI MAGI PALAZZO MEDICI RICCARDI - FIRENZE 2010

Il percorso museale di palazzo Medici - Riccardi con la Cappella di Benozzo Gozzoli. Nuove modalità espositive per la valorizzazione cromatica delle superfici

Magazzini E., Tesi di Laurea Magistrale in Architettura, Università degli Studi di Firenze, a.a. 2010-2011 (Relatore: Centauro G. A. / Correlatori: Grandin N. C., Nobile A., Bonora V.)



In alto: a sinistra, ciclo pittorico di Benozzo Gozzoli (1459); a destra, coro ligneo di Giuliano da Sangallo (1470 circa).
In basso, inserimento dell'immagine della mappatura dell'area campione (parete sud con il Mago Baldassarre) nel modello complessivo di punti visualizzato in scala di grigi

La Cappella dei Magi spicca all'interno del Museo di Palazzo Medici Riccardi di Firenze per la ricchezza artistica degli affreschi del pittore Benozzo Gozzoli che rivestono le pareti come arazzi multicolori. La decorazione è completata dal coro ligneo addossato alle tre pareti dell'aula principale.

Lo studio della Cappella si è focalizzato soprattutto sulle indagini del colore del ciclo pittorico, oggettivamente rilevabili con applicazioni strumentali di tipo tecnico e scientifico (Mazzetta colore 4041 Color Concep, Matchstick, Spettrofotometro), per produrre una mappatura cromatica comparativa tra le cromie percepite con le luci attualmente esistenti e i colori naturali. Il rilievo 3D, realizzato con laser scanner distanziometrico a differenza di fase, HDS6000 (Leica Geosystems), ha permesso di contestualizzare l'area campione presa in esame, al fine di realizzare una corretta modalità di illuminazione delle pareti decorate e dipinte.

Ad ogni punto è stato associato un valore RGB acquisito con una fotocamera reflex (Nikon D700) dotata di un obiettivo Fisheye da 15 mm, montata su una testa panoramica sferica.

Gli output grafici prodotti, di supporto all'analisi del colore e del percorso museale sono:

Foto panoramiche sferiche

Statiche e dinamiche, per creare ambienti immersivi e per il texturing del modello complessivo di punti.

Piante, prospetti e sezioni significative

In scala 1:20 e integrate con le ortoreimmagini della nuvola di punti che agevolano ulteriormente l'interpretazione dell'oggetto, perché dispongono anche dell'informazione radiometrica.

Sulla base del dato metrico sono state decontestualizzate le aree cromatiche,



per proceder agevolmente nel nuovo progetto di illuminazione. Il rilievo di ogni famiglia cromatica è avvenuto per oggetti rappresentati nell'affresco (i calzari blu, i calzari rossi, le vesti verdi, le lance gialle, il cavallo bianco, i fondi verdi, ecc). Per ogni elemento, sono state individuate tre tonalità del colore:

- la *luminosità*, individua le parti più chiare, in luce;
 - la *cromia*, rappresenta la tonalità media, il colore vero e proprio dell'oggetto;
 - la *saturatione*, individua le zone d'ombra.
- Sono state simulate le percezioni degli affreschi, secondo quattro temperature colore, in luce diffusa: 1900 K, 3000 K, 4000 K e 6000 K.

Confrontando le foto così modificate, si



In alto, foto panoramica sferica. In basso, pianta verso il basso e verso l'alto integrati con viste ortogonali del modello di punti texturizzato. Originali in scala 1:20



*In alto, sezione trasversale (originale in scala 1:20).
In basso, simulazione della luce per ricreare la percezione originaria del 1400. A sinistra, illuminazione a 1900 K, a destra a 3000 K*

sembra più appropriato un impianto che emette una luce con temperatura colore di 3000 K, bianca ma con una tendenza calda, tale da rispettare la condizione originaria di Benozzo Gozzoli, senza allontanarsi eccessivamente da quella che era la percezione nel 1400.

L'impianto a LED potrebbe essere integrato da fasci di fibre ottiche per illuminare puntualmente dettagli significativi dell'affresco (le aree cromatiche rilevati, pennellate molto evidenti) o per creare effetti scenografici molto interessanti, quali, ad esempio, la realizzazione di torce a fibre, posizionate su banchi, per la fruizione della Cappella attraverso la simulazione dell'illuminazione quattrocentesca, realizzabile in occasione di particolari esposizioni temporanee.

Sotto. In alto, elaborazione delle aree cromatiche per richiamare l'attenzione sulla materia e non sulla forma, al fine di un efficace ipotesi di restauro; in basso, mappatura delle aree cromatiche in primo piano



In alto, sezione trasversale (originale in scala 1:20).
In basso, simulazione della luce per ricreare la percezione originaria del 1400. A sinistra, illuminazione a 4000 K, a destra a 6000 K

REPERTI ARCHEOLOGICI DELLE ANTICHITÀ EGEE E CIPRIOTE IN TOSCANA

2009 - 2012

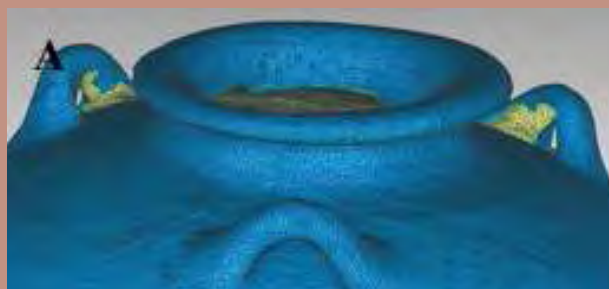
POR FESR 2007 – 2013

Progetto di ricerca della Regione Toscana

Coordinamento scientifico: *prof. A. M. Jasink (Università degli Studi di Firenze)*



*In alto, foto di alcuni reperti archeologici digitalizzati al Museo Nazionale Archeologico di Firenze
In basso, modello di alabastron prima e dopo le integrazioni volumetriche e cromatiche.*

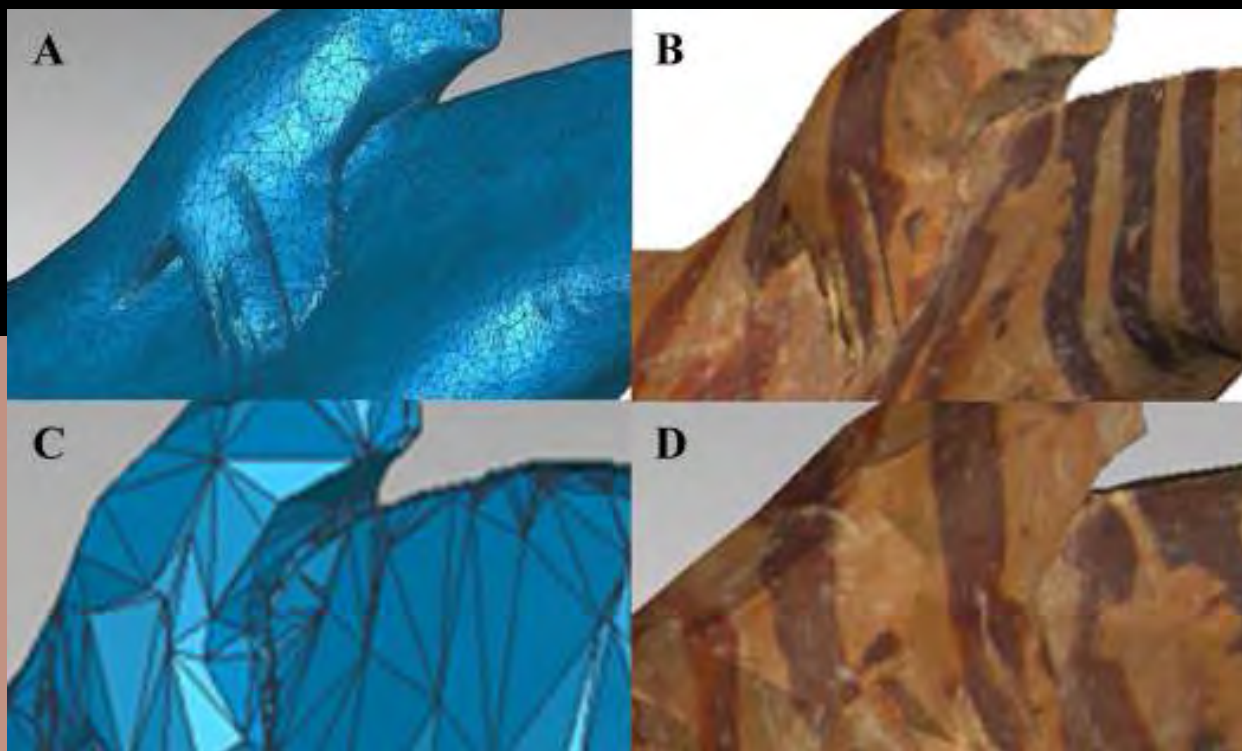


Il progetto di ricerca, finanziato dalla Regione Toscana, ha previsto la realizzazione di un museo virtuale interattivo con differenti finalità espositive e con contenuti adattati a modalità di lettura e interazione personalizzate in base al genere di utenza (specialisti del settore, studenti, famiglie).

L'allestimento, accessibile on-line a partire dal 1° giugno 2012 (<http://www.musint.it/>), è stato dedicato alle collezioni egee e cipriote conservate in varie istituzioni museali reali presenti sul territorio toscano, spesso nascoste o sconosciute.

Sono stati rilevati 24 oggetti esemplificativi delle collezioni egee e cipriote dell'Età del Bronzo: vasellame di varia morfologia e funzione; figurine antropomorfe e zoomorfe di ceramica, modellate a mano o al tornio, caratterizzate da decorazioni dipinte, incise o stampigliate; utensili e statuine di materiale lapideo scolpito e inciso. Dimensioni variabili in un range da 1 a 30 cm.

La realizzazione dei modelli 3D si è basata sulla duplice destinazione d'uso prevista dai referenti del progetto, l'esposizione nel



museo virtuale on-line e l'indagine scientifica per archeologi e restauratori in un archivio ad accesso limitato.

Sono state studiate, sperimentate e messa a punto procedure operative per tutte le fasi propedeutiche ed esecutive di acquisizione e di elaborazione dei dati per realizzare la riproduzione digitale tridimensionale dei reperti in base alle finalità del rilievo di partenza. Per il rilievo dei reperti è stato utilizzato il laser scanner da tavolo NextEngine HD, che rientra nella categoria degli scanner a triangolazione.

Analisi scientifica

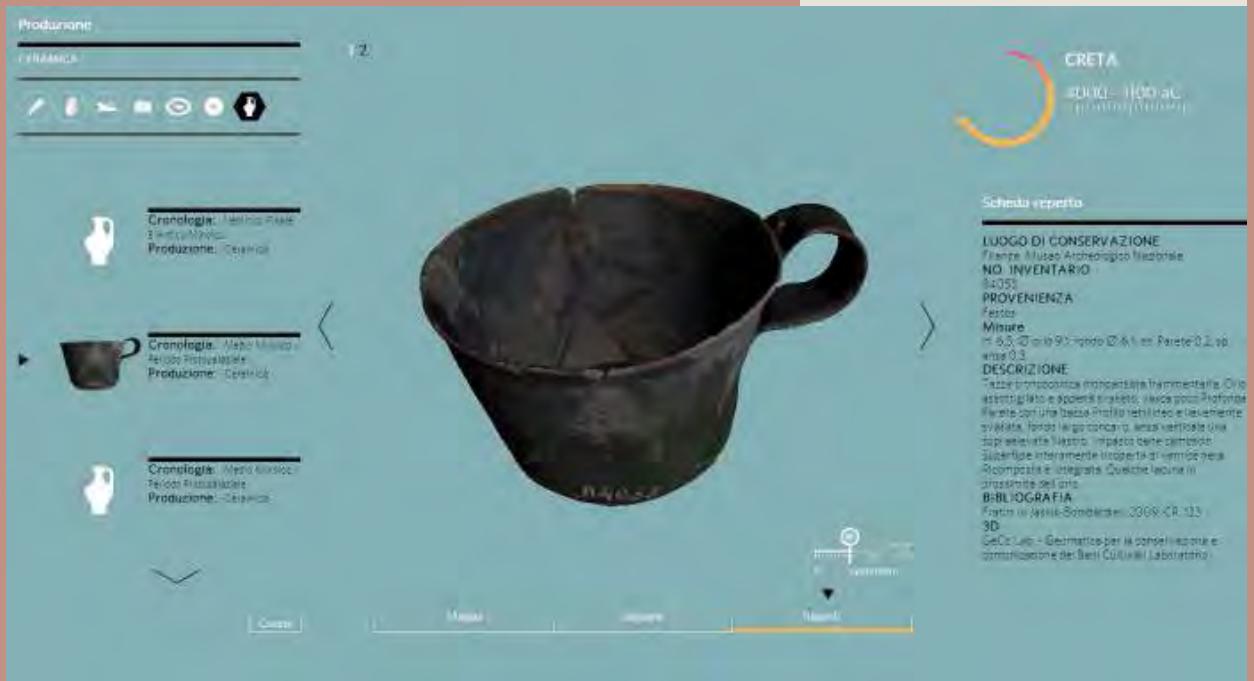
Il modello 3D è caratterizzato da un'altissima fedeltà delle caratteristiche morfologiche dell'oggetto reale, garantendo una precisione sub-millimetrica utile allo studio della comunità scientifica dello *status quo* del reperto. Il modello presenta volutamente intatte le limitate, ma inevitabili, lacune di acquisizione (interni dei recipienti con un'imboccatura stretta, parte inferiore dei manici, sotto-orli dei vasi dal corpo molto bombato, ecc.), insieme alle dissonanze e



In alto, particolare di mesh decimata ad una risoluzione ancora alta (A e B: 103.000 poligoni), e ad una risoluzione estremamente bassa (C e D: 5.000 poligoni)

Al centro, rappresentazione dei vari passaggi di integrazione volumetrica e cromatica

In basso, esempio di completamento di un modello di olletta con un interno semplificato, modellato ad hoc



imperfezioni dovute al corredo fotografico di qualità medio-bassa di cui si avvale la tecnologia impiegata (variazioni di tono, ombre), per non introdurre elementi soggettivi nel rilievo.

Divulgazione off-line e/o on-line

Il modello per la piattaforma espositiva del museo virtuale, è stato opportunamente semplificato nella tessitura poligonale e completato per una fruizione agevole e gradevole.

Sono state predisposte delle opportune linee-guida ragionate per tutte la fasi di lavoro: da un lato, per rendere trasmissibili i dati ottenuti per ogni reperto e per facilitare la comprensione del processo che li ha generati; dall'altro, per contribuire in tempi rapidi alla formazione di operatori privi di competenze tecniche specifiche per progetti di natura affine.

Tucci G., Cini D., Bonora V., Nobile A., **Proposta metodologica per la digitalizzazione 3D di reperti archeologici e SCHEDA 4 - Catalogo dei reperti digitalizzati in 3D**, in: Jasink A.M., Tucci G., Bombardieri L. (a cura di), *MUSINT. Le Collezioni archeologiche egee e cipriote in Toscana. Ricerche ed esperienze di museologia interattiva*, Firenze, Firenze University Press, 2011, ISBN 978-886655083-9, pp. 65-100 e pp. 107-114

Alcune schermate dell'interfaccia web del sito MUSINT (<http://www.musint.it/>). Esempio di esplorazione del modello tridimensionale del reperto archeologico n. 84053, la tazza troncoconica, proveniente da Festos (Creta) e del periodo Medio Minoico



CAPITOLO 2

SISTEMI A SCANSIONE 3D: DALL'ACQUISIZIONE ALL'ELABORAZIONE

DEFINIZIONE E PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

[21] Uno scanner 3D può essere definito come uno strumento in grado di registrare coordinate tridimensionali di punti regolarmente distribuiti su una porzione di superficie di un oggetto, in modo automatico e con elevata densità. Alcune proposte di classificazione si basano sul principio della misura della distanza, distinguendo sostanzialmente tra sistemi distanziometrici e sistemi a triangolazione. Spesso questa distinzione è stata fatta coincidere sia con il livello di precisione raggiungibile che con il range operativo e quindi, forse un po' forzatamente, con il campo di utilizzo.

Principi di misura della distanza

Sistemi a tempo di volo (ToF, Time of Flight)

Molti laser scanner basano la misura della distanza sul principio del tempo di volo, che consente di effettuare misure fino a centinaia di metri, con precisioni sub-centimetriche. Possono essere acquisiti punti distanti fino ad un chilometro (Optech, Riegl), mantenendo la precisione nell'ordine del centimetro.

Viene accuratamente misurato il tempo di volo che trascorre tra l'emissione della pulsazione laser, riflessa dall'oggetto, e il suo ritorno al sensore. Conoscendo la velocità della luce e moltiplicandola per la metà del tempo di volo trascorso tra emissione e ricezione si ottiene la distanza dall'oggetto.

Un vantaggio dell'impiego di impulsi laser è dato dalla possibilità di trasmettere

[21] Bonora V., Nobile A., Tucci G., **Modulo D11 – Scansione laser terrestre**, *Dispense dei corsi per Operatore Geomatico, Corsi di specializzazione pratica GeoCampus*, Leica Geosystems, 2011, pp. 40

una notevole quantità di energia in un breve intervallo di tempo, limitando così l'influenza del rumore di fondo. Per contro, per ottenere misure accurate della distanza, è necessario ricorrere ad impulsi molto brevi, che non possono quindi trasportare una grande quantità di energia.

Il problema fondamentale dei sistemi di misura basati sul tempo di volo consiste nel determinare esattamente il momento di arrivo del segnale riflesso; la precisione nella misura della distanza è quindi influenzata dalla qualità dello strumento impiegato per la determinazione del tempo trascorso e dal processamento del segnale: i principali parametri che entrano in gioco nel definire il rapporto tra precisione ed intensità sono la distanza, l'angolo di incidenza, le caratteristiche della superficie (Figg. 43, 44).

Il problema della determinazione della distanza, può essere ricondotto a:

$$d = c * \Delta t / 2$$

dove:

d è la distanza da calcolare;

c è la velocità di propagazione dell'impulso laser;

Δt è l'intervallo di tempo trascorso tra l'emissione dell'impulso e la sua ricezione.

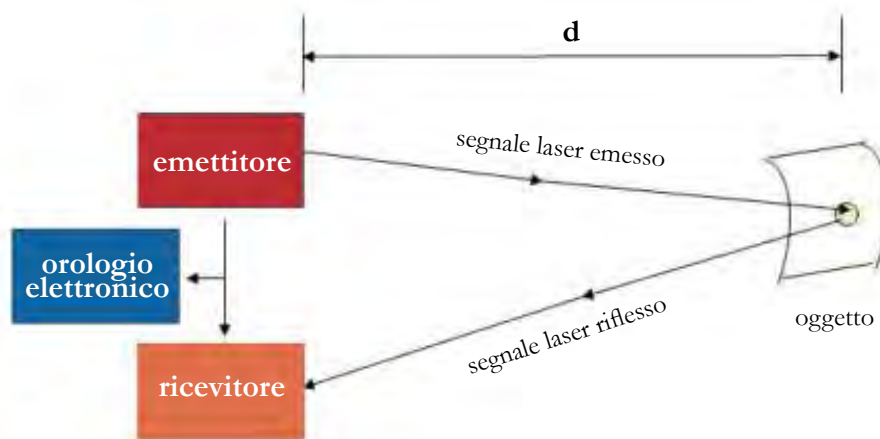


Fig. 43 - Principio di misura della distanza mediante il "tempo di volo" (time of flight) [Heine E., Van Genechten B., Lerma García J.L., Santana Quintero M., **3D RiskMapping. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning**, Übersetzt und Überarbeitet von Erwin Heine 152, Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2008, ISBN 978-84-8363-379-3]

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

- 1 Segnale laser
- 2 Specchio poligonale
- 3 Testa ottica
- 4 Display/tastiera
- 5 Cavo ethernet
- 6 Interfaccia TCP/IP
- 7 Antenna Wifi
- 8 Connettore USB
- 9 Camera fotografica
- 10 Pc
- 11 Dispositivo mobile
- 12 Software
- ⊖ Angolo di scansione verticale

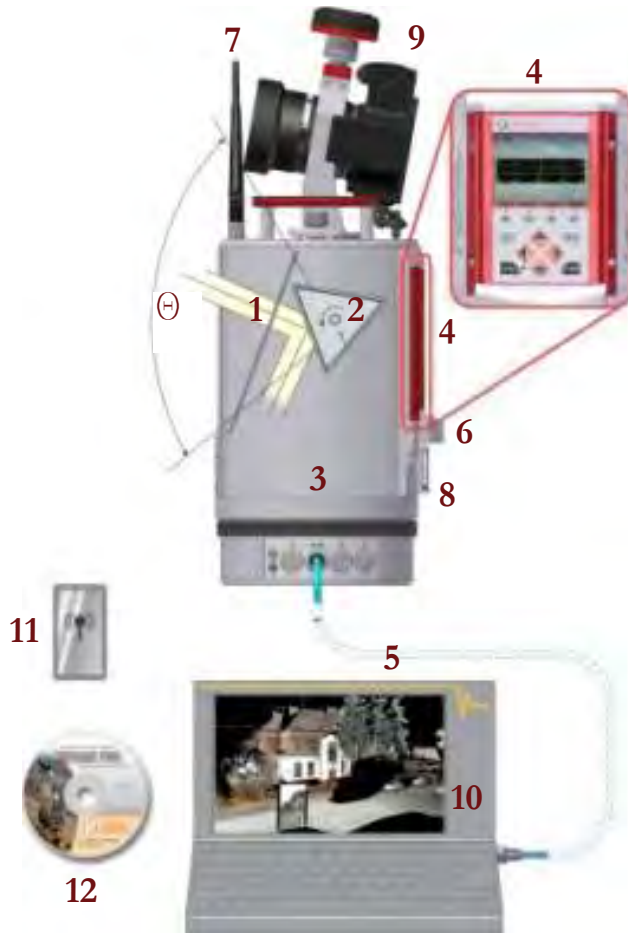


Fig. 44 - Sopra, descrizione del funzionamento degli scanner Time Of Flight Riegl, serie VZ. Il segnale laser (1) è deflesso da uno specchio rotante (2) in modo da acquisire dati con un ampiezza fino a 100° secondo la verticale. Il campo di acquisizione in orizzontale è invece di 360°, grazie alla rotazione della testa dello scanner (3). Lo scanner può essere collegato ad un pc portatile (10) mediante il cavo ethernet. Le impostazioni sono settate tramite il display o la tastiera (4) oppure via wireless tramite il collegamento tra un dispositivo mobile (11) o il pc (10) e l'antenna (7). La camera fotografica (9) è controllata direttamente dallo strumento. Il software (12) permette all'operatore di gestire l'acquisizione, la visualizzazione, la gestione e l'archiviazione dei dati [immagine da <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/>]. Sotto, alcuni laser scanner Time Of Flight disponibili in commercio (Leica Geosystems P20, Riegl VZ6000, Trimble GS200, Topcon GLS 1500, Optech ILRIS)

Sistemi a differenza di fase (Phase shift)

Altri strumenti ricorrono, per la misura della distanza, alla discriminazione di fase: lo scanner emette un'onda modulata e la distanza è calcolata confrontando la fase dell'onda emessa con quella ricevuta dopo la riflessione sulla superficie dell'oggetto (Figg. 45, 46).

Questa classe di strumenti ha generalmente una portata più limitata di quelli a tempo di volo ma una velocità di scansione superiore. Per questo motivo alcuni scanner a differenza di fase sono utilizzati in applicazioni dinamiche (su piattaforme in movimento: treni, auto, ecc.), in sinergia con altri sensori per consentire la referenziazione dei dati.

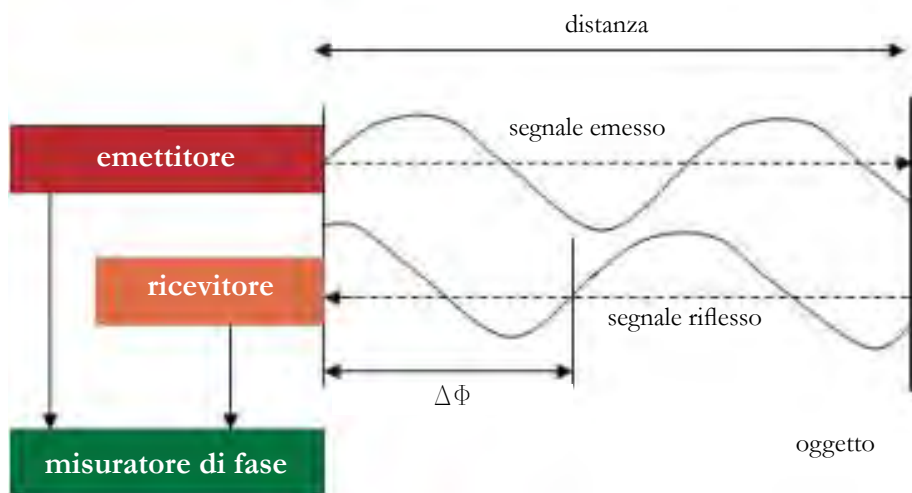


Fig. 45 - Sopra, Principio di misura della distanza mediante la "differenza di fase" [Heine E., Van Genechten B., Lerma García J.L., Santana Quintero M., 3D RiskMapping. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning, Übersetzt und Überarbeitet von Erwin Heine 152, Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2008, ISBN 978-84-8363-379-3]

Sotto, alcuni laser scanner Phase Shift disponibili in commercio (Leica Geosystems HDS7000, Faro Focus 3D, Z+F 5010C, Basis Surphaser 25HSX)



1 Specchio girevole

2 Display touch screen

3 Antenna Wifi

4 Connettori USB

5 Connettore Lemo

6 Connettore ethernet

7 Connettore alimentazione

8 Piombo laser

9 Pc

10 Dispositivo mobile

11 Cavo ethernet

12 Software

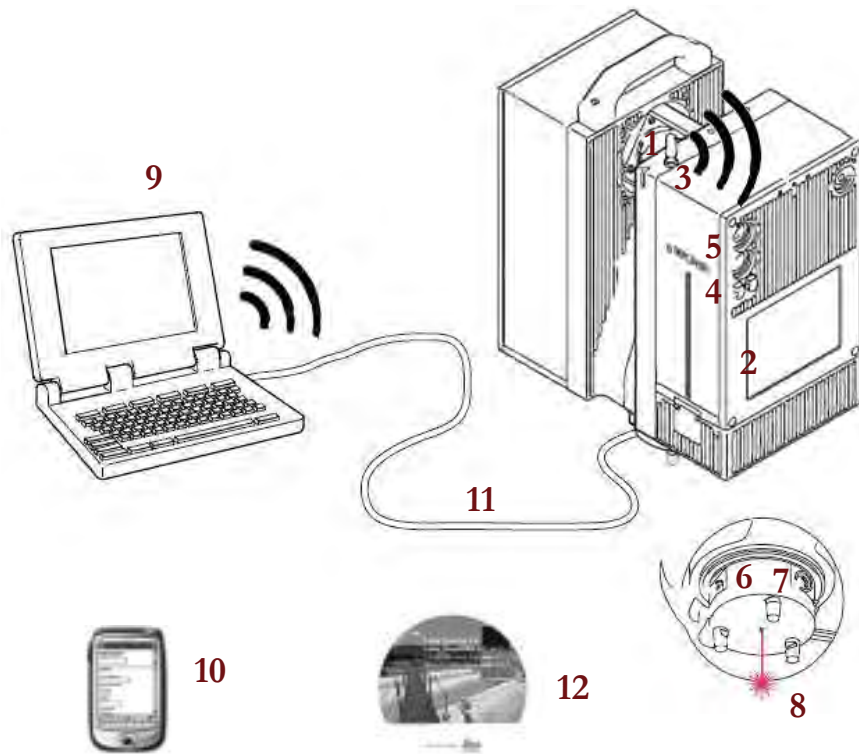
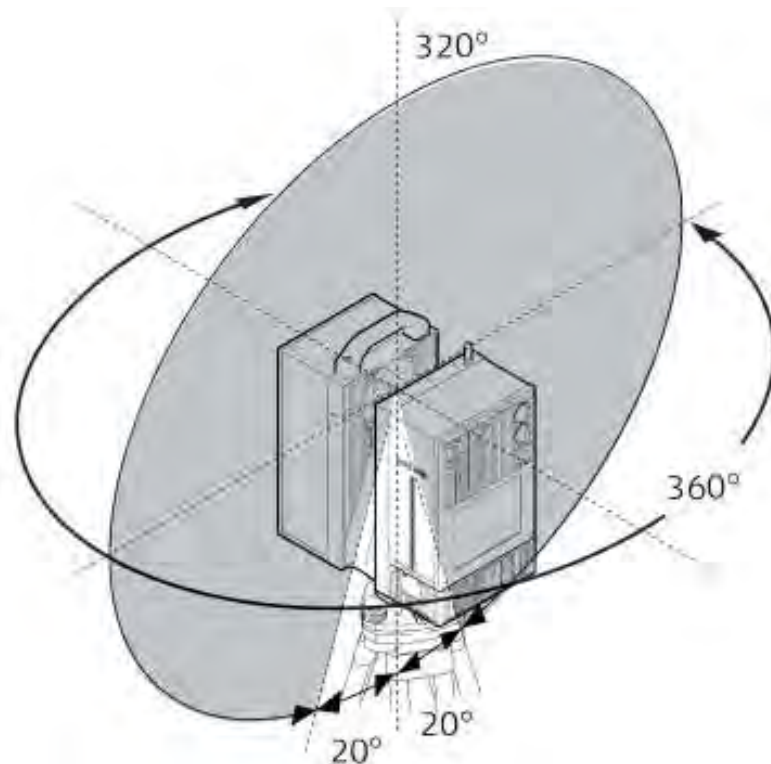


Fig. 46 - Descrizione del funzionamento degli scanner Phase Shift Leica Geosystems, serie HDS. Il segnale laser è deflesso da uno specchio rotante (1) in modo da acquisire dati con un campo visivo di 360° secondo l'orizzontale e 320° secondo la verticale.

Lo scanner dispone di un'interfaccia di rete (6) e di un'interfaccia Wi-Fi (3) che consentono il controllo esterno. Lo scanner può essere collegato ad un pc portatile (9) mediante il cavo ethernet (11). Le impostazioni sono settate tramite il display touch screen (2) o il pc (9) oppure via wireless tramite il collegamento tra un dispositivo mobile (10) o il pc (9) e l'antenna (3). Il software (12) permette all'operatore di gestire l'acquisizione, la visualizzazione, la gestione e l'archiviazione dei dati [immagini da http://www.leica-geosystems.com/en/HDS7000_90337.htm]



Gli strumenti che analizzano, per la misura della distanza, sia il tempo di volo che la differenza di fase vengono complessivamente definiti scanner distanziometrici, o *ranging scanner*.

In entrambi i sistemi la misura della distanza avviene in corrispondenza di direzioni azimutali e zenitali predefinite, generalmente secondo passi angolari costanti. Generalmente il raggio laser viene riflesso da un sistema di specchi rotanti. Le due soluzioni meccaniche adottate per alleggerire il più possibile le parti in movimento sono costituite da una testa rotante che emette il laser e da uno specchio che ruota nella direzione ortogonale o da un emettitore fisso e una coppia di specchi rotanti. Il sistema di controllo dei movimenti angolari del raggio laser influenzano sia la precisione di posizionamento dei singoli punti acquisiti, sia la velocità di scansione, sia la possibilità di inquadrare, con un'unica scansione, aree più o meno ampie.

Con “campo di acquisizione” (Fig. 47), si indica l'area rilevabile con una singola acquisizione; si esprime con un valore angolare relativo al piano verticale – ovvero “l'altezza” del campo – ed uno al piano orizzontale, che nella pressoché totalità degli scanner coincide con la rotazione attorno ad un asse meccanico che può essere reso verticale o inclinato fino a divenire addirittura orizzontale sulla base delle esigenze di visibilità e di forma dell'oggetto del rilievo.

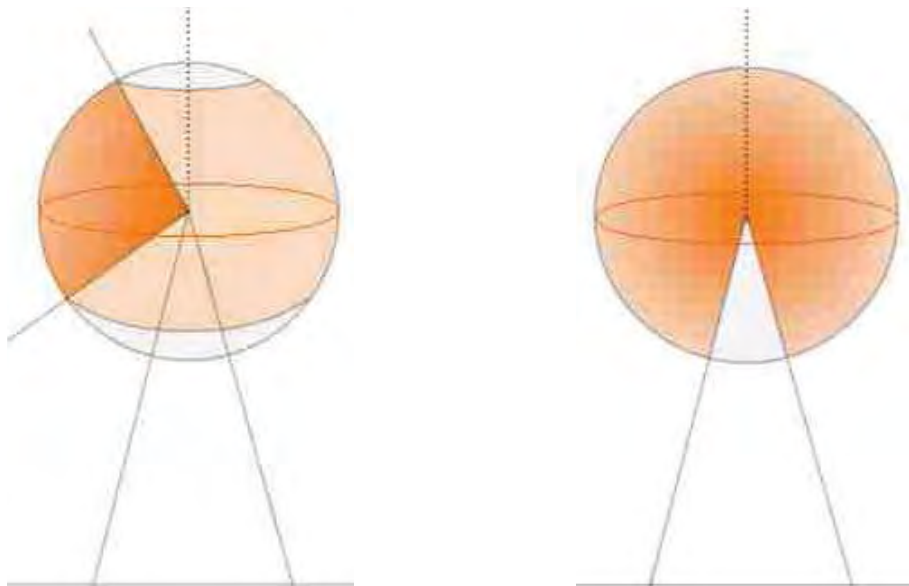


Fig. 47 - Campo di acquisizione. A sinistra, acquisizione della porzione di superficie sopra allo scanner (la testa dello strumento deve essere inclinata). A destra, acquisizione di tutte le superfici in vista rispetto al centro strumentale, con la sola esclusione della porzione occupata dal treppiede

STRUMENTAZIONE

Gli scanner distanziometrici operano in modo analogo a quello di una stazione totale: entrambi determinano la posizione di un punto nello spazio tramite le sue coordinate sferiche (un angolo sul piano orizzontale, uno sul piano verticale e una distanza nello spazio), successivamente trasformate in coordinate cartesiane. La differenza sostanziale è che nel caso della stazione totale il punto misurato è collimato, e quindi “scelto” a priori dall'operatore, mentre lo scanner campiona lo spazio in modo denso ma acritico.

Le specifiche tecniche fornite dai produttori spesso non sono direttamente confrontabili. La tabella (Tab. 1) sintetizza le principali caratteristiche degli scanner attualmente più diffusi.

Precisione angolare

E' legata alle caratteristiche costruttive dei vari strumenti ed, in particolare, ai sistemi meccanici adottati per la deflessione dello spot laser (generalmente oscillazione o rotazione di specchi o prismi). Nella determinazione delle coordinate cartesiane dei punti misurati vengono impiegati gli angoli spesso indicati come “direzione orizzontale” ed “elevazione” (anche se non tutti gli scanner riferiscono la coppia di angoli alla verticale). Ogni incertezza nella loro definizione comporta quindi un errore corrispondente ad uno spostamento del punto secondo una direzione perpendicolare a quella di misura (Fig. 49).

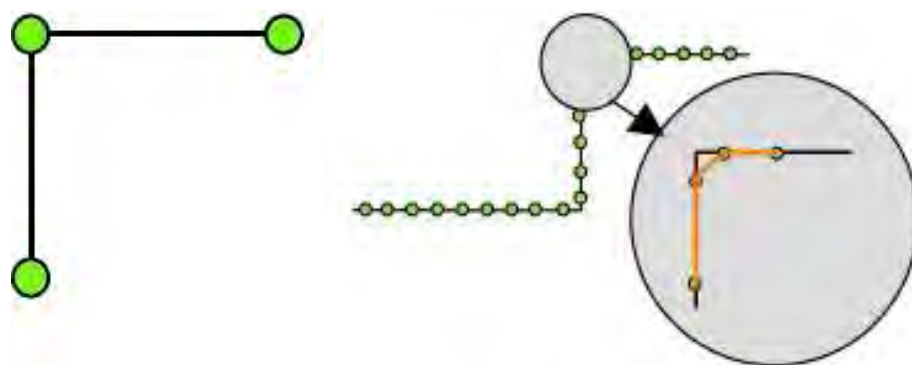


Fig. 48 - Acquisizione di una parete. A sinistra, con stazione totale; a destra, con scanner 3D. Nel primo caso le discontinuità sono individuate dall'operatore, che collima ogni punto da misurare; nel secondo caso la densità dei dati compensa la loro acriticità. Il dettaglio evidenzia che i punti scansionati, per quanto densi, non rilevano mai gli spigoli: la loro descrizione è quindi tanto migliore quanto più denso è il campionamento

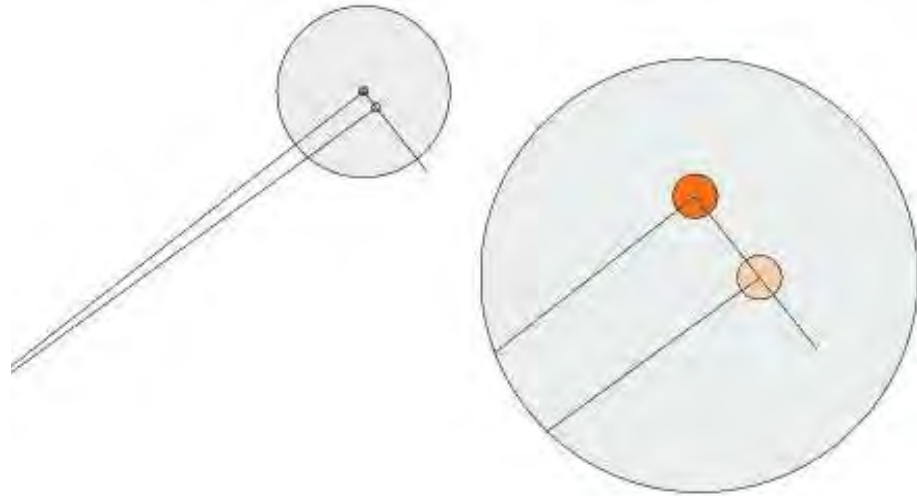
Per esempio, se la precisione angolare di uno scanner è di $\pm 22''$ (circa 66cc o $0^\circ.006$), l'errore corrispondente sulla posizione del punto a una distanza di 50m sarà dato dalla:

$$e = 50000 \text{ [mm]} \times 22'' / 206265'' = \pm 5 \text{ mm}$$

Modello	Principio di misura *	Campo inquadrato (V x H)	Min/max distanza [m]	Precisione angolare	Precisione nella distanza	Camera fotografica
Leica Scan Station 2	TOF	270 x 360	0.3–300	0.003°	4 mm @ 50 m	integrata 1 Mpx
Leica C10	TOF	270 x 360	0.3–300	0.006°	4 mm @ 50 m	integrata 4 Mpx
Leica HDS6200	PS	310 x 360	0.4–79	0.007°	3mm @ 50 m	opzionale
Riegl VZ- 1000	TOF	100 x 360	2.5–1,350	0.0005°	8 mm @ 100 m	opzionale
Riegl VZ-400	TOF	100 x 360	1.5–350/600	0.0005°	5 mm @ 100 m	opzionale
Optech ILRIS HD-ER	TOF	40 x 40 (360 x 360)	3–2,000	0.003°	7 mm @ 100 m	integrata 3.1 Mpx
Optech ILRIS HD-LR	TOF	40 x 40 (360 x 360)	3–3,000	0.004°	7 mm @ 100 m	integrata 3.1 Mpx
Topcon GLS-1500	TOF	360 x 70	1–330	0.006°	4 mm @ 150 m	integrata 2 Mpx
Maptek I-Site 8800	TOF	360 x 80	2.5–1,400	0.01°	10 mm	integrata 70 Mpx
Trimble GX 3D	TOF	360 x 60	<350	-	7 mm @ 100 m	integrata videocam
Trimble CX	TOF & PS	360 x 300	1–80	0.004°	2 mm @ 30 m	integrata
Faro Photon 120	PS	320 x 360	0.6–120	-	2 mm @ 10 m	integrata
Faro Focus3D	PS	305 x 360	0.6–20/120	-	0.6 mm @ 10 m, 0.95 mm @ 25 m	integrata 70 Mpx
Z+F IMAGER 5006	PS	310 x 360	0.4–79	-	0.7 mm @ 25 m	opzionale
Basis Surphaser 25HSX	PS	270 x 360	0.2–70	0.01°	1 mm @ 15 m	opzionale

Tab. 1 - Caratteristiche dei principali scanner terrestri [tabella tratta da Remondino F., **Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning**, *Remote Sensing*, 2011, 3(6), pp. 1104-1138]
 * TOF = Tempo di volo, PS = differenza di fase

Fig. 49 - Precisione angolare ed effetto nella determinazione di un punto



Precisione nella misura della distanza

Come avviene nelle stazioni totali, la precisione del sistema di misura della distanza è caratterizzata da una componente fissa e da una variabile, direttamente proporzionale alla distanza stessa (Fig. 50). In genere, gli strumenti a differenza di fase raggiungono portate sensibilmente inferiori a quelli a tempo di volo, ma con errori assoluti di entità spesso inferiore.

Gli strumenti a differenza di fase offrono, generalmente, accuratze leggermente inferiori a quelle degli strumenti a tempo di volo (Fig. 51). Possono peraltro essere ritenuti più vantaggiosi se si considerano altre caratteristiche, come per esempio la velocità di scansione (più elevata di quella degli scanner a tempo di volo).

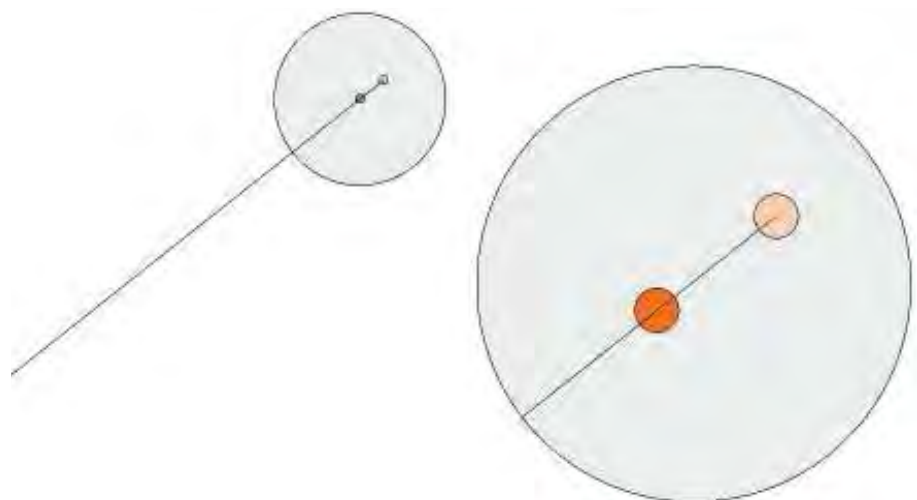


Fig. 50 - Precisione nella misura della distanza ed effetto nella determinazione di un punto

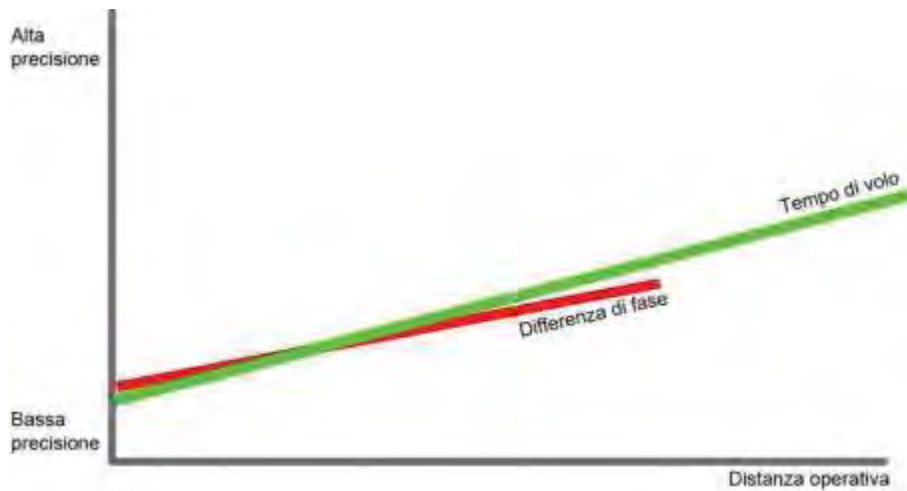


Fig. 51 - Andamento qualitativo della precisione nel posizionamento di un punto di scanner a tempo di volo e a differenza di fase

Risoluzione e “spot size”

Il termine “risoluzione” indica sia lo spazio che intercorre tra un punto misurato e quelli adiacenti, sia la capacità di uno scanner di descrivere dettagli geometrici di piccola dimensione sull’oggetto analizzato (Figg. 52, 53). Infatti, con tale termine, si esprime la densità della nuvola di punti. La distanza tra punti successivi è selezionabile dall’operatore ed è espressa con un valore angolare oppure con una distanza lineare riferita ad una superficie sferica concentrica allo strumento.

Bisogna poi ricordare che il segnale emesso da uno scanner non è perfettamente coerente ed arriva sulla superficie da rilevare con un’area finita. Lo “spot size” - a seconda dei modelli di scanner - ha dimensioni dell’ordine del centimetro a distanze di 30 - 50 m. Poiché il segnale emesso tende a divergere, la sua dimensione aumenta al crescere della distanza (Fig. 54).

E’ evidente l’inutilità di effettuare acquisizioni con passo di scansione inferiore alla dimensione dello spot laser sull’oggetto. Quanto più la dimensione dello spot-size è contenuta, tanto meglio lo strumento impiegato è in grado di descrivere i dettagli minuti.

A titolo esemplificativo, si considerano nel seguito le caratteristiche tecniche del laser scanner HDS6000, Leica Geosystems.

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

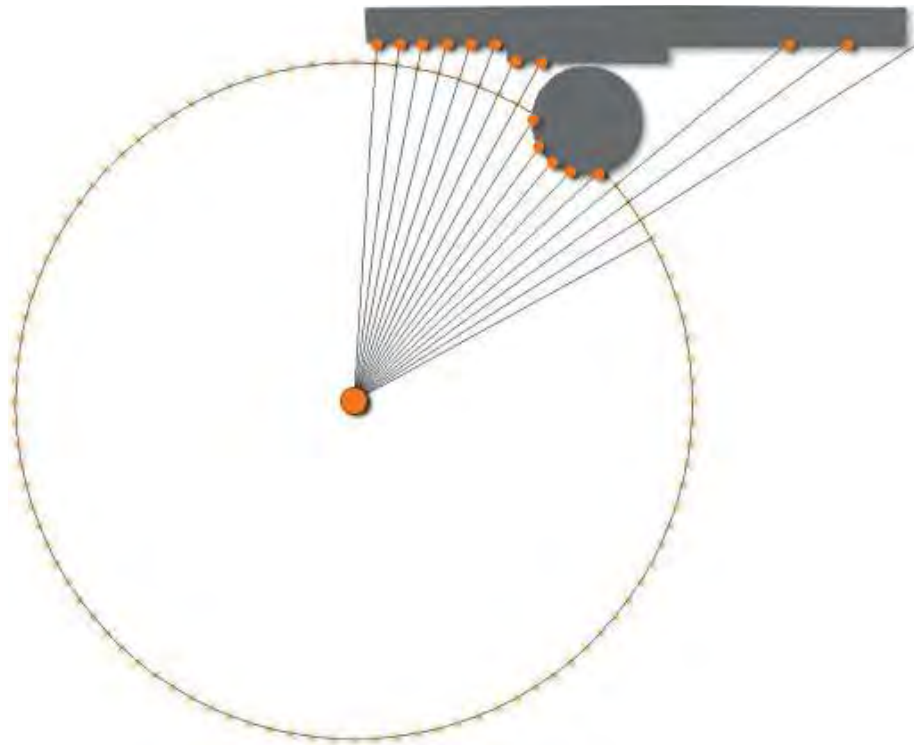


Fig. 52 - Risoluzione di scansione: i punti rilevati in ogni scansione sono tra loro equidistanti rispetto ad una superficie sferica concentrica allo strumento. L'immagine illustra la distribuzione dei punti sulla superficie di un oggetto ed evidenzia la presenza di lacune (ovvero di mancanza di dati rilevati) causate da elementi sporgenti o occultanti, che determinano, rispetto al centro strumentale, delle zone "d'ombra"



Fig. 53 - A parità di risoluzione angolare, la densità dei punti rilevati sull'oggetto varia con la distanza e con l'inclinazione della superficie da rilevare rispetto allo strumento

Ad una risoluzione "Medium" corrisponde un'acquisizione composta da 5000 x 2150 punti, cioè 10,75 milioni di punti (Fig. 55).

In questo caso, la risoluzione angolare in direzione azimutale risulta:

$$360^\circ / 5000 = 0^\circ,072 = 4'20''$$

e, identicamente, in direzione zenitale:

$$(180^\circ - 25^\circ) / 2150 = 0^\circ,072 = 4'20'' \text{ in direzione zenitale}$$

Con questa risoluzione, la dimensione del pixel a 10 m risulta:

$$(4 * 60 + 20)'' * 10.000 \text{ [mm]} / 206.265'' = 13 \text{ mm}$$

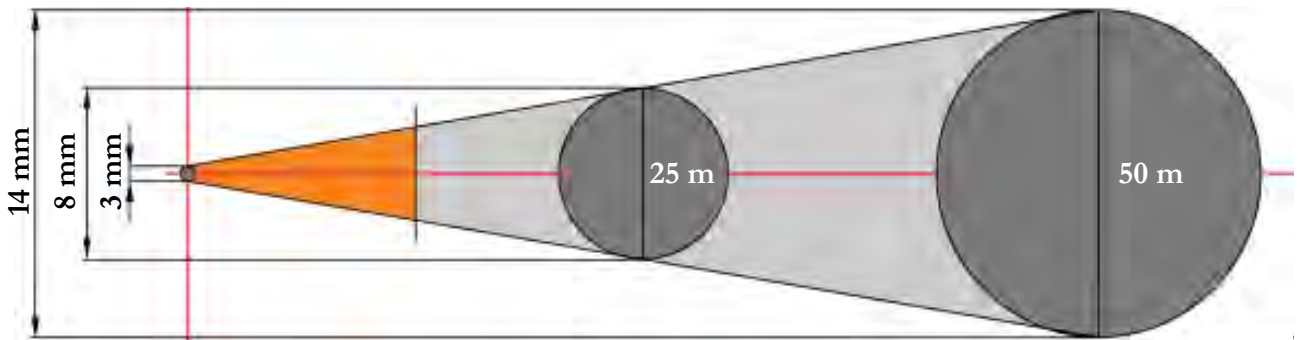


Fig. 54 - Spot-size. L'area di impatto dello spot aumenta con la distanza dell'oggetto rilevato. L'immagine schematizza il comportamento dello scanner HDS 6000 (Leica Geosystems): il segnale è emesso con un diametro di 3 mm e raggiunge dimensioni di 8 mm a 25 m e di 14 mm a 50 m

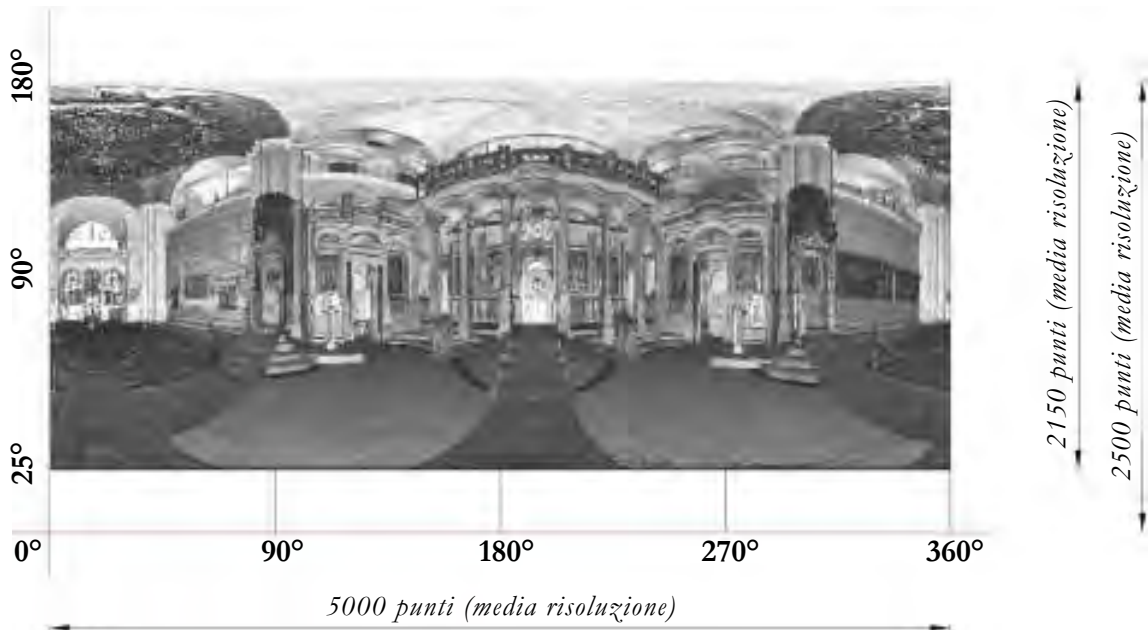


Fig. 55 - In alto, schematizzazione del sistema di riferimento sferico, proiettato sul piano, nel quale sono inizialmente acquisiti i dati. In basso, esempio di scansione acquisita con un campo di $360^\circ \times 155^\circ$; la visualizzazione è in proiezione cilindrica sviluppata sul piano (Navata centrale della Basilica del S. Sepolcro – Gerusalemme; rilievo GeCo, 2007 - 2010)

Caratteristiche della superficie

Sono stati osservati errori sistematici, in alcuni casi di entità apprezzabile rispetto alla precisione di misura dello strumento valutato, legati alle caratteristiche materiche e cromatiche della superficie analizzata. Inoltre, una condizione operativa sicuramente svantaggiosa è quella che si presenta nel caso di acquisizioni in direzione normale a superfici estremamente riflettenti o realizzando scansioni con lo strumento orientato contro luce. Poiché in entrambi i casi, a causa delle radiazioni di disturbo, i punti possono essere o non acquisiti o affetti da errori grossolani è importante progettare adeguatamente la successione delle scansioni in particolare per il rilievo di facciate di edifici.

Condizioni atmosferiche

Le condizioni atmosferiche a cui è in grado di lavorare lo strumento consentono intervalli di accettabilità abbastanza ampi. Tuttavia c'è da notare che è sconsigliabile effettuare una scansione in condizioni estreme, in particolare, valori troppo differenti della temperatura potrebbero alterare la misura della distanza a causa della diversa densità dell'aria in due momenti di scansione abbastanza lontani uno dall'altro. Non ci sono finora studi precisi sull'influenza di tali variazioni estreme. Per quanto riguarda l'umidità le conclusioni si possono trarre con maggiore certezza: è sicuramente sconsigliabile effettuare delle scansioni con tassi di umidità molto alti. In tali condizioni, infatti, le goccioline d'acqua sospese in aria o sugli oggetti da scandire possono fungere da finte superfici di riflessione per i raggi laser, alterando così in maniera imprevedibile la misura.

RISULTATO DI UNA SCANSIONE

Uno scanner, come uno strumento topografico tradizionale, associa ad ogni punto rilevato tre misure:

- l'angolo azimutale;
- l'angolo zenitale;
- la distanza.

Queste misure vengono poi trasformate in coordinate cartesiane nel sistema di riferimento (Fig. 56) che ha origine nel “centro” strumentale, assi x e y nel piano orizzontale (se non ci sono assetti diversi dello strumento) e asse z rivolto verso la verticale ascendente (zenit).



Fig. 56 - Il sistema di riferimento cartesiano intrinseco ha origine nel centro strumentale, asse Z verticale (se non lo si inclina intenzionalmente) e orientamento della coppia XY casuale

Se l'immagine captata può essere visualizzata come proiezione piana, sviluppo di una superficie cilindrica con asse coincidente con la direzione z, ad ogni punto viene associata una terna di coordinate cartesiane. Si genera, cioè, una immagine 3D (in toni di grigio, Fig. 57 in alto) e alla scansione può essere associata una immagine digitale RGB (a colori, Fig. 58). Per ciascun punto viene poi rilevata anche la quantità di energia riflessa, detta riflettanza (falsi colori, Fig. 57 in basso). Talvolta si utilizzano colori “ipsometrici” relativamente alla distanza, cioè che variano con l'aumentare della distanza secondo una scala predefinita (Fig. 58).

I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

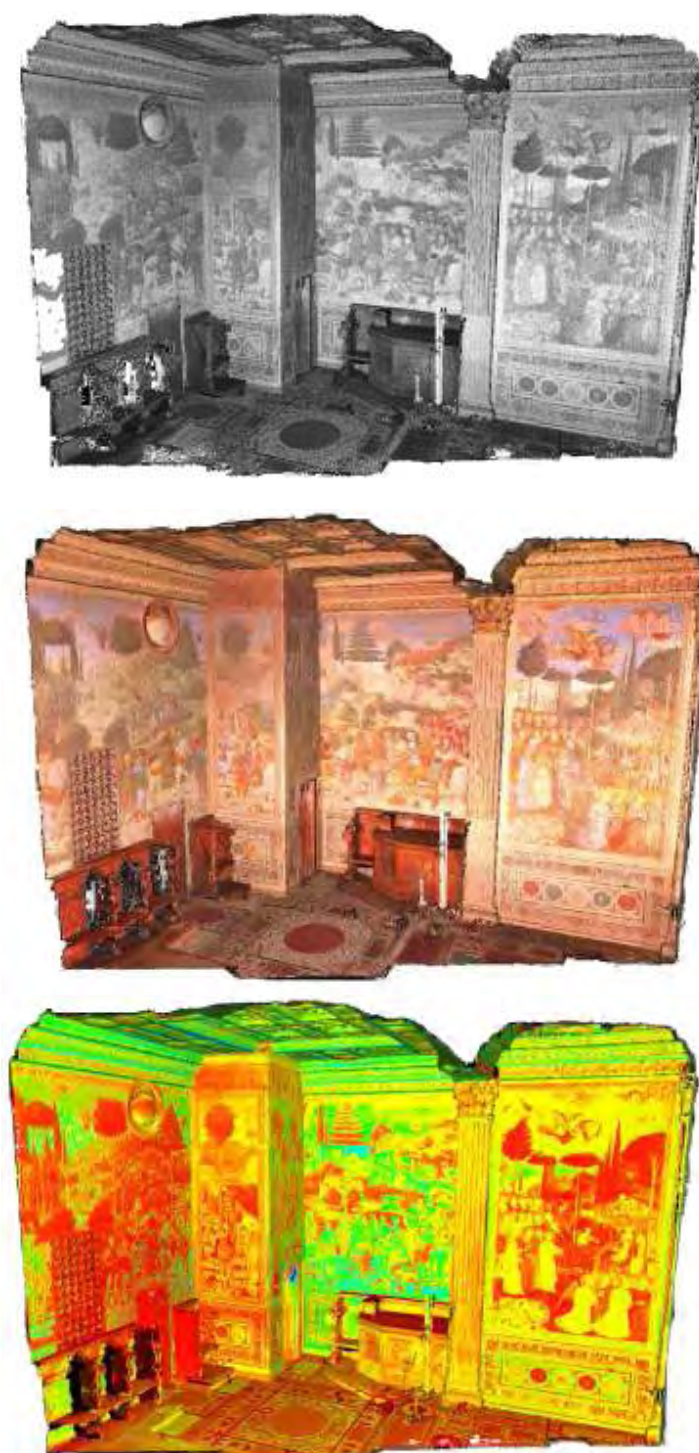


Fig. 57 - Tre modi di visualizzare la medesima scansione: in scala di grigi, a colori (RGB) e in falso colore abbinato alla misura della riflettanza effettuata su ciascun punto rilevato (Cappella dei Magi, Palazzo Medici Riccardi di Firenze, rilievo GeCo, 2011)

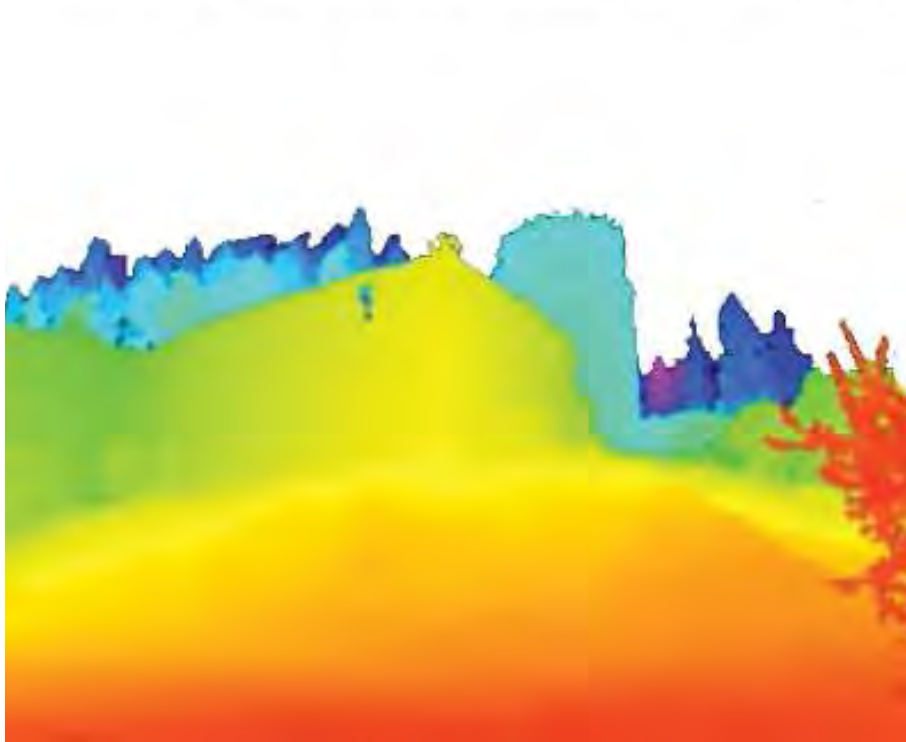


Fig. 58 - Altre modalità di visualizzazione: in alto, scala di grigi in silhouette; in basso, scala ipsometrica

ACQUISIZIONE DEI DATI

Le fasi principali di un rilievo metrico con tecnica laser scanning consistono in: acquisizione, registrazione ed elaborazione dei dati richiesti per il conseguimento degli obiettivi previsti. La progettazione dell'intero percorso costituisce il presupposto indispensabile per il coordinamento di tutte le operazioni successive e per il controllo della qualità dei risultati. La geometria delle prese e la risoluzione di scansione è di volta in volta progettata in funzione delle caratteristiche formali e dimensionali degli spazi indagati.

Nel preventivare i tempi di acquisizione è importante ricordare che, rispetto all'esecuzione delle scansioni vera e propria, sono prevalenti i tempi per lo spostamento del sensore, in particolare quando si debbano eseguire prese anche da posizioni sopraelevate e sia quindi necessario predisporre ponteggi o sfruttare sistemi elevatori (*Fig. 59*). In quest'ultimo caso è però fondamentale assicurarsi preventivamente della stabilità del supporto: oscillazioni anche minime dello scanner in fase di acquisizione comportano infatti irrecuperabili deformazioni della scansione.



Fig. 59 - Scansione realizzata da cestello elevatore (Gigante dell'Appennino, Parco Mediceo di Pratolino, Firenze, rilievo GeCo, 2011)



Fig. 60 - Scansione realizzata in condizioni di minima distanza operativa (interno dell'Edicola del Santo Sepolcro, Gerusalemme, rilievo GeCo, 2007 - 2010)

Nelle applicazioni architettoniche, il vincolo maggiore talvolta non è dato tanto dalla massima portata dello strumento quanto dalla necessità di operare in spazi ridotti (Fig. 60).

Negli scanner distanziometrici la geometria di acquisizione è generalmente riconducibile ad una proiezione centrale, quindi le considerazioni per l'acquisizione di una range map soddisfacente sono analoghe a quelle per la presa di una buona fotografia. Come in ogni campagna fotografica che intenda documentare in modo esaustivo spazi articolati, è generalmente necessario realizzare più acquisizioni, da punti di vista differenti. Questo consente, in primo luogo, di registrare i dati relativi alle zone di sottosquadro, acquisendo una documentazione quanto più possibile uniformemente distribuita sull'oggetto. Inoltre, occorre considerare che la condizione ottimale di misura è quella di ortogonalità: prese molto defilate consentono di acquisire superfici più estese, ma con dati di qualità inferiore (minore energia del segnale riflesso da superfici scorciate, dimensione dello spot maggiore per le zone più distanti, risoluzione della range map non uniforme).

Schemi di acquisizione

Per quanto riguarda gli schemi di acquisizione, le condizioni di presa adottabili rispettivamente nel caso di spazi interni, oggetti da documentare a tutto tondo e oggetti con una dimensione trascurabile rispetto alle altre (come nel caso delle facciate) si possono schematizzare come illustrato nelle immagini seguenti (Fig. 61).

Per necessità intrinseche alle successive elaborazioni, dovrà essere sempre presente un sufficiente grado di sovrapposizione tra ogni ripresa e le altre che coprono aree limitrofe; l'estensione della zona di sovrapposizione è diversamente quantificabile a seconda della morfologia della zona comune. Ovviamente una completa documentazione deve prevedere, in funzione delle dimensioni dell'oggetto esaminato, acquisizioni non solo dal basso, ma possibilmente a quote diverse, compatibilmente con le esigenze legate alla scarsa maneggevolezza dei sistemi a scansione e alla stabilità necessaria per la corretta esecuzione delle misure. E' evidente che nel progettare la geometria di acquisizione si dovrà infine tener conto delle caratteristiche dello scanner (ad esempio distanza ottimale di ripresa dalla superficie) e delle possibilità di movimentazione nello spazio circostante l'oggetto del rilievo.

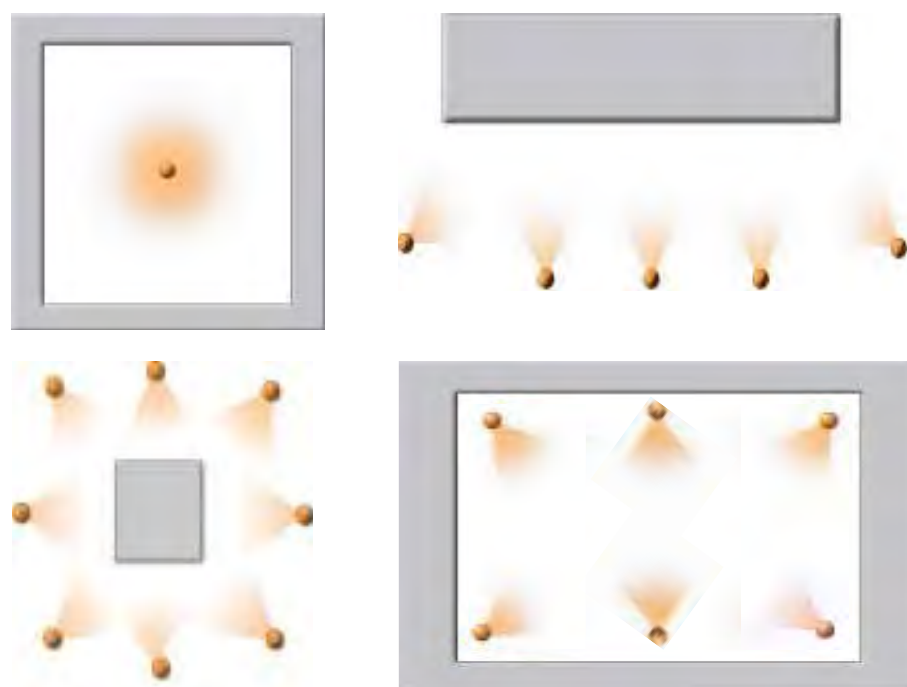


Fig. 61 - Schema di posizionamento dello scanner. A sinistra, in alto, rilievo di uno spazio interno con una sola scansione; in basso, rilievo di un oggetto a tutto tondo (edificio isolato, gruppo statuario, ecc.) A destra, in alto, rilievo di un oggetto a prevalente sviluppo lineare (facciata di un edificio, ecc.); in basso, rilievo di uno spazio interno con più scansioni da punti di vista diversi

Tipologie e disposizione dei target

L'individuazione di alcuni punti (segnali o target), correttamente riconoscibili e definibili sulla scena acquisita, è fondamentale per la referenziazione di un rilievo laser scanning in un sistema di riferimento predefinito.

I target sono elementi dotati di una buona riflettanza e di forme e dimensioni alquanto variabili, soprattutto in dipendenza dalla distanza dallo scanner e dalla risoluzione della scansione. Le coordinate dei centri dei target sono spesso determinate con un rilievo topografico "classico", mediante stazione totale, e riportati in un sistema di riferimento unitario così che le singole scansioni possano poi essere "collegate" tra di loro e formare un unico modello tridimensionale dell'oggetto rilevato.

Nonostante la spinta introduzione di automatismi in fase di misura, è buona pratica realizzare degli eidotipi (Fig. 62) che rappresentino la configurazione schematica della zona in analisi, le varie localizzazioni dello scanner, l'estensione delle singole acquisizioni sull'oggetto, la posizione, il tipo e il nome dei target.



Fig. 62 - Eidotipo: riporta il disegno schematico della pianta, la posizione e la denominazione delle postazioni di scansione e dei target (Sala dei Gessi, Galleria dell'Accademia, Firenze, rilievo GeCo, 2011)

Spesso si usano target adesivi di varie dimensioni; tutti devono essere numerati (o codificati) in modo univoco per evitare confusioni.

Esistono anche target magnetici (Fig. 63) che possono essere ruotati (attorno a un asse orizzontale o verticale) in modo da risultare visibili in scansioni diverse operate da posizioni circa ortogonali.

I target possono essere identificati all'interno della nuvola di punti con funzioni "automatiche" basate sull'analisi della riflettanza e/o sul riconoscimento della forma (Fig. 63).

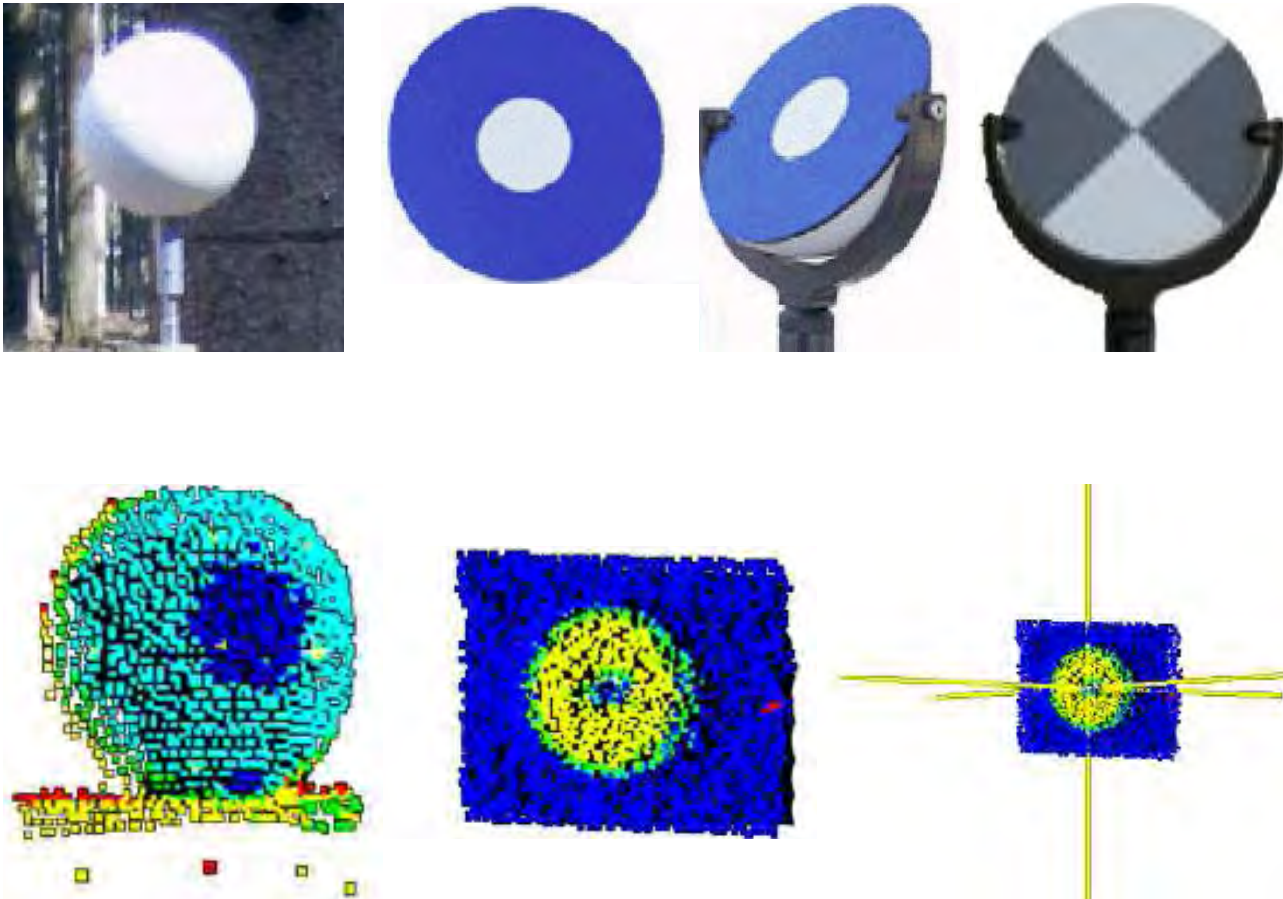


Fig. 63 - Sopra, vari target artificiali, adesivi e magnetici. Sotto, rilievo laser scanning: da sinistra, target sferico, target piano e determinazione automatica delle coordinate del centro di un target

REGISTRAZIONE DEI DATI

Ogni scansione acquisita è inizialmente riferita ad un proprio sistema di riferimento, solidale con il centro strumentale. Soltanto in fase di post processing sono definiti i parametri delle trasformazioni geometriche necessarie ad esprimere le coordinate delle varie scansioni in un unico sistema di riferimento.

Il sistema di riferimento finale può coincidere con quello di una scansione o essere definito indipendentemente dalle acquisizioni (referenziazione in un sistema predefinito).

Registrazione tramite punti omologhi

La “registrazione” dei modelli consiste nella loro unione in un unico sistema di riferimento - una prima fase consiste nell'avvicinarsi a tale risultato unendo in modo approssimato le scansioni ed è chiamata “allineamento”.

È necessaria una buona sovrapposizione tra range maps successive, in modo che siano individuabili, nella zona in comune, coppie di punti corrispondenti. Si possono utilizzare:

- *punti naturali*, come spigoli o risalti, ma anche significative variazioni di riflettanza su superfici geometricamente uniformi (Fig. 64);
- *punti artificiali*, target, posizionati sulla scena (Fig. 65).

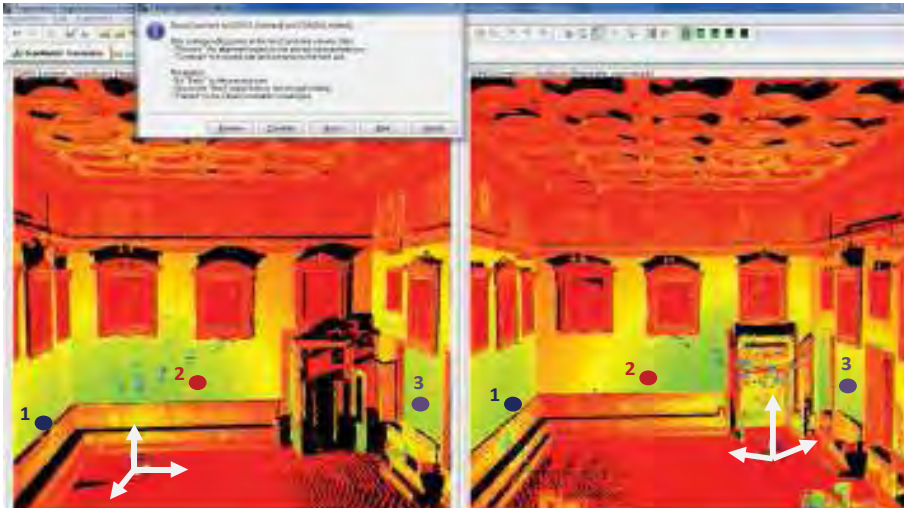


Fig. 64 - Riconoscimento di punti omologhi sulla scena tra una coppia di scansioni adiacenti. I punti naturali 1, 2, 3 sono stati individuati sugli spigoli dei tre quadri distribuiti sulle tre pareti. E' sempre opportuno garantire il legame tra scansioni attraverso segnali uniformemente distribuiti (Sala Consiliare, Prato, rilievo GeCo, 2010)

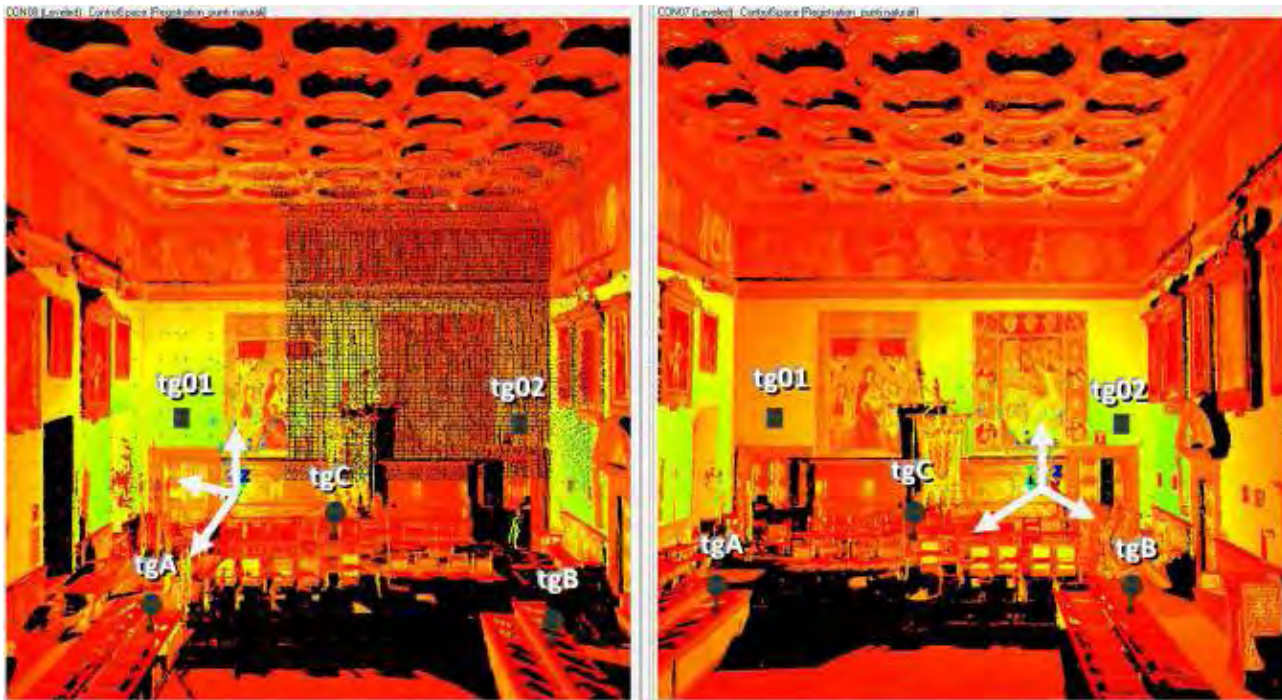


Fig. 65 - Riconoscimento dei target, piani (tg01, tg02) e tridimensionali (tgA, tgB, tgC), sulla scena. L'allineamento tra le due scansioni è garantito dalla presenza di almeno tre target in comune (Sala Consiliare, Prato, rilievo GeCo, 2010)

Nel primo caso la precisione con la quale i punti possono essere collimati dipende ovviamente dalla precisione dello scanner impiegato oltre che dalla risoluzione di scansione. E' praticamente impossibile acquisire lo stesso punto esattamente in corrispondenza di uno spigolo, e lo stesso spigolo osservato da due punti di vista diversi sarà al meglio rappresentato da una coppia di punti sicuramente distinti. Il riconoscimento manuale di punti naturali corrispondenti dovrebbe quindi essere limitato alla definizione di un "allineamento" approssimato tra le immagini.

Nel secondo caso, invece, l'impiego di target dedicati, piani e tridimensionali, consente di migliorare la precisione con la quale sono individuati i punti omologhi. L'appropriato numero di target ha permesso di snellire significativamente la fase di allineamento: nella maggior parte delle range map erano infatti stati ripresi almeno tre target in comune con le scansioni adiacenti.

Registrazione tramite punti di coordinate note

La registrazione delle scansioni avviene tramite il riconoscimento di almeno tre punti di coordinate note in ogni range map. E' evidente l'importante differenza rispetto alla modalità precedente:

- la registrazione tramite *target* implica la presenza di almeno tre target uguali in ogni coppia di scansioni (Fig. 65);
- la registrazione tramite *punti di coordinate note* implica la presenza di almeno tre target, non necessariamente uguali, in ogni coppia di scansioni (Fig. 66).



Fig. 66 - L'allineamento tra le due scansioni è garantito dalla presenza di almeno tre target di coordinate note (Sala Consiliare, Prato, rilievo GeCo, 2010)

Referenziazione tramite punti di coordinate note

In alcuni casi i target vengono usati per la referenziazione del modello complessivo di punti, allineato tramite i punti naturali o artificiali. Questa modalità è solitamente adottata quando non è possibile raggiungere tutti gli ambienti con la rete d'inquadramento topografico: bastano almeno tre punti di coordinate note per rototraslare l'intero modello in un sistema di riferimento predefinito. Solitamente questa modo operativo trova largo uso:

- quando si vogliono collegare porzioni di oggetto non collegabili direttamente tra loro. Basti pensare, ad esempio, all'acquisizione di livelli diversi di uno stesso fabbricato (Fig. 67).
- quando si vogliono collegare porzioni molto lontane tra loro, siano esse appartenenti allo stesso fabbricato o a fabbricati differenti (Fig. 68). In questi casi specifici può essere necessario l'ausilio di sistemi di posizionamento satellitare.

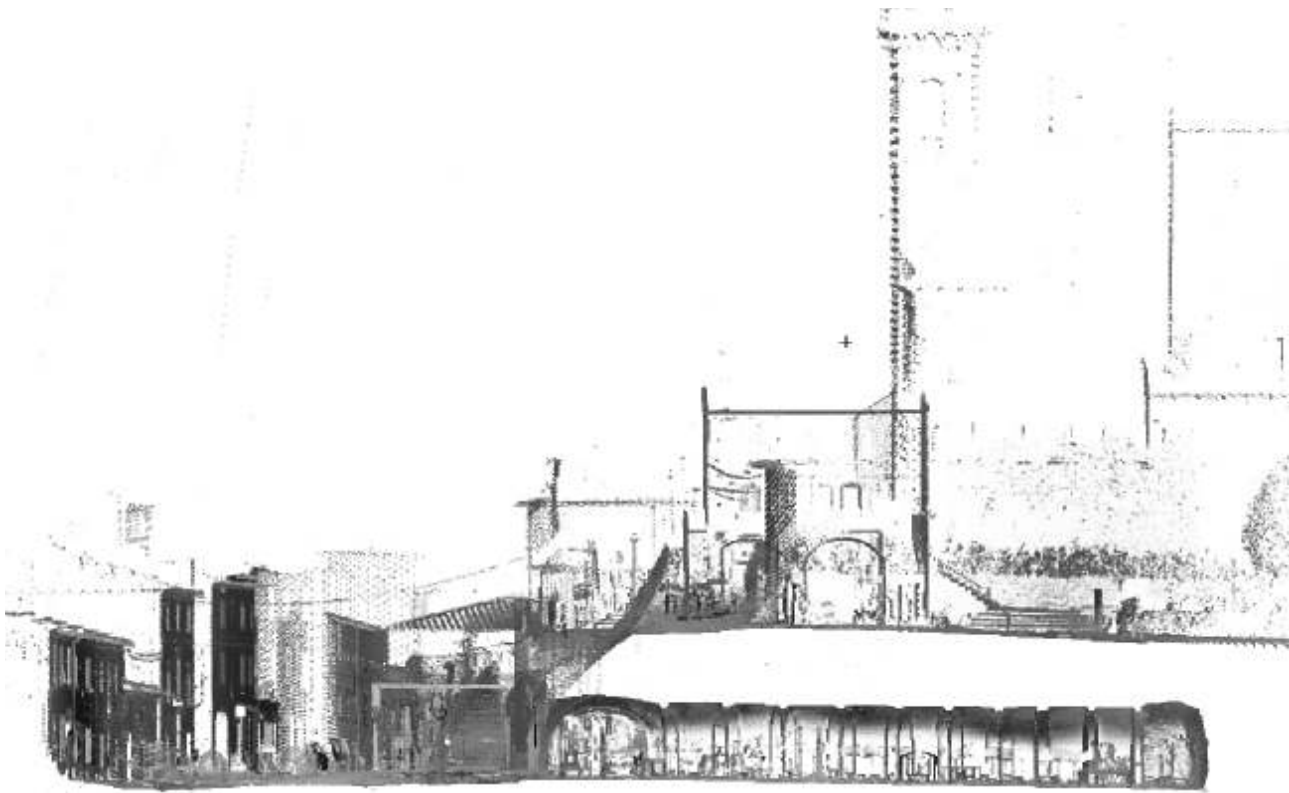


Fig. 67 - La referenziazione del modello complessivo di punti nel sistema topografico è stata fatta per conoscere la corretta posizione reciproca del livello della strada superiore rispetto al livello della galleria del museo, versante da anni in gravi condizioni di degrado a causa di un'infiltrazione d'acqua (Museo Ideale, Vinci, rilievo GeCo, 2011)



Fig. 68 - A sinistra, la rete gps progettata per il centro storico; a destra, le due porzioni di mura oggetto del rilievo (Asciano, rilievo G&Co, 2006)

Ottimizzazione dell'allineamento - ICP (Iterative Closest Points)

Il pre-allineamento, definito in uno dei modi precedenti, è ottimizzato attraverso l'algoritmo ICP in grado di definire iterativamente le corrispondenze tra punti di set di dati diversi sfruttando la “forma” delle superfici acquisite (Fig. 69).

Tale algoritmo è efficace solo nel caso in cui esiste una certa percentuale di sovrapposizione delle superfici (almeno il 30%) ed un primo allineamento manuale per evitare che la procedura converga su un minimo locale diverso dal punto di convergenza “vero”. In particolare, si prevedono tre fasi:

- la definizione di corrispondenze, basate sulla prossimità, tra punti del primo set di dati e punti del secondo;
- la stima della trasformazione rigida che porta una range map a “coincidere” con quella di riferimento;
- applica la trasformazione a tutti i punti appartenenti alla range map.

Questi tre step sono replicati fino alla convergenza, cioè finché la minimizzazione della distanza soddisfa i valori di tolleranza impostati.

Anche se dal punto di vista teorico l'avvicinamento dei due data set può essere individuato indipendentemente dalla geometria iniziale, l'algoritmo ICP si dimostra realmente efficiente quando è data una condizione iniziale sufficientemente approssimata.

A seconda dell'ampiezza dei dettagli tridimensionali sulla superficie acquisita e dell'estensione della superficie sovrapposta, la convergenza di un algoritmo ICP può essere più o meno marcata, mantenendo in ogni caso una componente di errore legata all'incertezza di misura in fase di acquisizione.

La propagazione di tali errori produce quindi deviazioni nella stima di posizione dei punti acquisiti rispetto ai punti della superficie vera, che sono tanto maggiori quanto maggiore è il numero di immagini sovrapposte. Gli effetti di questi errori tendono ad essere compensati in presenza di superficie chiuse dove, in fase di allineamento, ogni range map interagisce circolarmente con tutte quelle vicine.

Ma laddove la geometria sia allungata, o eventualmente aperta su un lato, i vincoli mutui tra le varie riprese tendono a diminuire e gli errori non compensati possono divenire significativi.



Fig. 69 - Schematizzazione del funzionamento dell'algoritmo ICP



ELABORAZIONE DEI DATI

A partire dalla nuvola di punti referenziata è possibile trasportare le operazioni di rilievo dell'architettura dall'oggetto stesso al suo modello. I vantaggi sono evidenti e principalmente legati alla comodità e flessibilità consentite dalla "virtualizzazione" delle analisi, condotte di fronte ad un computer invece che *in situ*.

Altrettanto importanti sono, però, i limiti. In primo luogo, le misure operate dai sistemi a scansione, per quanto fitte, mantengono il loro carattere discreto: la nuvola di punti costituisce una convincente visualizzazione e una ricchissima banca dati di misure ma, rimane in ogni caso una rappresentazione discretizzata dell'oggetto e non una sua riproduzione virtuale.

La densità dei dati acquisiti con le scansioni consente una flessibilità di certo superiore a quella di un rilievo topografico, e probabilmente anche di quella offerta dalla fotogrammetria (che pure, permette di posporre la fase interpretativa a quella del rilievo). Ne consegue che a partire da un'unica banca dati geometrica è generalmente possibile predisporre forme di rappresentazione differenti.

Un'ulteriore interessante conseguenza della flessibilità che caratterizza i dati provenienti da scansioni è costituita dalla loro potenziale applicazione in progetti con finalità prevalentemente comunicativa: la possibilità di esplorazione interattiva, associata a strumenti software che "alleggeriscono" i file rendendo possibile la loro visualizzazione in tempo reale, anche tramite Internet, sono aspetti oggi sempre più richiesti.

Estrazione di profili sezione

Questo tipo di rappresentazione fa sempre riferimento ai concetti di “piano sezione” e di “vista ortogonale”: la rappresentazione di piante, prospetti, profili sezione è realizzabile attraverso la settorializzazione di sottili porzioni della nuvola di punti, individuate da piani sezione, orizzontali e verticali (Fig. 70).

La natura bidimensionale delle restituzioni grafiche non deve far dimenticare la loro omogenea referenziazione, che è comunque sempre tridimensionale: ogni profilo sezione, cioè, appartiene ad un piano, di cui però è nota la posizione e la giacitura nello spazio tridimensionale definito dal sistema di riferimento cartesiano adottato. Il passaggio dal software dati laser ad un software CAD avviene tramite il formato grafico d'interscambio DXF (Drawing eXchange Format), il formato vettoriale nativo della diffusissima applicazione dell'Autodesk, AutoCAD.

Il suo principale vantaggio è, probabilmente, quello di essere uno dei formati vettoriali più supportati e quindi più diffusi.

Il suo principale svantaggio, invece, è dato dalla considerevole occupazione di memoria e di risorse.

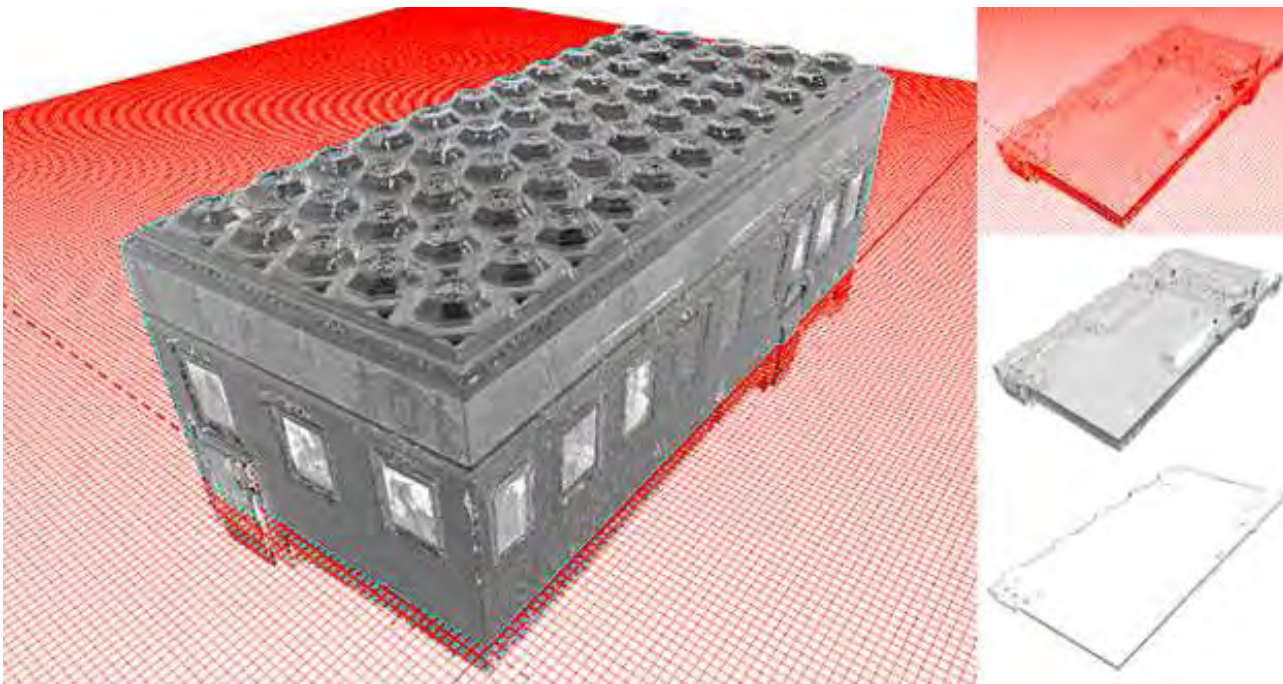


Fig. 70 - Estrazione di un profilo sezione orizzontale dal modello complessivo di punti. A sinistra, modello di punti con piano sezione orizzontale; a destra, dall'alto, dal modello sezionato in corrispondenza del piano al profilo sezione (Sala Consiliare, Prato, rilievo GeCo, 2010)

E' in ambiente CAD che vengono definiti tutti i sistemi di riferimento locali necessari ad estrarre gli elaborati bidimensionali richiesti (Fig. 71).

La reversibilità di ogni passaggio, grazie alla possibilità di cambiare il sistema di riferimento a seconda delle esigenze, deve essere garantita non solo all'interno dello stesso software (CAD) ma anche con il software di gestione dati laser scanner.

Solitamente, i piani sezione attraversano lo spazio indagato lungo la mezzeria dei suoi volumi principali, andando così ad intercettare la chiavi di volta e fornendo la più esaustiva descrizione delle strutture di copertura. In realtà, però, il profilo sezione è dato dall'assemblaggio di più piani sezione, di volta in volta posizionati nel modo più opportuno, per rispondere alle convenzionali regole di rappresentazione grafica.

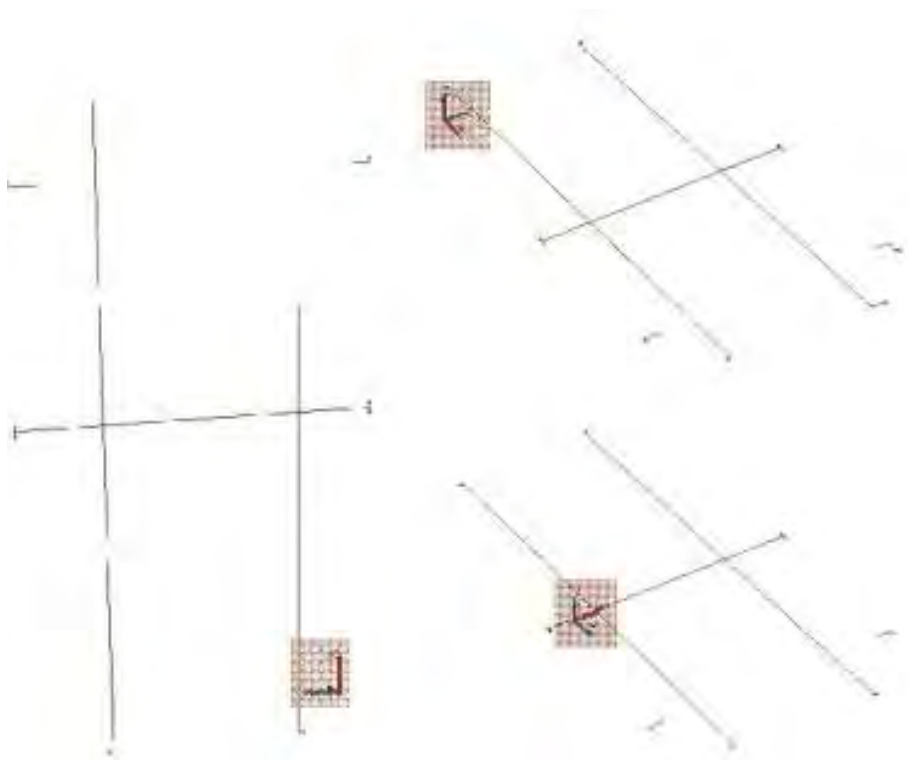


Fig. 71 - Profilo sezione orizzontale. Indicazione dei sistemi di riferimento locali adottati. A destra, è evidenziato il passaggio dall'UCS globale all'UCS locale della Sezione trasversale C-C' (Sala Consiliare, Prato, rilievo GeCo, 2010)

Estrazione di orto-immagini

Per completare le informazioni geometrico-dimensionali fornite dai profili sezione, tutti gli elaborati sono integrati con immagini renderizzate del modello di punti, secondo viste ortografiche rispetto ai piani sezione. Tali immagini, pur non essendo realmente immagini fotografiche, riescono ad evocare efficacemente le caratteristiche cromatiche e materiche di tutti gli elementi che compaiono in vista in tali rappresentazioni.

La scelta della visualizzazione delle orto-immagini è modulata di volta in volta a seconda del tipo di architettura da rappresentare: l'applicazione di uno shaded risulta, spesso, efficace nella maggior parte degli elaborati ibridi; tuttavia, in alcuni casi, è preferibile usare una visualizzazione in silhouette capace di evidenziare le discontinuità materiche (Fig. 72).

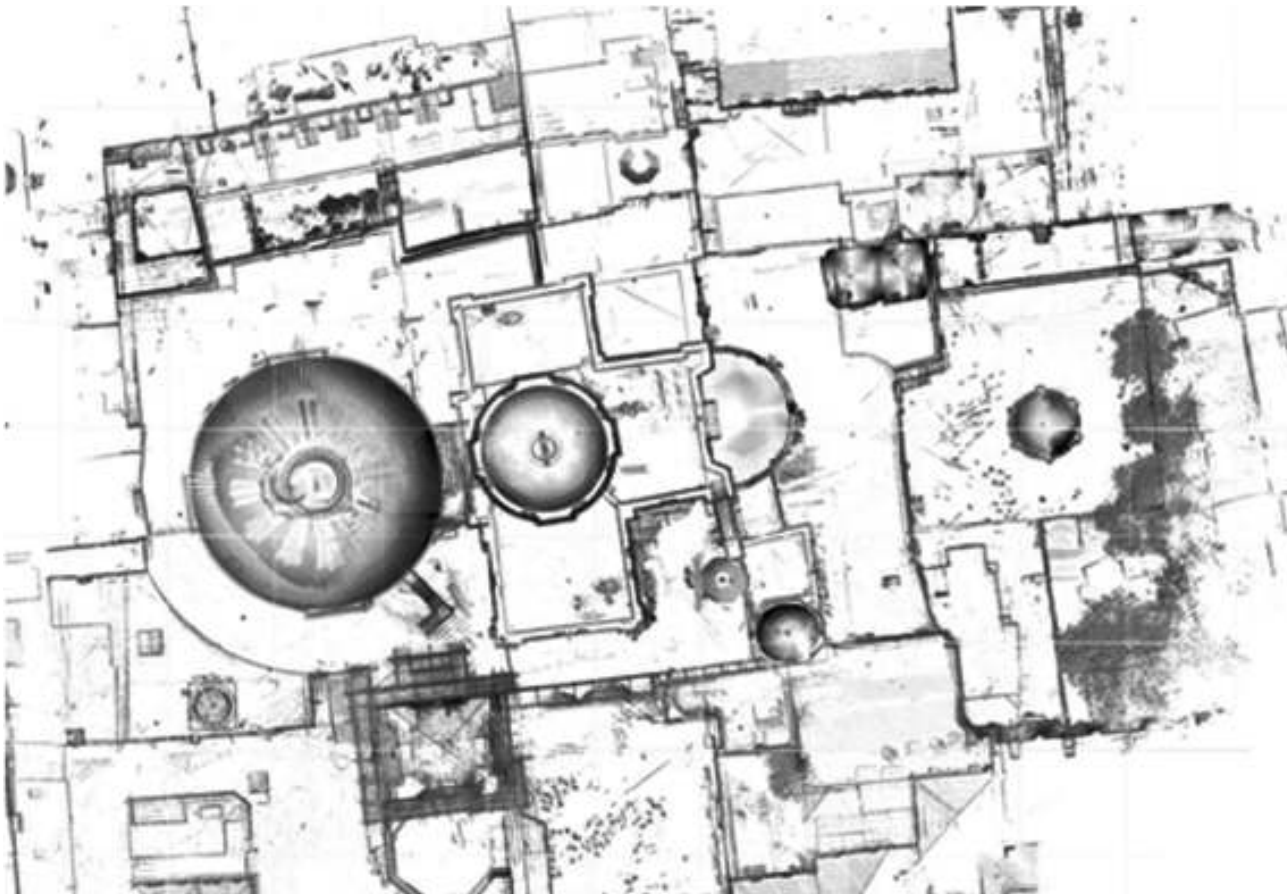


Fig. 72 - Orto-immagine, visualizzata in scala di grigi e in silhouette, delle coperture (Basilica del Santo Sepolcro, Gerusalemme, rilievo GeCo, 2007 - 2010)



CAPITOLO 3

LA BASILICA DI SANTA MARIA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA



LA CONVENZIONE DI RICERCA

La preoccupazione per lo stato di degrado della Basilica della Madonna dell'Umiltà ha indotto il Ministero per i Beni e le Attività Culturali a siglare il 5 marzo 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 per i Beni Architettonici e per il Paesaggio per le province di Firenze, Pistoia e Prato.

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito della convenzione di ricerca *"Esecuzione, rilievo strumentale e restituzione grafica della Basilica dell'Umiltà a Pistoia"*, stipulata il 10.04.2008 tra la Soprintendenza ed il Laboratorio GeCo dell'Università degli Studi di Firenze [22]. L'acquisizione del modello 3D del monumento, al fine di verificarne la geometria, ha fornito il necessario supporto per lo studio della sua portanza statica, per l'analisi della stabilità strutturale e per il progetto di consolidamento della cupola e del vestibolo. Si intendono esporre qui i primi risultati di una proficua collaborazione tra Istituti di ricerca universitari, Enti ecclesiastici, Fondazioni bancarie e Ministero per i Beni e le Attività Culturali ai fini della messa a punto e della realizzazione di provvedimenti conservativi di notevole complessità.

Lo studio, finalizzato alla definizione di una banca dati 3D di supporto al progetto di consolidamento e restauro della Basilica, è stato condotto con tecniche di rilievo consolidate, come la topografia, e tecniche più innovative, come i sistemi

[22] *Responsabile del procedimento:* Paola Grifoni/Alessandra Marino;
Progetto e direzione lavori: Valerio Tesi, Sergio Castellani; *Responsabile della convenzione di ricerca:* Grazia Tucci



a scansione tridimensionale.

L'obiettivo principale della convenzione ha previsto la predisposizione di rappresentazioni convenzionali utili al progetto di conservazione e la sperimentazione di forme di rappresentazione appropriate allo studio e alla ricerca in corso.

Nell'ambito dell'assegno di ricerca universitario *Acquisizione e trattamento dei dati per un rilievo tridimensionale di strutture architettoniche a doppia calotta: il caso della Basilica dell'Umiltà di Pistoia* (S.S.D. ICAR /06, responsabile: prof. G. Tucci), svolto dalla scrivente dal 2008 al 2011, sono state elaborate 18 tavole architettoniche a partire da un dato 3D discontinuo, non strutturato e difficilmente gestibile per le grandi dimensioni dei files e per l'assenza di linee guida codificate di riferimento per la restituzione grafica.

In questi anni il tema della basilica è stato approfondito, con differenti livelli di dettaglio, in occasione di due tesi di laurea triennali [23, 24], una tesi di laurea magistrale [25] e una tesi di specializzazione [26].

Nel corso della tesi di specializzazione di Maria Riemma in Beni Architettonici e del Paesaggio del Politecnico di Milano, della quale la scrivente è correlatrice, è stato possibile proseguire le analisi sullo stato di conservazione della basilica e investigare in modo più approfondito, sulla base del rilievo metrico realizzato nel corso della convenzione, per una lettura strutturale del vestibolo, dell'ottagono e della cupola.

Sono stati, pertanto, predisposti elaborati 2D per:

- la documentazione storico-iconografica e lo studio degli interventi di consolidamento realizzati nel tempo;
- l'analisi della geometria della fabbrica con relative valutazioni metrologiche
- la redazione di carte tematiche (materiali e tecniche costruttive; identificazione e catalogazione delle catene; quadro fessurativo).

[23] Panighini F., **Il vestibolo della Basilica dell'Umiltà a Pistoia: il rilievo tridimensionale per il progetto di conservazione.** Tesi di Laurea in Scienze dell'Architettura, Università degli Studi di Firenze, a.a. 2008-2009 (Relatore: Tucci G. / Correlatori: Tesi V., Bonora V.)

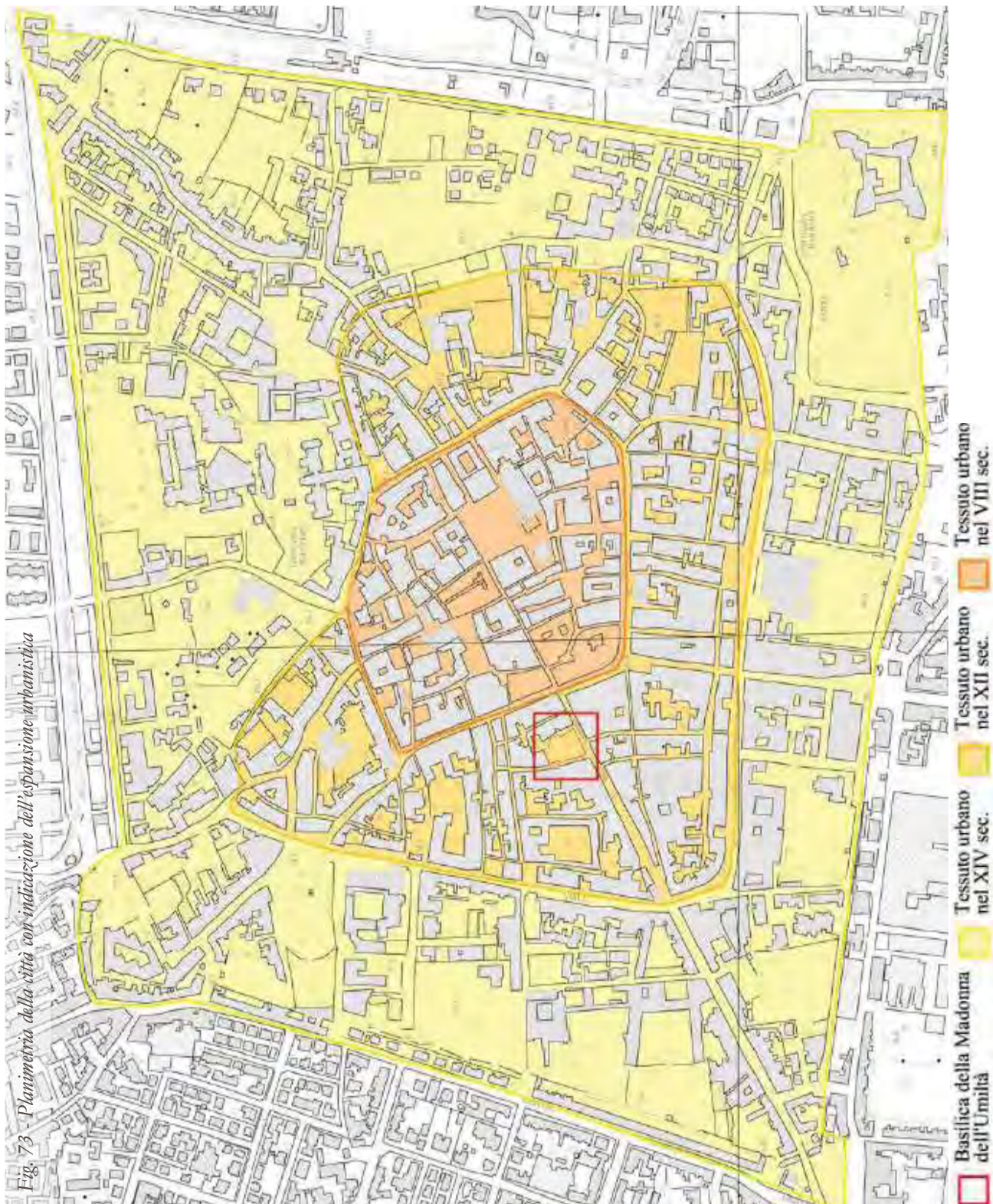
[24] Tomei I., **Il rilievo tridimensionale di strutture a doppia calotta: La Basilica dell'Umiltà di Pistoia.** Tesi di Laurea in Scienze dell'Architettura, Università degli Studi di Firenze, a.a. 2009-2010 (Relatore: Tucci G. / Correlatori: Nobile A., Tesi V.)

[25] Panighini F., **Proposta di implementazione per il rilievo metrico nel sistema SICaR. Il caso della Basilica dell'Umiltà in Pistoia.** Tesi di Laurea Magistrale in Architettura, Università degli Studi di Firenze, a.a. 2011-2012 (Relatore: Tucci G. / Correlatori: Nobile A., Grilli R., Tesi V.)

[26] Riemma M., **La Basilica della Madonna dell'Umiltà di Pistoia. Dalla Banca dati 3D al rilievo tematico dell'aula ottagonale e della cupola per il progetto di conservazione.** Tesi di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio, Politecnico di Milano, a.a. 2011-2012. (Relatori: Cruciani Fabozzi G., Tucci G. / Correlatori: Nobile A., Tesi V.)

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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





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 (Figg. 74, 75).

La costruzione del tempio fu deliberata per celebrare la memoria di un evento miracoloso avvenuto nel luglio 1490 nella piccola chiesa parrocchiale di *Santa Maria Forisportae*, a cui l'attuale basilica si sovrappose. Il cambiamento del nome e la definitiva metamorfosi è sancita dalla Bolla di papa Leone X del 1515.

L'ideazione dell'impianto geometrico spetta a Giuliano da Sangallo, architetto di Lorenzo il Magnifico, affiancato dal fratello Antonio, dal Francione e dal Pollaiuolo, mentre alla conduzione della fabbrica 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, che connota in modo inconfondibile lo skyline della città.

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

E' composta da un ampio vestibolo, a pianta rettangolare, con cupola centrale su pennacchi e ali laterali coperte da volta a botte (Fig. 76). La fase preparatoria dura più di cinque anni ed il cantiere di costruzione prosegue per quasi un secolo ed è caratterizzato dal susseguirsi di numerose maestranze e da lunghi periodi di stasi nell'attività edificatoria.

La prima pietra della Basilica venne collocata nel settembre 1495 all'angolo fra la strada maestra e l'odierna via Vitoni, ma il protrarsi dei tempi di costruzione mise a rischio di degrado le strutture incompiute. Quando il disegno della chiesa entra in fase esecutiva, Giuliano da Sangallo è lontano dalla Toscana e la bottega fiorentina resta affidata al fratello minore Antonio, assicurando così continuità alle ipotesi progettuali. In seguito alla sua scomparsa si susseguono vari architetti fino a Ventura Vitoni che, da semplice ideatore di progetto, diventa il responsabile del cantiere.

Verso gli ultimi anni del Quattrocento iniziano il completamento del tetto e le rifiniture in pietra del vestibolo: gli arconi delle volte, gli architravi e i fregi, i basamenti e i sedili, il rivestimento con 68 lacunari a rosoni per ogni volta a botte,



Fig. 74 - *Veduta di Pistoia, 1630 - 1633* (Giovanni MannoZZi, detto Giovanni da San Giovanni). Affresco proveniente dall'Oratorio di San Rocco di Pistoia, oggi conservato al Museo Civico di Pistoia



Fig. 75 - *Guida per bambini della città di Pistoia, 1976* (Andrea Rauch)



Fig. 76 - Vestibolo sangallesco. A sinistra, i prospetti su via della Madonna e via Vitoni; a destra, vista del cupolino e delle volte a botte

i due arconi che immettono nell'aula ottagonale, i tre archi intagliati a chiocciolle che inquadrano le porte, le 18 lesene con le basi e i capitelli.

Completato il vestibolo, si susseguono gli acquisti di case, adiacenti alla muraglia, destinate ad essere abbattute per fare spazio al corpo ottagonale [27].

Il prisma ottagonale si sviluppa verticalmente nella successione di tre ordini architettonici di altezza decrescente (Fig. 77). Gli ordini architettonici e gli ornamenti di pietra sono appaltati a maestri scalpellini. Le sei cappelle sono decorate agli inizi del Cinquecento con cornici in pietra serena.

Il Vitoni scompare nella primavera del 1522. Da questo momento i tempi costruttivi si diradano così tanto che le strutture incompiute rischiano il degrado. Finalmente verso la metà del XVI secolo Cosimo I concesse i finanziamenti necessari a condurre a termine il santuario, incaricando Giorgio Vasari del progetto della cupola. Prima di procedere alla sua costruzione il Vasari consolida la struttura preesistente, non ritenendola idonea a sopportare il peso della copertura: inserisce catene negli spigoli dei percorsi anulari, individuati come punti deboli

[27] Andreini A., Gori M., **Cappella della Madonna dell'Umiltà: trasformazioni urbane conseguenti all'edificazione della nuova chiesa**, in: Andreini A., Gori M. (a cura di), *Atti delle giornate di studio "Centenario del miracolo della Madonna dell'Umiltà a Pistoia"*, Pistoia 5-26 maggio 1992, Pistoia, Società Pistoiese di Storia Patria, 1992, pp. 41-70



Fig. 77 - Aula vitoniana e cupola vasariana. A sinistra, vista esterna; a destra, vista interna. E' evidente l'imponenza della cupola all'interno del fitto tessuto edilizio urbano

e innalza il fabbricato oltre la terza cornice per disporre di una migliore base d'imposta. Trasforma il profilo a sesto acuto della cupola, progettato dal Vitoni, in un profilo semicircolare.

Nella primavera del 1569 la cupola è completata nelle sue strutture portanti e già si registrano le prime lesioni. Gli interventi di consolidamento vengono effettuati dallo stesso Vasari che inserisce alcuni elementi strutturali in entrambi i gusci [28]. 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. L'Ammannati inserisce quattro catene alla cupola, ne irrobustisce i piedritti giudicati corresponsabili dei cedimenti nelle coperture, e mura i sottarchi in corrispondenza delle cappelle, cancellando così le decorazioni originali [29].

I suoi rimedi, pur consentendo di superare la fase di crisi più acuta, non eliminano le cause dei dissesti che continuano a manifestarsi ciclicamente. Nella metà del Settecento viene cerchiata anche la cupola interna per ovviare al distacco dei

[28] Bargiacchi L., **Tempio e opera della Madonna dell'Umiltà di Pistoia**, Pistoia, 1890

[29] Fossi M., **La basilica della Madonna dell'Umiltà di Pistoia. Lavori diretti da Bartolomeo Ammannati 1575 1585**, *Atti e Memorie dell'Accademia Toscana di Scienze e Lettere "La Colombaria"*, vol. 38, 1973, pp. 81-135

costoloni mediani dalla compagine muraria della copertura.

Da questo momento le notizie si diradano fino al 1935, anno in cui il soprintendente Poggi incarica gli ingegneri Niccoli e Sanpaolesi di uno studio approfondito sulle condizioni statiche della cupola vasariana. Sanpaolesi riscontra numerose lesioni nei piedritti e nelle due calotte.

L'ultimo restauro effettuato risale al 1966 ad opera del soprintendente Albino Secchi che sostituisce due catene vasariane, revisiona la copertura risarcendo ancora una volta le lesioni con malta cementizia e restaura alcuni elementi dell'apparato decorativo [30].

A partire da questa data, la prolungata assenza di interventi di manutenzione e conservazione del complesso monumentale, ha indotto un diffuso stato di degrado facendo registrare distacchi e cadute di laterizi dai prospetti esterni, rimasti incompiuti con muratura a faccia vista; degrado delle arenarie della lanterna; perdita di frammenti lapidei, sia dai lacunari del cassettonato che dalle cornici perimetrali del vestibolo; dissesti strutturali sia nel vestibolo che nella cupola.

Da qui, il protocollo d'intesa del 2008 e l'inizio del cantiere (*Fig. 78*) che ha interessato il corpo del vestibolo con il consolidamento del sistema voltato e con il restauro dei paramenti lapidei interni, dei prospetti esterni e del sistema di copertura.

Attualmente è in corso il ripristino dei prospetti esterni del corpo ottagonale e della sagrestia, la verifica del sistema di catene metalliche che cerchiano la cupola, nonchè il consolidamento della volta della sagrestia e del sistema di copertura del coro.

[27] Tonietti U., Ensoli L., Calonaci M., **Sulle condizioni statiche della cupola della Madonna dell'Umiltà di Pistoia: storia di una costruzione non propriamente brunelleschiana**, in: Andreini A., Gori M. (a cura di), *Atti delle giornate di studio "Centenario del miracolo della Madonna dell'Umiltà a Pistoia"*, Pistoia 5-26 maggio 1992, Pistoia, Società Pistoiese di Storia Patria, 1992, pp. 87-110

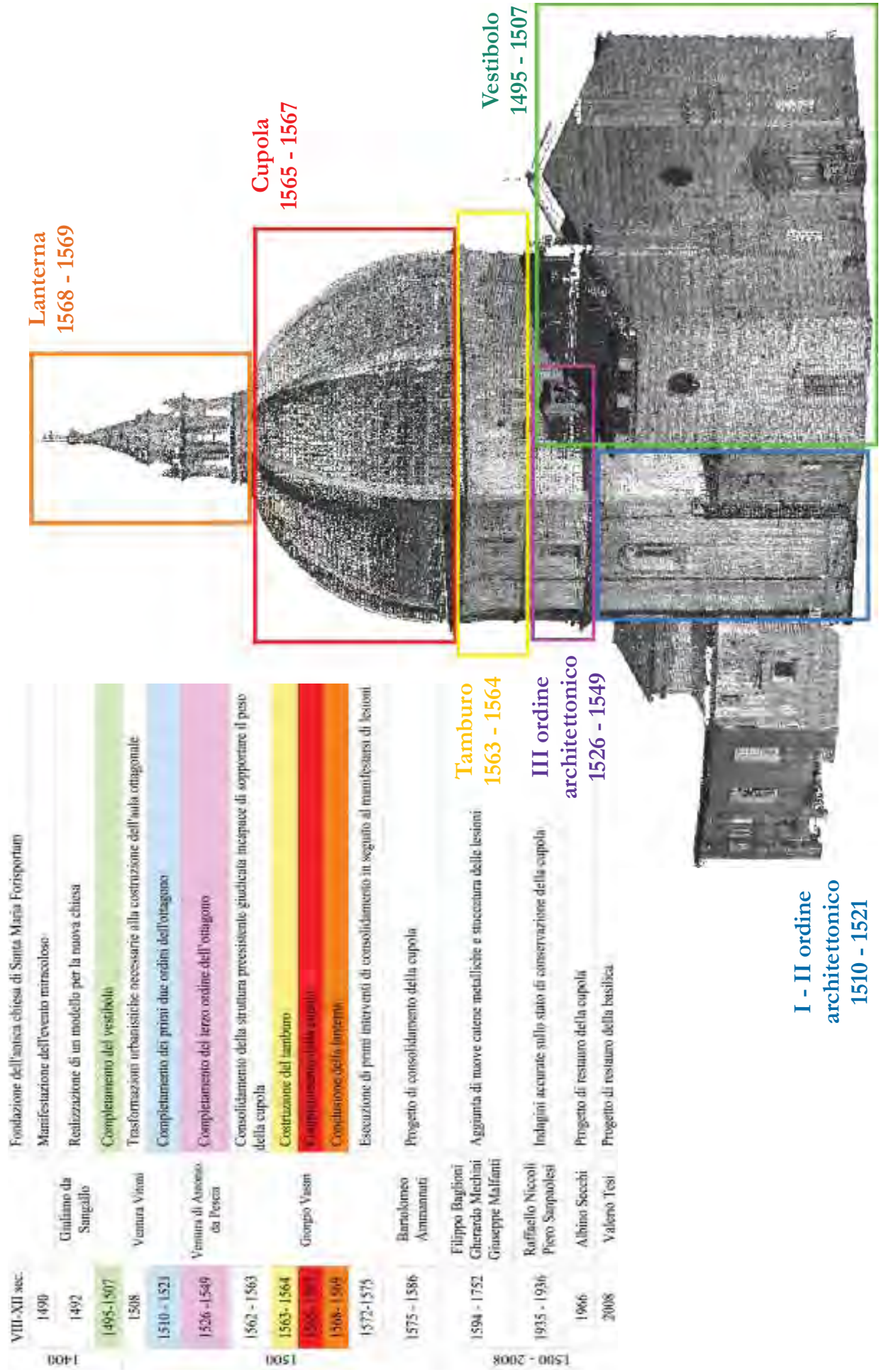


Fig. 78 - Prospetto cronologico e schematizzazione delle vicende costruttive sul modello tridimensionale della basilica

I RESTAURI DELL'AULA OTTAGONALE E DELLA CUPOLA

I primi interventi di consolidamento alla cupola vengono effettuati dallo stesso **Vasari**, come racconta dettagliatamente Jacopo Lafri nella sua Relazione del 1620 *Relatione di architetto pistoiese sopra la cupola grande della chiesa della Madonna dell'Umiltà della città antichissima di Pistoia*.

Egli afferma che il *primo pelo* si è mostrato nella facciata *di verso ser Damiano* nella *chiocciola* che il Vasari aveva costruito per salire dall'attico alla cupola. Dopo aver tamponato la scala a chiocciola *messeno due balli di catene di ferro*, uno all'interno e l'altro all'esterno del tamburo, subito sopra il cornicione.

Inserì *molti e grossi pezzi di pietre* incastrati tra le due calotte nel vano tentativo di collegarle, *sopra i quali vi murarono sino sotto i contrafforti*.

Stracciò alquanto nella finestra ottagonale, alla base della lanterna, per inserire un telaio di ferro a forma di stella.

Tuttavia, *il medesimo pelo* continua a crescere e si registra una nuova lesione nella facciata opposta, *che è di verso l'Arsenale*. Nel corso del tempo si scoprono così tante fessurazioni *che non v'è più né angolo né facciata che non ve ne sia o tanto o quanto*.

Nel 1575 il progetto di consolidamento è affidato all'**Ammannati** che inserisce tre catene cerchianti la cupola e due trasversali per collegare i gusci. Ma la situazione dei dissesti non si stabilizza e una nuova lesione corre lungo la cupola tanto da indurre l'apposizione di una nuova cerchiatura esterna, eseguita dal **Lafri**, subito sotto gli abbaini.

Ancora, alla fine del Cinquecento, **Filippo Baglioni** inserisce altre due catene esterne e ben quattordici catenette interne di collegamento delle due calotte.

In una condizione di perenne sospetto rientrano, nell'amministrazione ordinaria della fabbrica, le stuccature per impedire infiltrazioni d'acqua soprattutto in corrispondenza dei costoloni esterni.

Nel 1619 l'architetto **Gherardo Mechini**, per ordine del granduca e a seguito della caduta di calcinacci, cinge la cupola con una nuova catena.

Nel 1740, a seguito del manifestarsi di nuove lesioni sugli altari del Crocifisso, del Sacramento e dei Magi, **Giuseppe Malfanti** cerchia la cupola interna.

Da questo momento le notizie si diradano, probabilmente a causa della distruzione della documentazione nell'ultima guerra mondiale.

Le prime notizie degne di nota riguardano la rottura della seconda catena sopra



il cornicione, avvenuta nel 1846 e ripristinata presumibilmente molti anni dopo per la mancanza di fondi.

L'ingegnere capo **Ascani** del Genio Civile, nella sua relazione del 1964, afferma la presenza di lesioni che corrono dalla sommità del tamburo fino oltre un terzo della cupola lungo gli spigoli dell'intradosso del guscio interno.

Bisogna tuttavia aspettare l'ultimo restauro del 1966, affidato ad **Albino Secchi**, per la sostituzione delle catene danneggiate o non più efficaci introdotte dall'Ammannati. Di seguito, una tabella riassuntiva (*Tab. 2*) dei consolidamenti e dei rinforzi strutturali.

Anno (dalle delibere di pagamento)	Architetto	Intervento di consolidamento	Scopo dell'intervento
1562-1563	Giorgio Vasari	Tamponeamento dei pericoli mulari nella parte superiore; rafforzamenti degli stessi, nella parte bassa, con catene negli angoli	Rafforzare la struttura preesistente considerata incapace di sopportare il peso della cupola. Le catene non sono presenti in quelle parti dove gli adiacenti corpi di fabbrica del vestibolo e della cappella maggiore assicurano la saldezza dell'edificio
1572-1575		Muratura della scala a chiocciola; inserimento di una catena di ferro attraverso le due cablate; costruzione della scala a due ramppe, che inizialmente sale alla cupola, nella spessore della calotta esterna (disposizione di due catene a cingere la cupola, una all'interno dell'attico e l'altra all'esterno, sopra il cornicione; inserimento di molte e grossi pezzi di pietra tra le due cablate, sopra i quali murò sin sotto i contrafforti) Disposizione di un telaio di ferro ed una croce di travetti di legno alla base della lanterna	Far fronte alle prime lesioni che si manifestano alla cupola nel punto in cui si trova la scala a chiocciola
Ottobre 1575	Bartolomeo Ammannati	Iniziano i lavori di consolidamento sotto la sua direzione	
Novembre 1575		Viene inserita una stella di ferro nell'imposta della lanterna; tre catene a cingere la cupola lavorate dal fabbro Gabriele di Francesco Guerrini, due catene a collegare il doppio guscio	Rendere salda l'imposta della lanterna fortemente danneggiata da un fulmine; evitare lo scollamento dei gusci, non essendoci ammorsamenti tra questi ed i costoloni

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

	1576-1580		Irrobustimento dei piedritti e costruzione dei sottarchi in matatura in corrispondenza delle cappelle. Vengono cancellate le decorazioni originali delle cappelle	Irrobustire i piedritti che sono considerati responsabili dei cedimenti nelle coperture
1600	1584-1586		Inserimento di una catena intorno alla cupola, appena sotto agli abbaini delle vele. La sua esecuzione è seguita da Jacopo Lafri	Impedire lo scollamento dei gusci
	Inverno 1594	Filippo Baglioni	Vengono aggiunte due catene a ringere la cupola e 14 catene trasversali a collegamento delle due calotte	Impedire lo scollamento dei gusci
	17 maggio 1599	Jacopo Lafri	Stuccatura delle fessurazioni esterne alla cupola e controllo dello stato di degrado	Contrastare le lesioni
	1600	11 maggio 1606	Leonardo e Lionardo di Domenico Marsacci	Controllo dello stato di degrado e stuccatura periodiche
1619		Gerardo Micheli	Disposizione di una catena esterna alla cupola e ristrutturazione della stessa	Caduta di calcinacci
1628-1637		Francesco Gatteschi	Risarcimento delle lesioni con continue stuccature e sistemazione della lanterna	Contrastare le lesioni e risabilire la saldezza della lanterna in seguito ad un fulmine
1700	1731-1733	Giuseppe Maffanti	Staccatura delle lesioni e cerchiatura della calotta esterna	Contrastare le lesioni e le infiltrazioni d'acqua attraverso i costoloni
	10 Settembre 1740		Cherchitura della calotta interna	
	1749-1752		Staccatura delle lesioni ed oliatura delle catene	
1800	14 Aprile 1890		Approvazione di lavori di restauro	Sostituire la seconda catena sopra il cornicione danneggiatosi nell'Ottobre del 1846
1900	07 Settembre 1920		Sistemazione delle catene e risarcimento delle lesioni	Contrastare il manifestarsi delle lesioni e l'indebolimento delle catene a seguito del terremoto
	1966	Albino Secchi	Esecuzione dell'ultimo intervento di restauro. Inserimento di due nuove catene in ferro; risarcimento delle lesioni con appostione di malta cementizia	Far fronte all'olentamento delle cinque catene esterne in ferro, probabilmente dovuto alla plurisecolare azione corrosiva degli agenti atmosferici ed in specie all'umidità delle parti delle catene attraversanti i costoloni di matatura

Tab. 2 - Tabella riassuntiva dei consolidamenti e dei rinforzi strutturali



CAPITOLO 4

IL RILIEVO 3D DELLA BASILICA

ACQUISIZIONE E PRE-PROCESSING DEI DATI

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'obbiettivo 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.

La fase di progettazione del rilievo rappresenta una parte fondamentale dell'intero processo di acquisizione.

Nel caso specifico della Basilica, viste le grandi dimensioni della costruzione (*Tab. 3*) e la complessità degli spazi, sia per l'articolazione spaziale che per la ricchezza decorativa, il progetto di acquisizione ha comportato un sopralluogo attento e la stesura di uno scadenziario programmato dei rilievi. Il lavoro *in situ* si è svolto in cinque campagne di misura (*Tab. 4*). L'indagine metrica è stata condotta in relazione alle priorità segnalate dalla Soprintendenza: vestibolo, aula ottagonale, sagrestia, corridoi anulari del secondo e terzo ordine, tamburo, imposta della cupola.

Dimensioni della fabbrica	≈ 60 m x 25 m
Max dislivello interno	≈ 61 m (dal piano terra alla punta della croce sulla cupola)
Proiezione in pianta dell'area rilevata	≈ 1.500 m ²

Tab. 3 - Caratteristiche principali della fabbrica

E' stata realizzata una rete topografica comprendente vertici interni ed esterni alla basilica. Le operazioni di misura sono state eseguite sia con stazione totale che con ricevitori GPS geodetici.

	I campagna	II campagna	III campagna	IV campagna	V campagna
Periodo	Aprile 2008	Luglio 2008	Ottobre 2008	Gennaio 2009	Aprile 2009
Strumenti	1 scanner a differenza di fase 2 stazioni totali 1 fotocamera digitale reflex	1 scanner a differenza di fase 2 stazioni totali 3 fotocamere digitali	1 scanner a differenza di fase 2 stazioni totali 2 gps 3 fotocamere digitali	1 scanner a tempo di volo 1 stazione totale 2 fotocamere digitali	1 scanner a differenza di fase 1 stazione totale 2 fotocamere digitali
Gruppi di lavoro	2 (6 operatori)	2 (6 operatori)	2 (6 operatori)	1 (3 operatori)	1 (3 operatori)
Giornate di lavoro	6	4	4	3	3
Postazioni di scansione	46	48	19	4	47
Punti	≈ 370 milioni	≈ 820 milioni	≈ 420 milioni	≈ 16 milioni	≈ 1,5 miliardo
Dimensione files	10 GB	18 GB	8 GB	1 GB	20 GB
Vertici topografici	19	14	16	0	0
Targets	51	70	37	15	26

Tab. 4 - Sintesi dell'attività durante le cinque campagne di misura

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

La stazione totale è stata utilizzata per il rilevamento di tutta la rete interna al complesso e anche di buona parte della rete esterna. L'uso del GPS lungo le strade adiacenti alla chiesa è risultato impraticabile a causa degli alti fabbricati che limitano fortemente la ricezione dei segnali dai satelliti. L'impiego del GPS è stato invece di fondamentale importanza per rilevare alcuni vertici in posizioni elevate, non collegabili direttamente alla rete effettuata con la stazione totale.

La massima estensione planimetrica della rete, che si presenta allungata in direzione parallela a via Madonna, è pari a circa 480 metri x 170 metri, mentre lo sviluppo in quota va da 0 a circa 47 metri (*Fig. 79*).

Tutti i vertici sono stati materializzati in modo permanente e monografati in modo accurato al fine di descriverne l'ubicazione e le coordinate nel sistema di riferimento prefissato (*Fig. 80*).

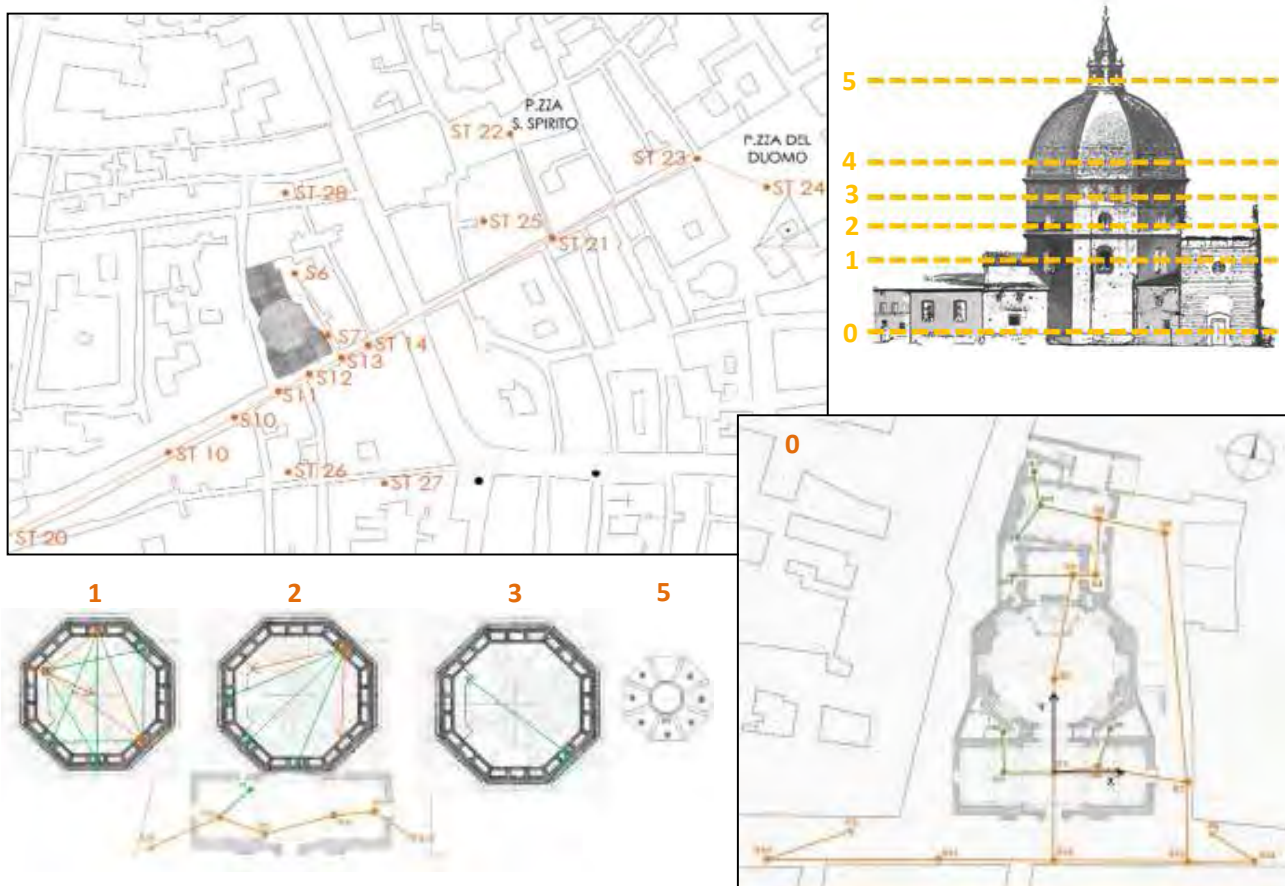


Fig. 79 - Rete topografica interna, scandita a livelli, ed esterna



Basilica di Santa Maria dell'Umiltà a Pistoia

Rilievo di dettaglio (esante manoscriti 43)

Risponsabile scientifico: Prof. Cristina Dotti

MONOGRAFIA DEL VERTICE N°

S2

Coordinate del vertice

X	0.000
Y	15.041
Z	0.094

Note

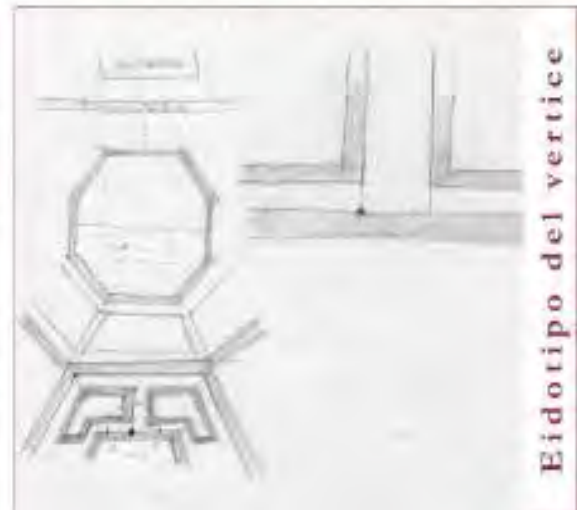
Materializzazione: chiodino in acciaio a testa tonda.
 Posizione: all'interno del vano ottagonale in un giunto della pavimentazione di fronte all'altare.



Schema planimetrico della zona di rilievo



Fotografia del vertice



Eidotipo del vertice

dipartimento di restauro e conservazione dei beni architettonici - università di firenze

Fig. 80 - Esempio di monografia

La rete è stata rilevata in tre successive campagne di misura (Fig. 81):

- **I campagna:** realizzazione della rete principale di inquadramento comprendente vertici all'esterno della basilica, lungo via della Madonna, e all'interno nelle porzioni del vestibolo, compreso il sottotetto, del piano terra dell'Aula ottagonale e in alcuni locali della canonica;
- **II campagna:** completamento del rilievo a terra dei locali della canonica e rilievo dei corridoi "ad anello" posti tra il piano terra dell'aula ottagonale e dell'imposta della cupola;
- **III campagna:** estensione e completamento della rete esterna mediante nuovi vertici al suolo, sulla lanterna e su strutture in elevazione.

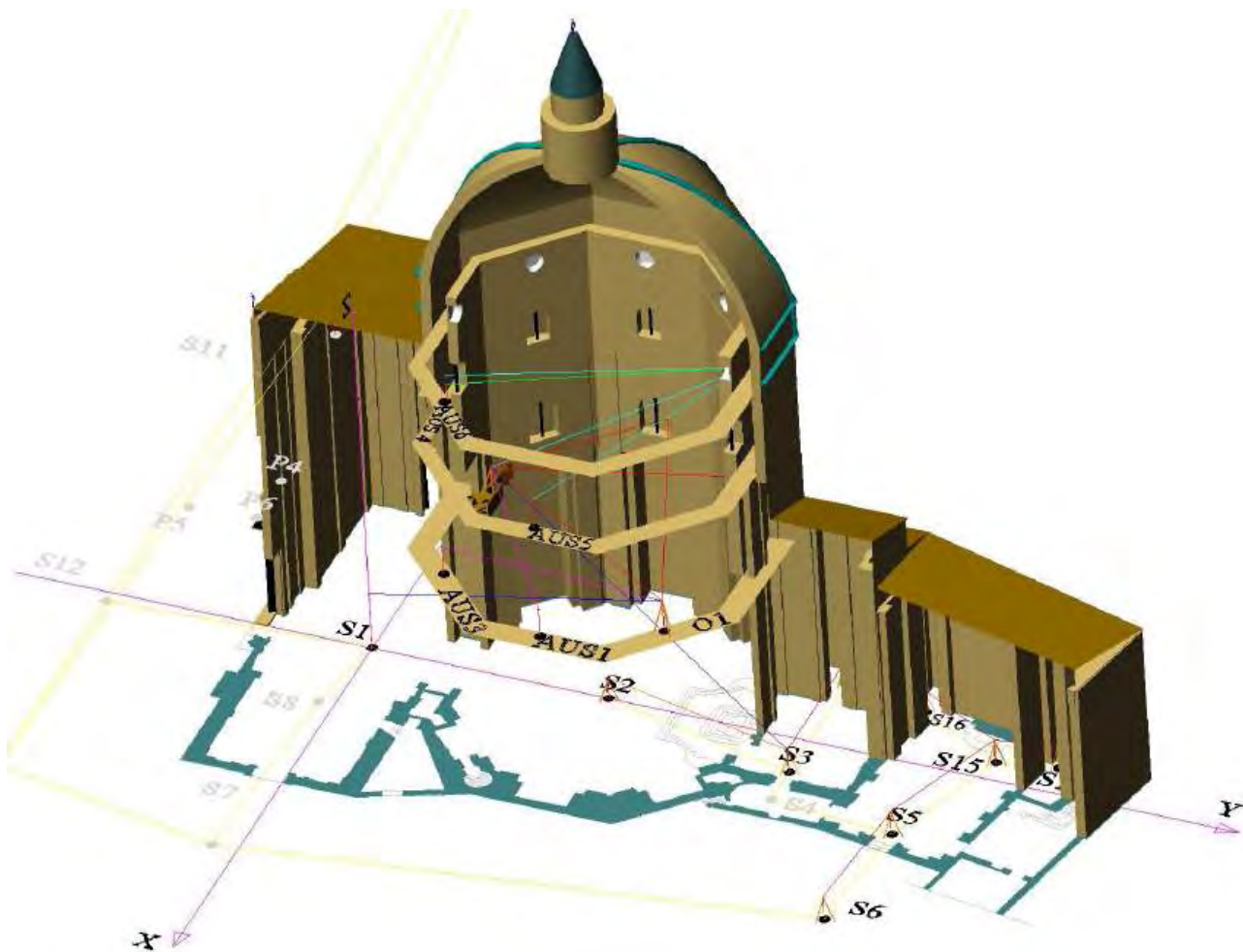


Fig. 81 - Spaccato assometrico della basilica con indicazione dei collegamenti tra i vertici topografici collocati ai vari livelli (elaborazione grafica di Matteo Spazzoli dell'Università degli Studi di Ferrara, 2008)

Le maggiori difficoltà affrontate nella fase di acquisizione sono legate:

- alla necessità di accedere ad alcuni spazi ridotti della struttura (ad esempio, i collegamenti verticali, i percorsi anulari che si restringono procedendo dal basso verso l'alto, lo spazio compreso tra le due calotte a livello dell'imposta della cupola e fino alla lanterna, Fig. 82);



Fig. 82 - Viste 3D del modello di punti di alcuni spazi ridotti (a sinistra, la scala a chiocciola che collega tutti i livelli; al centro il primo percorso anulare; a destra, la cupola con evidenziati i profili della calotta interna ed esterna)

- all'esigenza di documentare l'elevato livello di dettaglio di alcuni elementi decorativi (ad esempio, i lacunari disposti nello spazio voltato e nel cupolino del vestibolo, i sottarchi delle sei cappelle minori e della cappella maggiore, gli arredi sacri, la balaustra con colonnine in bronzo, il dossale marmoreo e l'altare maggiore, Fig. 83);

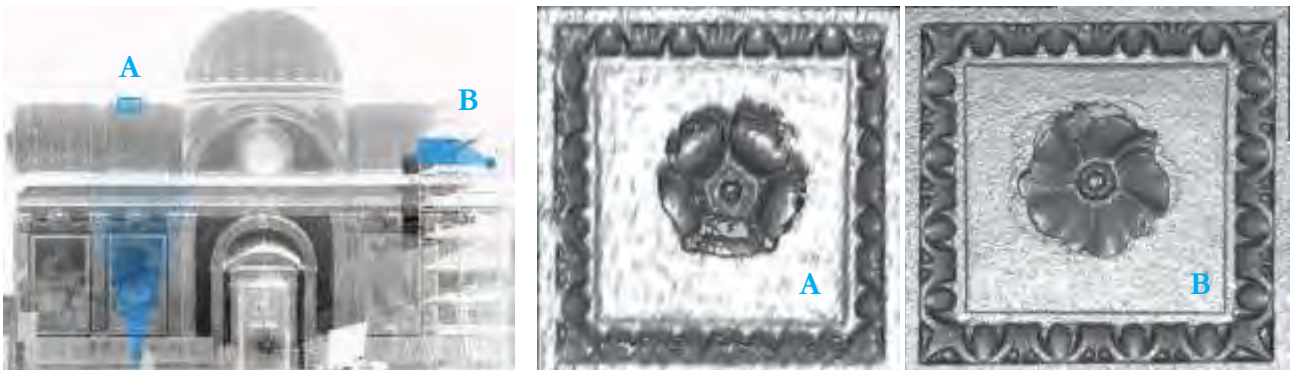


Fig. 83 - A sinistra, modello di punti del vestibolo con indicazione di due postazioni di scansione: A eseguita da terra e B dal livello del cornicione. A destra, modello di superficie di un lacunare: A realizzato dalle scansioni eseguite da terra, B dalle scansioni eseguite dall'alto. E' evidente il notevole livello di dettaglio raggiunto con il lacunare B riducendo la distanza scanner - oggetto

- all'importanza di definire gli spessori della muratura rilevando, quindi, anche il paramento esterno. Questa finalità, probabilmente la più onerosa in termini di tempo, ha comportato l'individuazione di alcuni spazi, circostanti la basilica, dai quali rilevare gli esterni e, in particolar modo, la cupola. Il fitto tessuto edilizio urbano nel quale è inserito il complesso architettonico implica inevitabili acquisizioni scorciate delle superfici per l'impossibilità di allontanarsi a distanze adeguate. Da qui, la volontà di innalzare, quanto più possibile, il punto di presa a livello delle finestre e dei terrazzi intorno (Fig. 84).



Fig. 84 - Foto aerea (Google Earth, 2009). Spazi esterni circostanti la basilica individuati per la materializzazione della rete topografica d'inquadramento e per il rilievo di dettaglio con sistemi a scansione

La risoluzione di scansione è stata di volta in volta progettata in funzione delle caratteristiche formali e dimensionali degli spazi indagati. Nel prevenire 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. E' stato necessario realizzare più acquisizioni, da punti di vista differenti, per documentare in modo



esaustivo tutti gli spazi e le zone di sottosquadro.

E' stata quindi fondamentale la fase di progettazione delle scansioni per prevedere le varie postazioni dello scanner, l'estensione delle singole acquisizioni sull'oggetto, la posizione e il tipo di target.

In tutte le campagne di misura è stato utilizzato uno scanner a differenza di fase, eccetto nella quarta campagna dove, per ovviare alla maggiore distanza strumento/oggetto (circa 100 – 150 m), si è usato uno scanner a tempo di volo. L'elevata velocità operativa ha consentito di realizzare un numero di scansioni significativamente importante.



CAPITOLO 5

LA DOCUMENTAZIONE METRICA DELLA BASILICA

ARCHIVIAZIONE DEI DATI

La memorizzazione ed archiviazione dei dati acquisiti tramite scansione si inserisce nella più ampia problematica della conservazione e accessibilità dell'informazione digitalizzata.

La "Carta sulla conservazione del patrimonio digitale" [31] indica che:

Il patrimonio digitale si compone di risorse uniche nei campi della conoscenza e dell'espressione umana, siano esse di ordine culturale, educativo, scientifico, amministrativo o che contengano informazioni tecniche, giuridiche, mediche o di altra sorta, create digitalmente o convertite in forma digitale a partire dalle risorse analogiche esistenti. Quando delle risorse sono di "origine digitale", ciò significa che esse esistono unicamente sotto la loro forma digitale iniziale.

I documenti digitali comprendono, nell'ampio spettro dei formati elettronici in continua evoluzione, testi, banche dati, immagini fisse o animate, documenti sonori e grafici, software e pagine web. Questi documenti sono spesso effimeri, e la loro conservazione richiede adeguate misure di produzione, manutenzione e gestione.

Molti di questi documenti hanno un valore e un'importanza durevoli e costituiscono di conseguenza un patrimonio che deve essere protetto e conservato per le generazioni future. Questo patrimonio, che è in continua crescita, può esistere in qualsiasi lingua e in qualsiasi campo della conoscenza e dell'espressione umana. [...] La continuità del patrimonio digitale è fondamentale. Per conservarlo, bisognerà prendere misure adeguate per tutta la durata del ciclo vitale dell'informazione, dal momento in cui viene creata fino a quello in cui vi si può accedere. La conservazione a lungo termine del patrimonio digitale comincia con la concezione

[31] UNESCO, Charter on the Preservation of the Digital Heritage, 2003



di procedure e sistemi affidabili che producono oggetti digitali autentici e stabili. [...] Devono essere adottate misure per:

- a) spingere i realizzatori di hardware e di software, i creatori, gli editori, i produttori e i distributori di documenti digitali, così come gli altri partner del settore privato, a cooperare con le biblioteche nazionali, gli archivi, i musei e gli altri organismi incaricati della conservazione del patrimonio pubblico per garantire la conservazione del patrimonio digitale;*
- b) sviluppare la formazione e la ricerca, e promuovere la condivisione delle esperienze e delle conoscenze tra le istituzioni e le associazioni professionali interessate;*
- c) incoraggiare le università e gli altri istituti di ricerca, sia pubblici che privati, ad assicurare la conservazione dei dati scaturiti dalla ricerca.*

Problematiche specifiche dei dati da scansione sono determinate dalla loro numerosità: a titolo di esempio, considerando esclusivamente le informazioni geometriche, nel corso dell'ultima campagna (aprile 2009) sono stati acquisiti 20 GB (Tab. 4).

Sia il dato grezzo, memorizzato in fase di acquisizione, che il database nel quale confluiscono tutti i dati per la fase di elaborazione, sono in formato proprietario e possono essere utilizzati esclusivamente in software specifici, limitando le possibilità di interscambio tra formati differenti. E' tuttavia possibile accedere ai dati in modo indipendente attraverso un formato ASCII caratterizzato dal numero di righe (punti) del file, da una lista di coordinate (x, y, z) e dal valore di intensità ad esse corrispondente (Fig. 85).

Il modello tridimensionale complessivo è stato organizzato in sotto-progetti (Fig. 86), in stretta analogia con la denominazione dei corpi di fabbrica: **Vestibolo** (Livelli 0 e 1), **Aula Ottagonale** (Livelli 0, 1, 2, Tamburo, Imposta), **Canonica**, **Esterno** (Via della Madonna, Via Vitoni, Cortile, Cupola).

La suddivisione in sotto-progetti è risultata indispensabile per costruire l'intero modello (complessivamente oltre 3 miliardi di punti), di facile visualizzazione, gestione ed elaborazione, nonché ben strutturato per agevolare le analisi successive su porzioni architettonicamente coerenti.

La comune referenziazione dei vari sotto-progetti ne ha permesso il riassetto e quindi la visualizzazione unitaria di tutti i dati acquisiti all'interno e all'esterno della Basilica (Fig. 87).

```
88729
1.026242 5.381160 1.044951 -237
0.959337 5.238875 0.849364 -1187
0.954694 5.241785 0.842204 -1210
0.960022 5.239900 0.848053 -1141
0.974973 5.228984 0.850498 -1242
0.986541 5.226328 0.844176 -1320
0.989112 5.226488 0.842442 -1283
1.631919 5.110066 0.520729 -1449
1.742387 5.008435 0.514789 -1452
1.774300 4.873008 0.486896 -1062
1.773205 4.872477 0.487016 -1071
...
```

Fig. 85 - File in formato ASCII del dato grezzo di una scansione

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

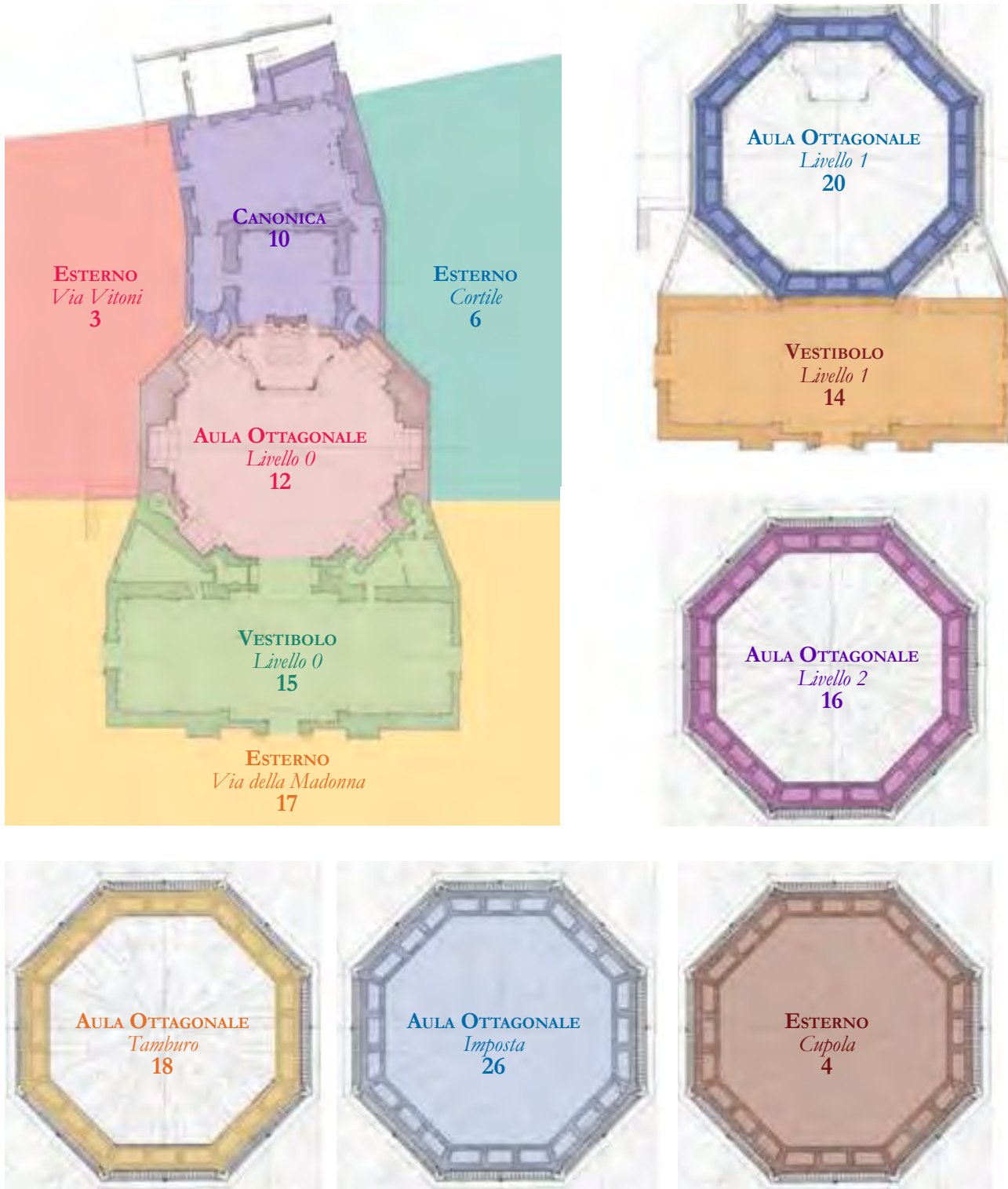


Fig. 86 - Organizzazione del rilievo in sotto-progetti. Per ogni sottoprogetto è indicato il numero di scansioni corrispondenti

Di seguito sono riportati alcuni esempi di sotto-progetto.

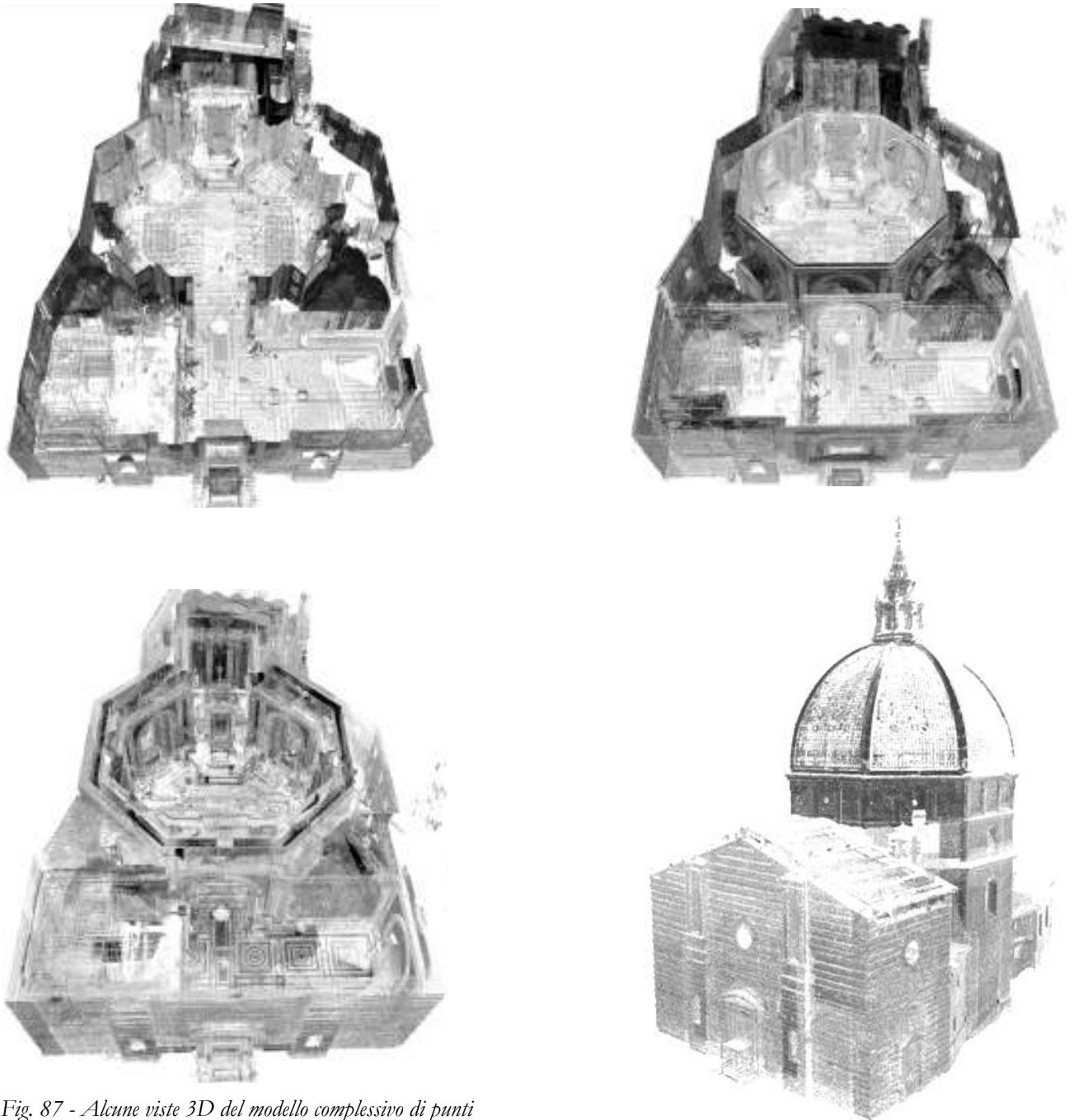


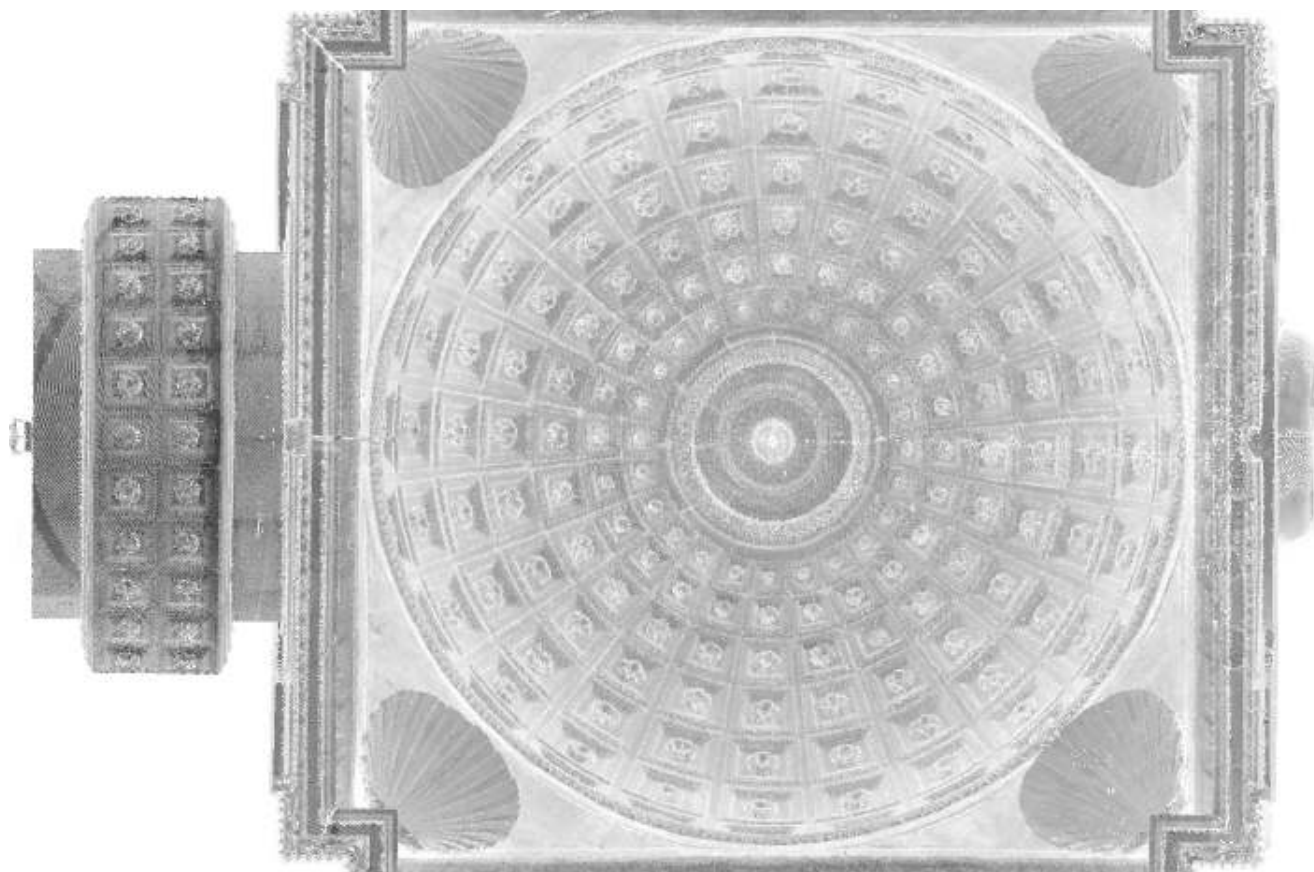
Fig. 87 - Alcune viste 3D del modello complessivo di punti

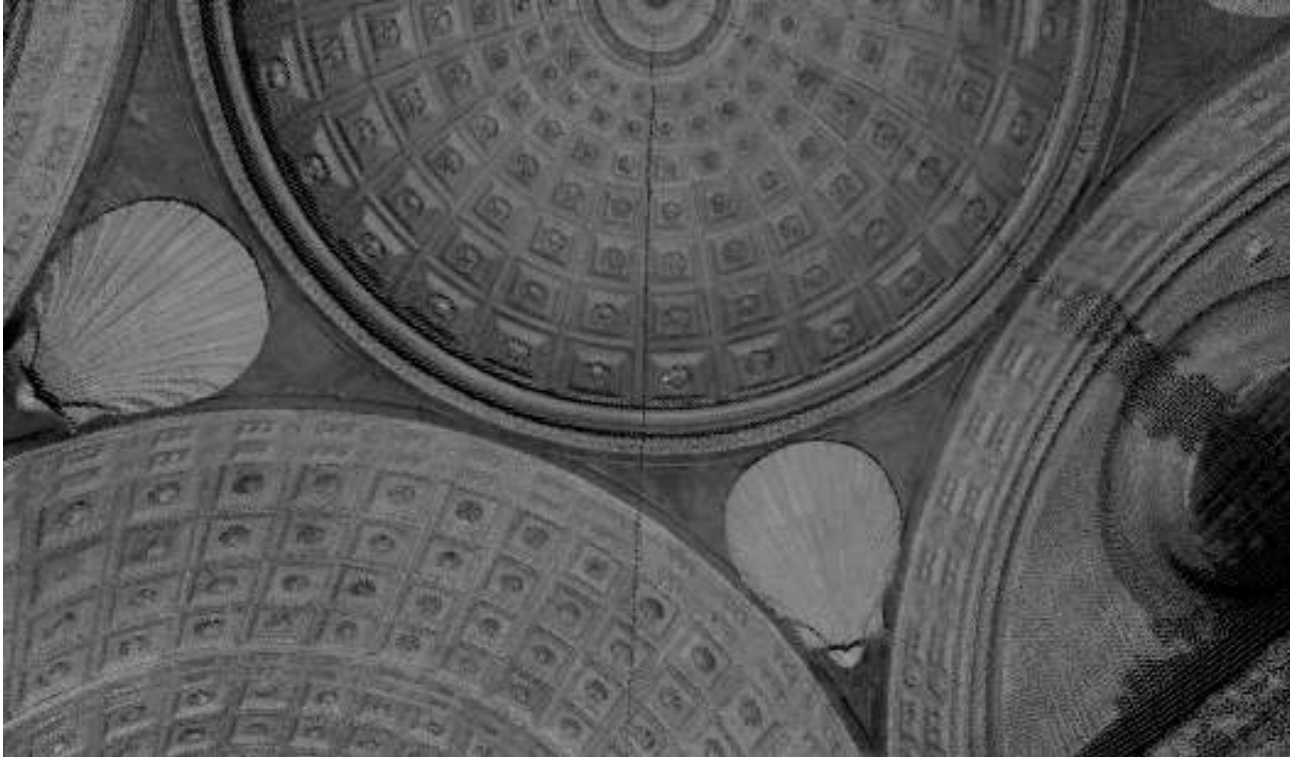
**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA STUDIO DIAGNOSTICO DEI BENI CULTURALI**

DALLA SCALA EDILIZIA ALLA SCALA URBANA: I CASI STUDIO DELLA
BASILICA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA E DELLE TORRI DI SAN GIMIGNANO

Sottoprogetto

Vestibolo - Livello 0

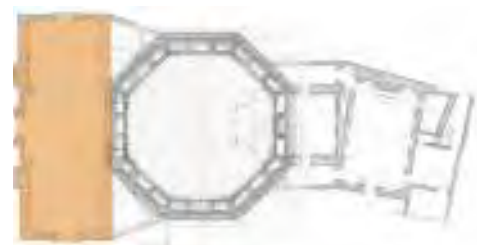
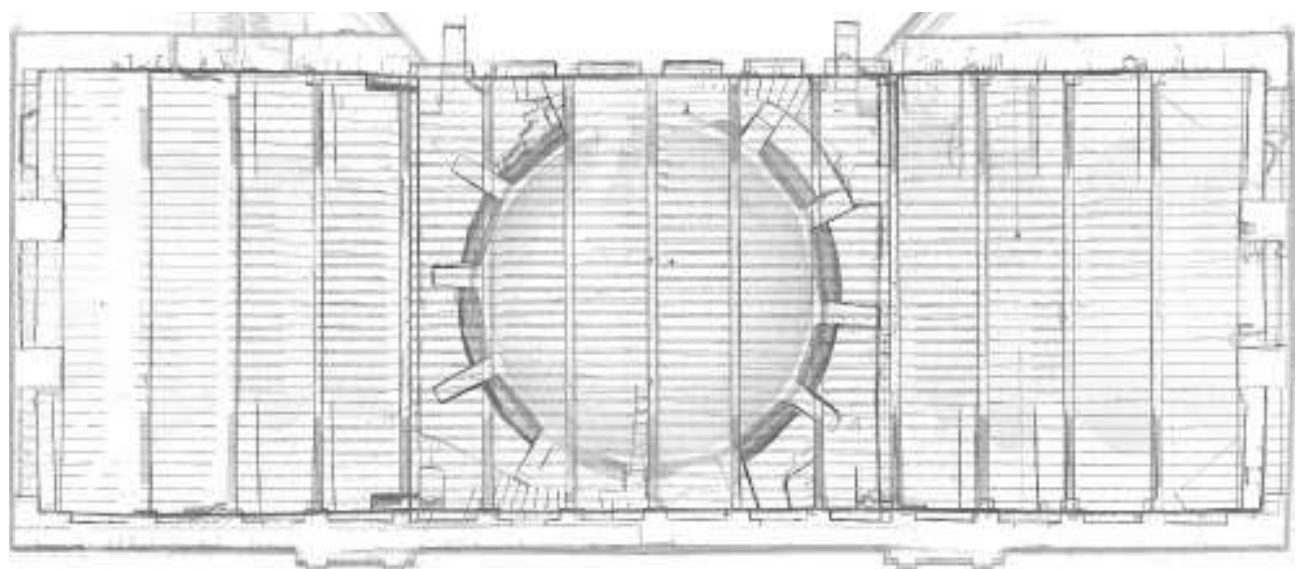
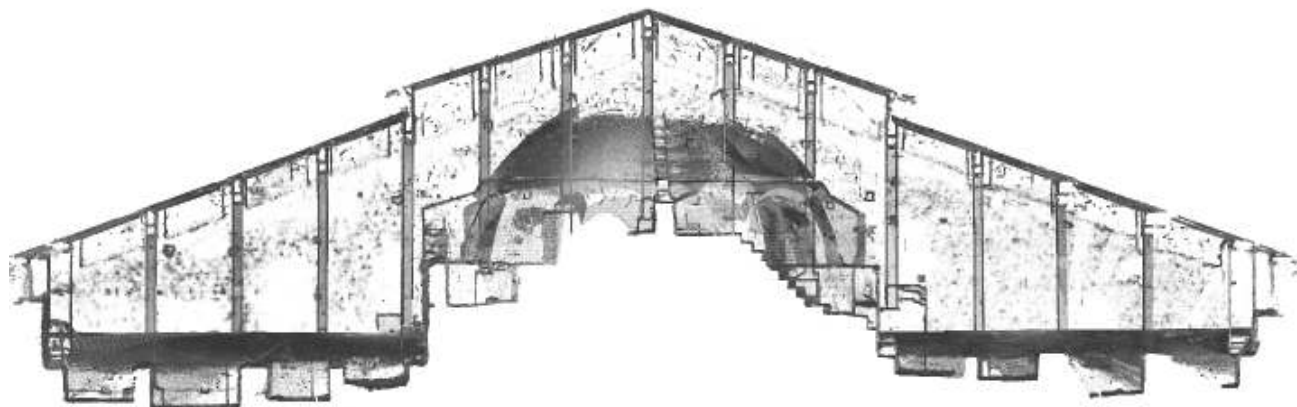


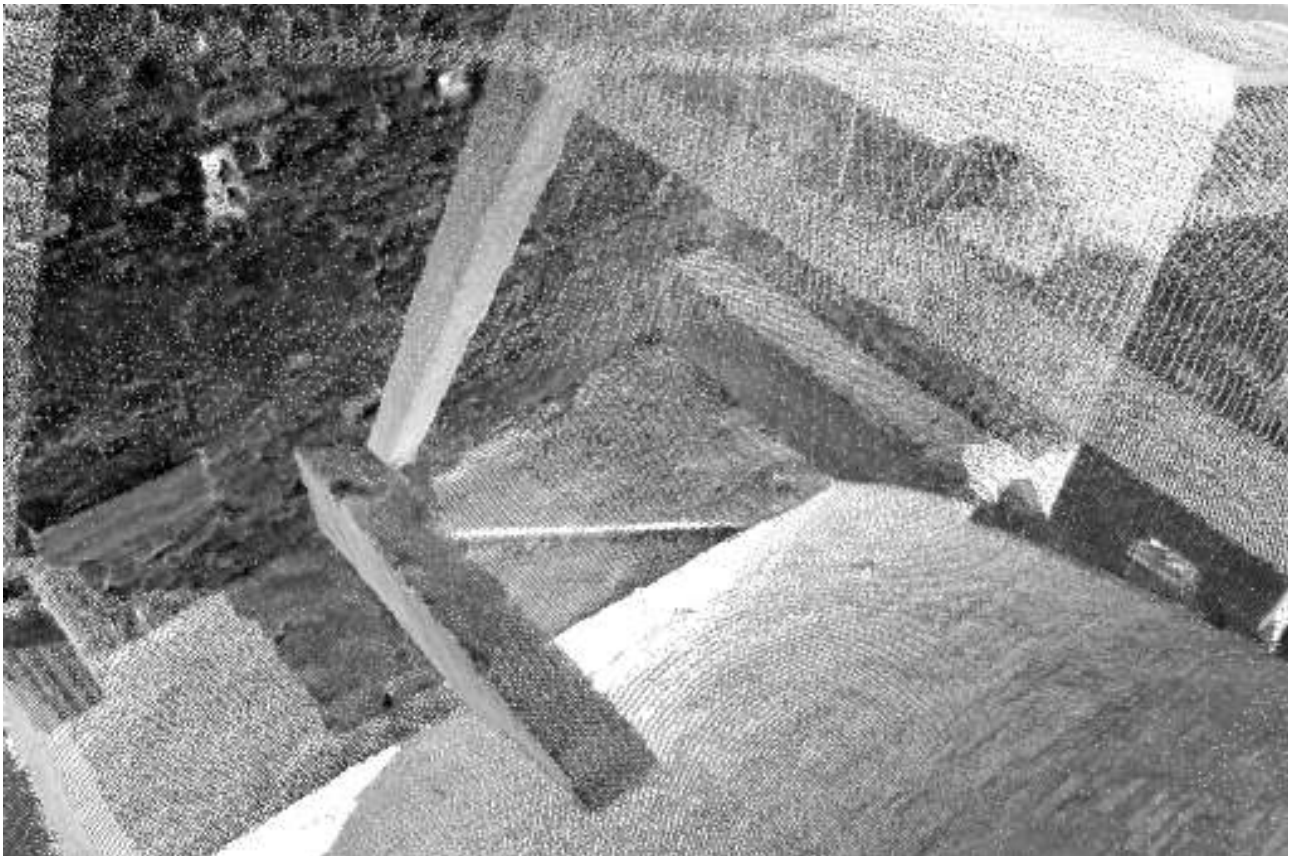
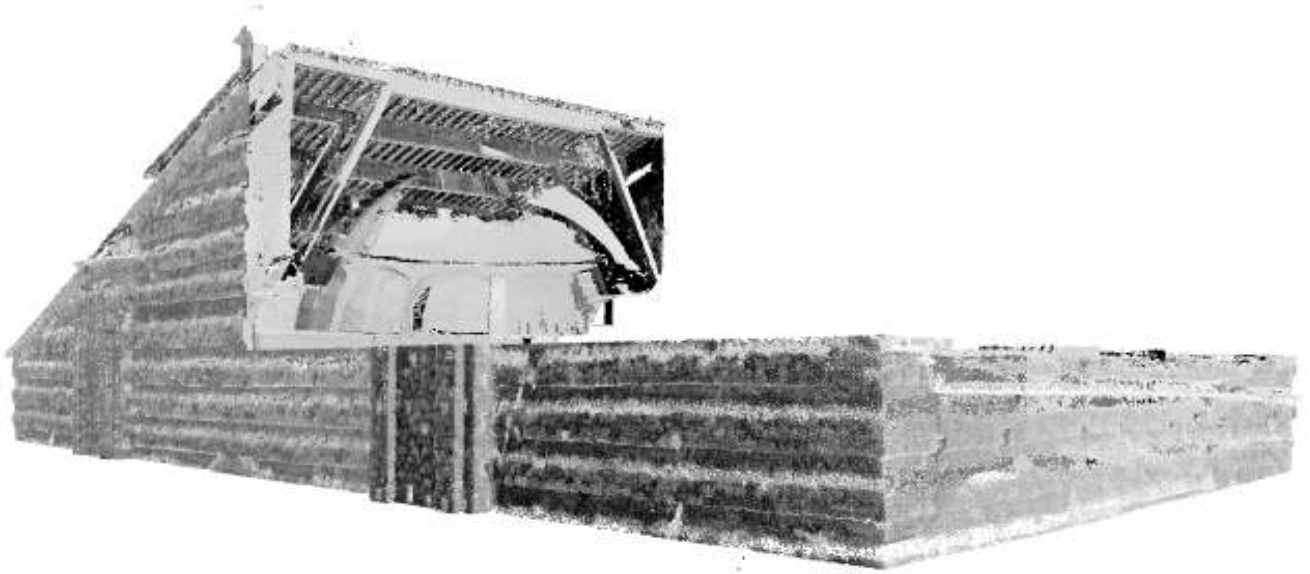


**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA STUDIO DIAGNOSTICO DEI BENI CULTURALI**

DALLA SCALA EDILIZIA ALLA SCALA URBANA: I CASI STUDIO DELLA
BASILICA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA E DELLE TORRI DI SAN GIMIGNANO

Sottoprogetto
Vestibolo - Livello 1



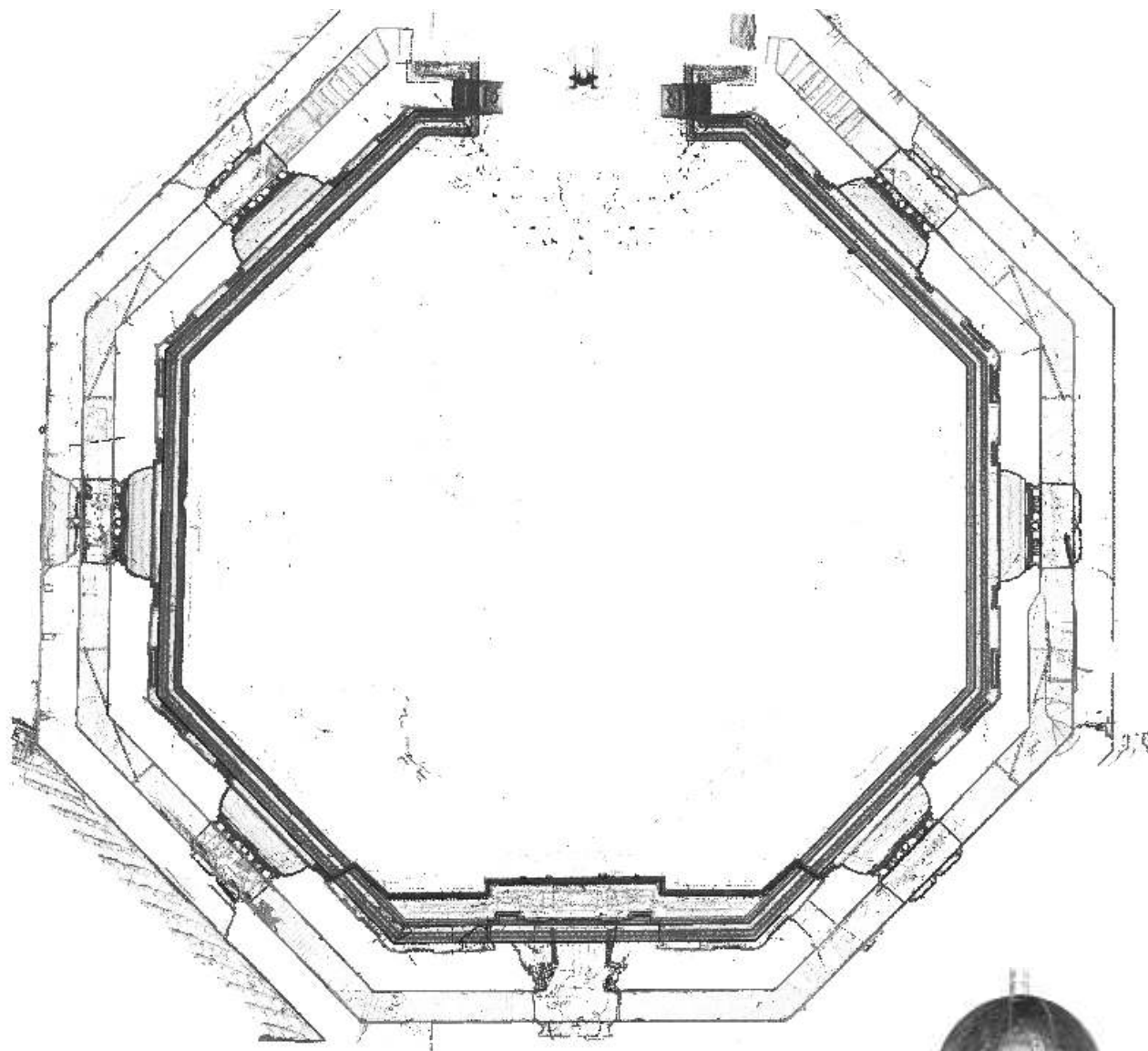


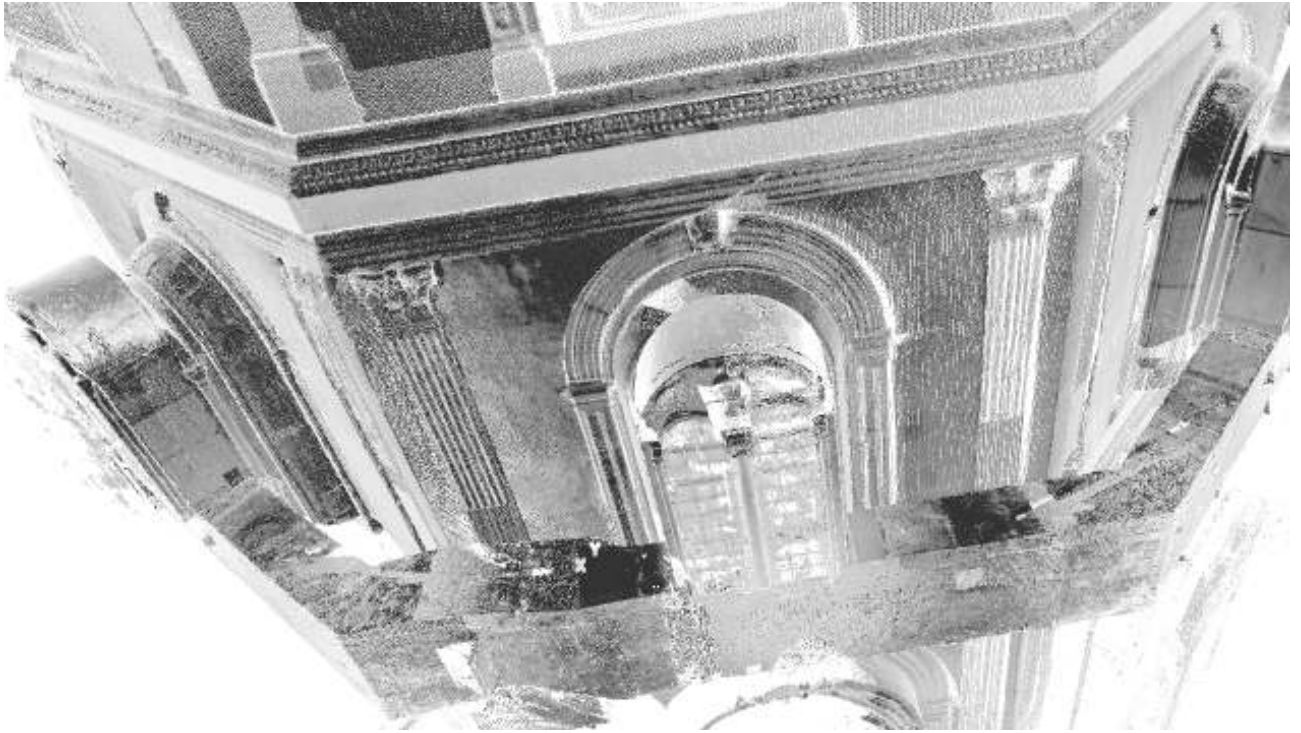
**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA STUDIO DIAGNOSTICO DEI BENI CULTURALI**

DALLA SCALA EDILIZIA ALLA SCALA URBANA: I CASI STUDIO DELLA
BASILICA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA E DELLE TORRI DI SAN GIMIGNANO

Sottoprogetto

Aula Ottagonale - Livello 1





ELABORAZIONE DEI DATI

In architettura con il termine “rappresentazione” si fa riferimento ad un insieme di documenti aventi lo scopo di mostrare e far comprendere il bene oggetto di studio [32].

La caratteristica che contraddistingue i disegni vettoriali bidimensionali è la capacità di riprodurre sinteticamente lo stato di fatto di un monumento. Nel caso tali disegni provengano da una nuvola di punti possono anche descrivere in modo più dettagliato le sue possibili imperfezioni dovute agli inevitabili rimaneggiamenti e danni impressi dal tempo e dall'uomo.

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.

A partire dal modello complessivo di punti sono stati estratti gli elaborati grafici concordati con la Soprintendenza.

Per il complesso architettonico:

- in scala **1:50**, quattro piante (livello 0, 1, 2, 4) e la sezione longitudinale;
- in scala **1:100**, la pianta delle coperture e tre prospetti (via Vitoni, via della Madonna e cortile di pertinenza);

Per il vestibolo:

- in scala **1:50**, due piante dell'estradosso (una architettonica e una strutturale), tre sezioni (una longitudinale e due trasversali) e il prospetto fotomosaicato della facciata principale;
- in scala **1:20**, lo sviluppo della volta a botte;

Per il corpo ottagonale:

- in scala **1:50**, due sezioni (una trasversale e una diagonale).

La rappresentazione di piante, prospetti e profili sezione è stata realizzata attraverso l'interpretazione geometrica di sottili strisce della nuvola di punti. Tuttavia, spesso, l'individuazione di un piano sezione unico non è stato sufficiente a produrre

[32] Saint Aubin J. P., **Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura**, Bergamo, 1999

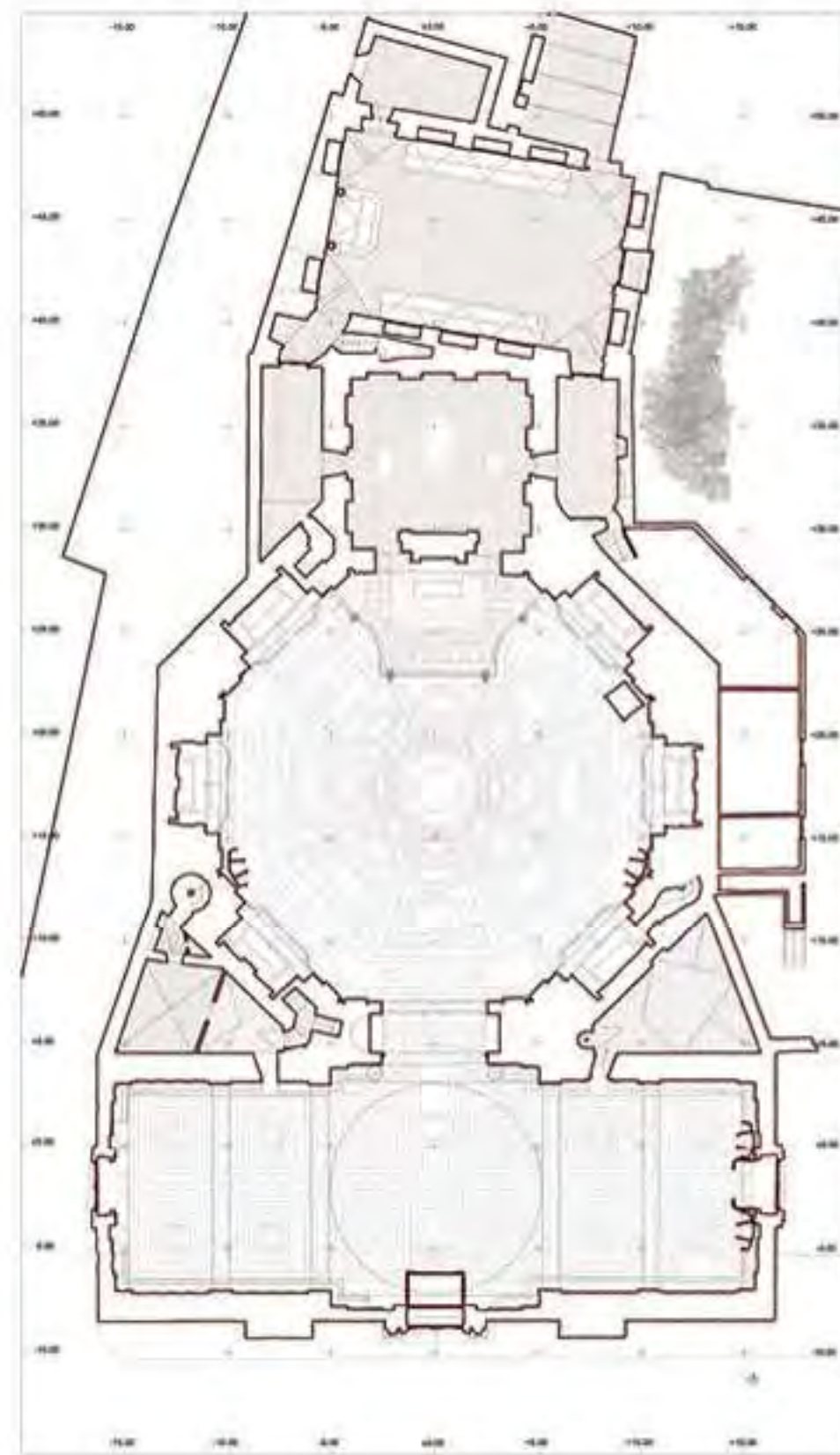


un disegno architettonico, propriamente inteso. La complessità morfologica e l'articolazione degli spazi hanno obbligato ad uno inevitabile spostamento del piano sezione per intercettare le superfici significative. Ad esempio, le sezioni verticali passanti nella mezzeria dei lati del corpo ottagonale, sono state traslate in un primo momento, per non secare la colonnina centrale delle bifore del secondo e terzo ordine e, in un secondo momento, per intercettare la mezzeria della volta a botte presente nei corridoi anulari in corrispondenza del vano finestrato.

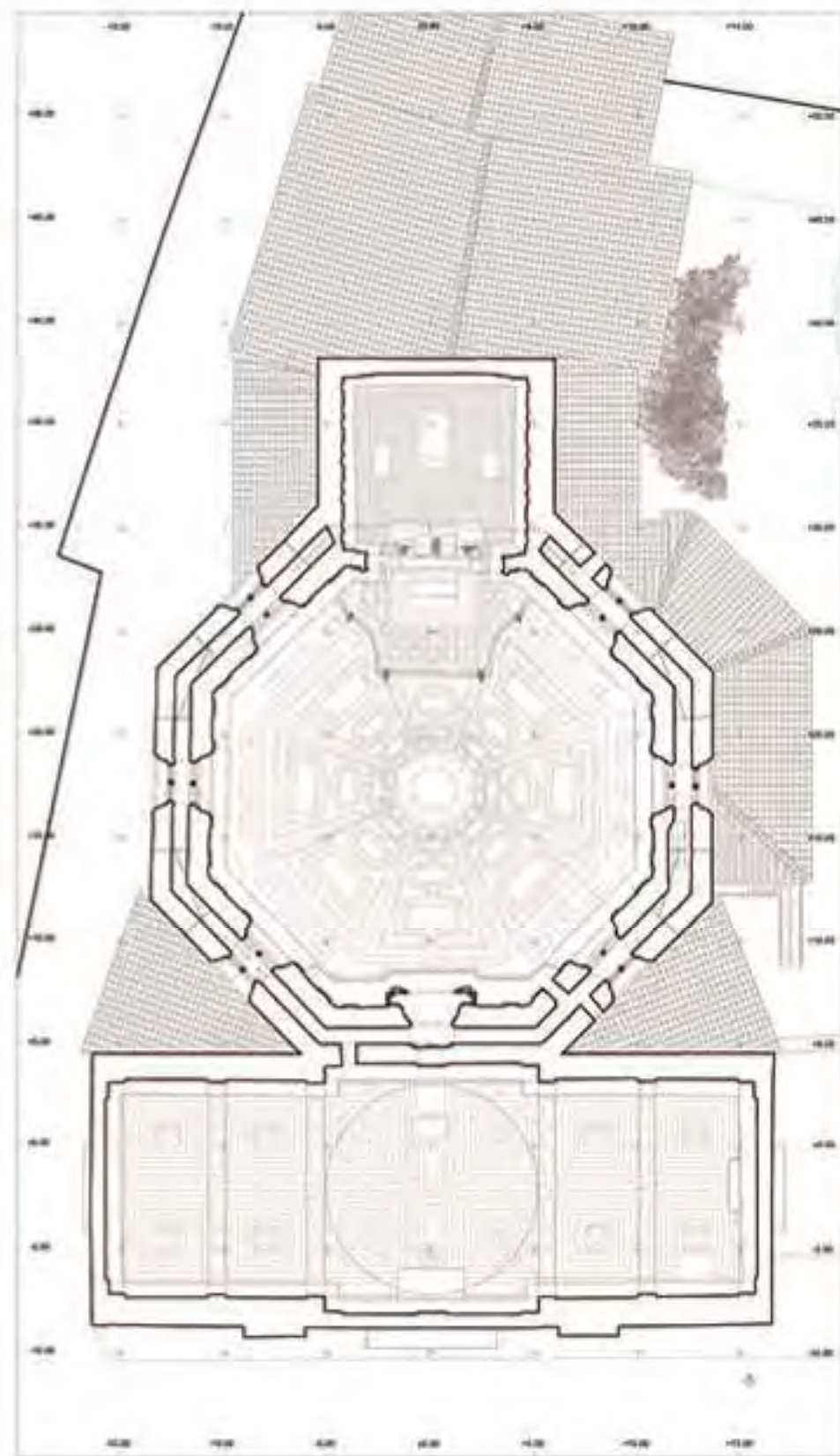
Tutte le registrazioni grafiche prodotte sono di natura bidimensionale, ma mantengono la loro omogenea referenziazione che rimane comunque tridimensionale: ogni elaborato appartiene ad un piano di cui però è nota la posizione e la giacitura nello spazio definito dal sistema di riferimento adottato.

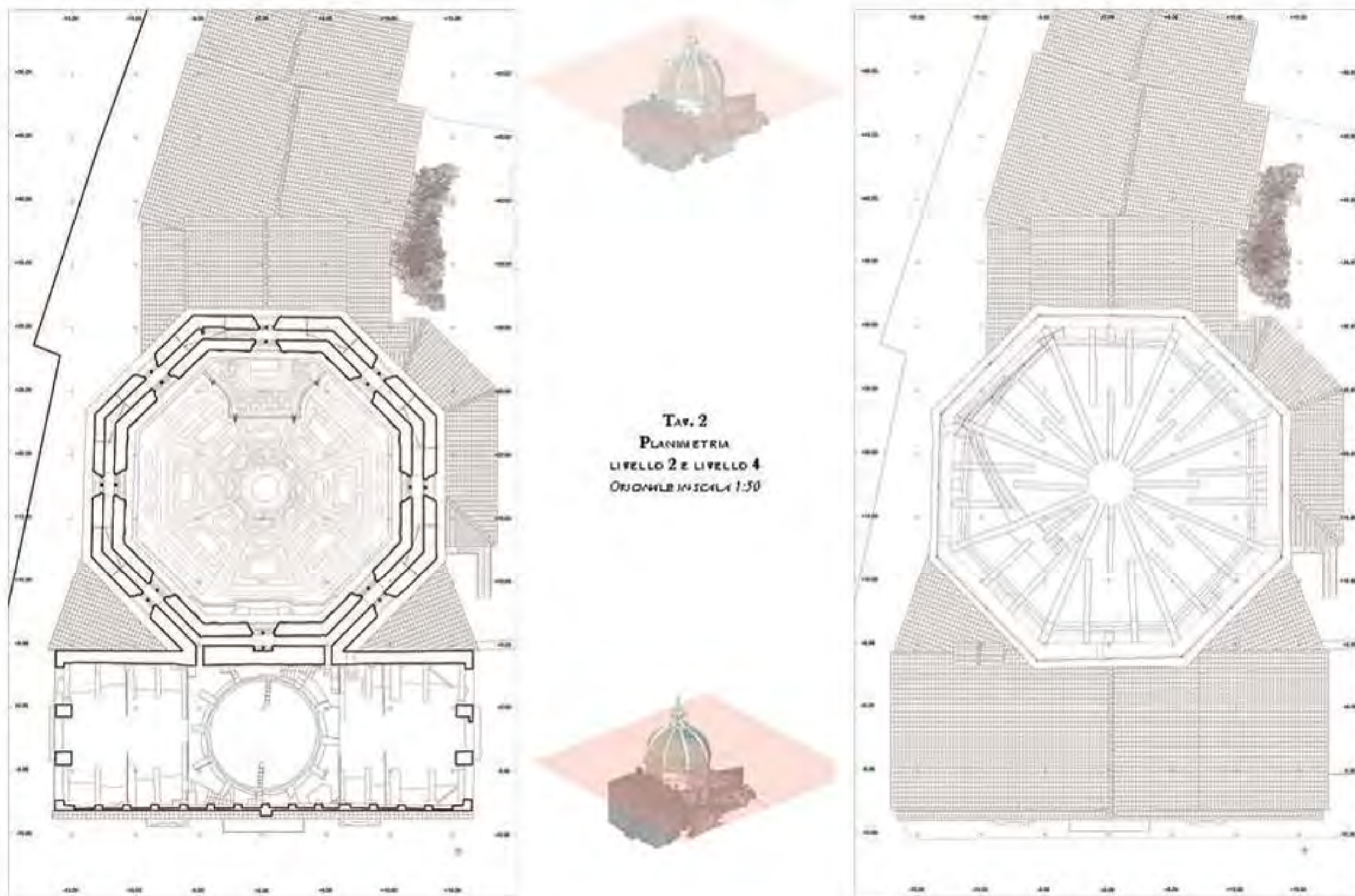
I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA STUDIO DIAGNOSTICO DEI BENI CULTURALI
DALLA SCALA EDILIZIA ALLA SCALA URBANA: I CASI STUDIO DELLA
BASILICA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA E DELLE TORRI DI SAN GIMIGNANO

TAVOLE
ARCHITETTONICHE



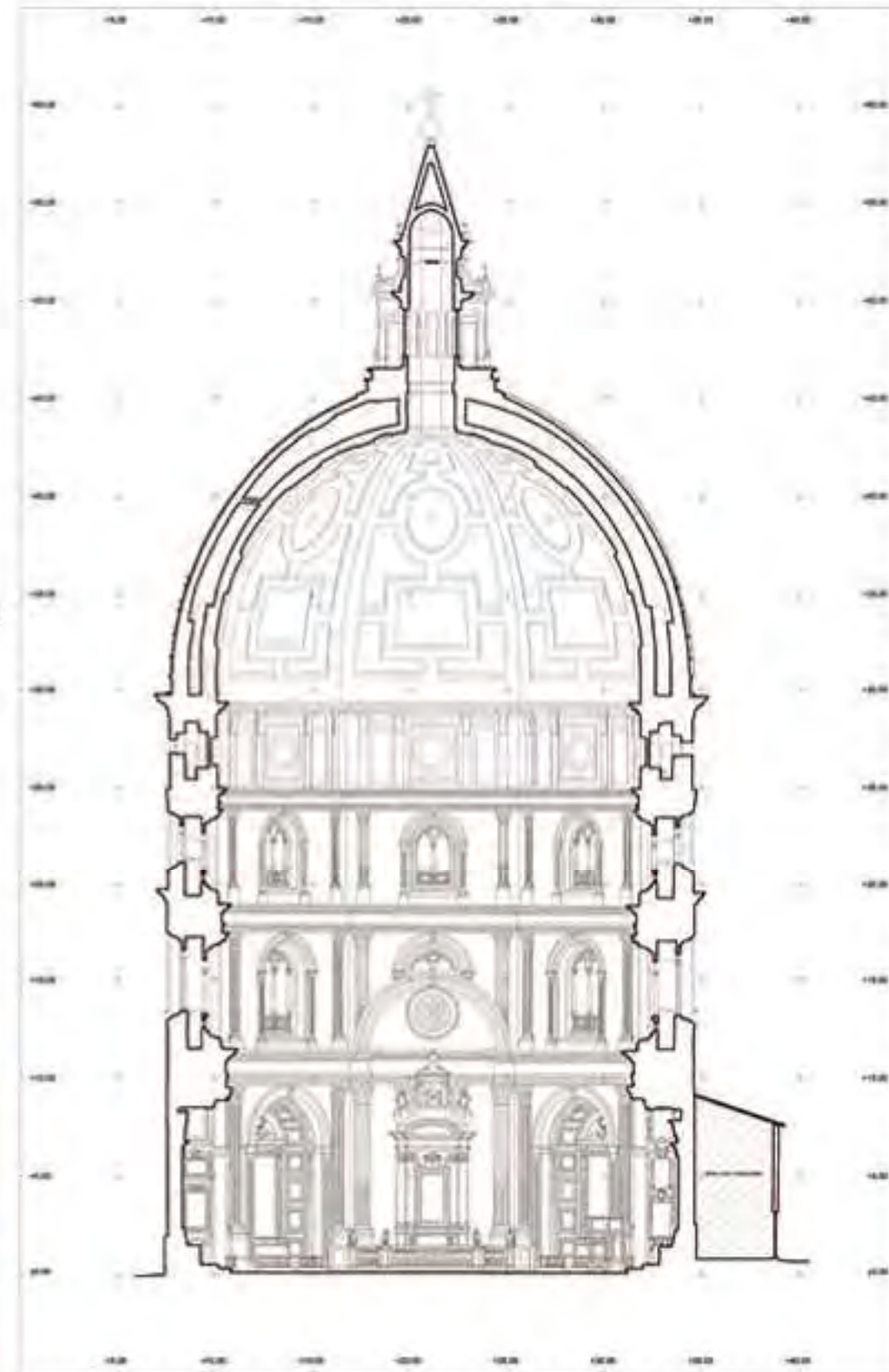
TAV. 1
PLANIMETRIA
LIVELLO 0 E LIVELLO 1
ORIGINALE IN SCALA 1:50

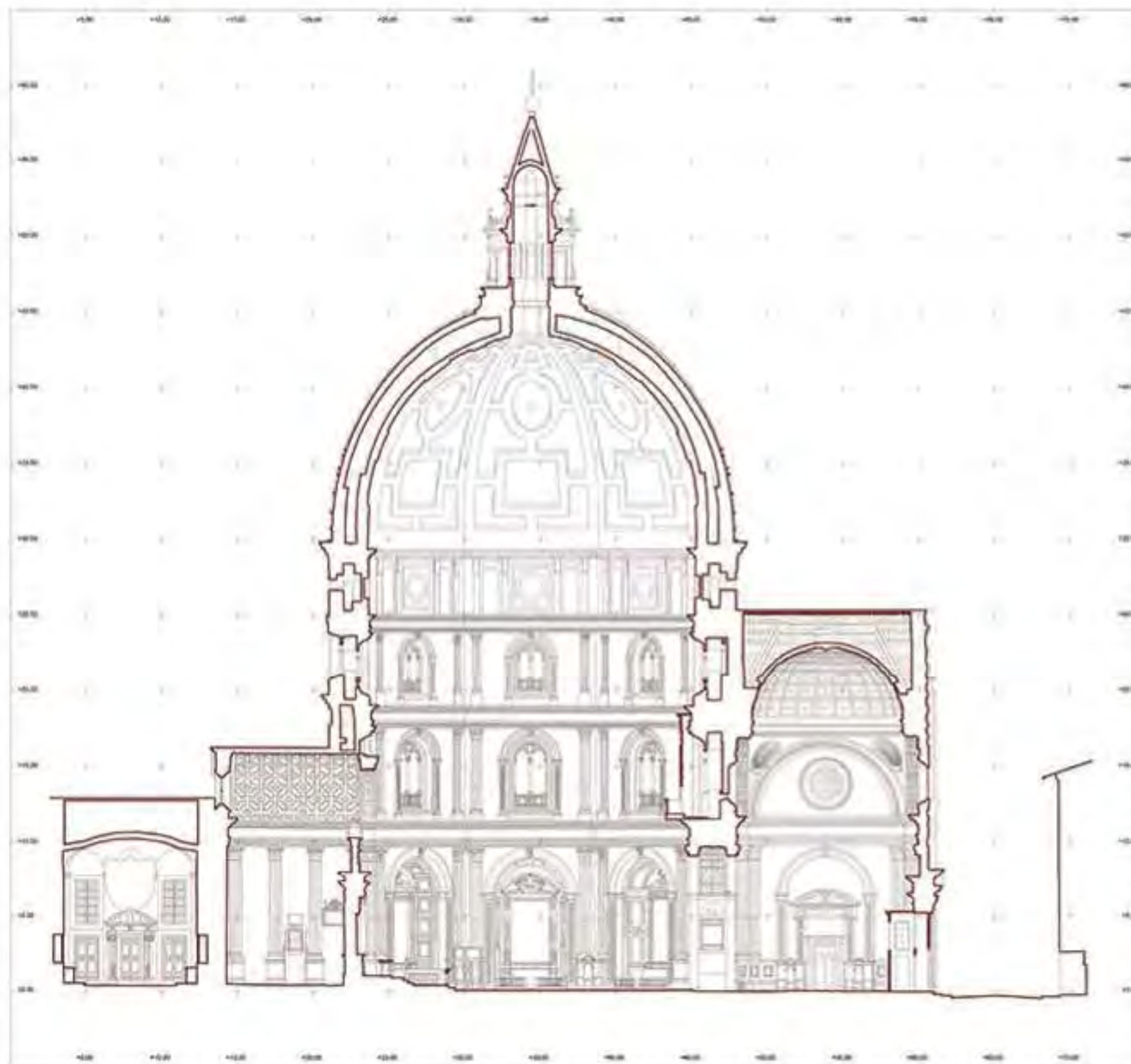






TAV. 3
PROSPETTO MERIDIONALE
ORIGINALE IN SCALA 1:100
SEZIONE TRASVERSALE
ORIGINALE IN SCALA 1:50



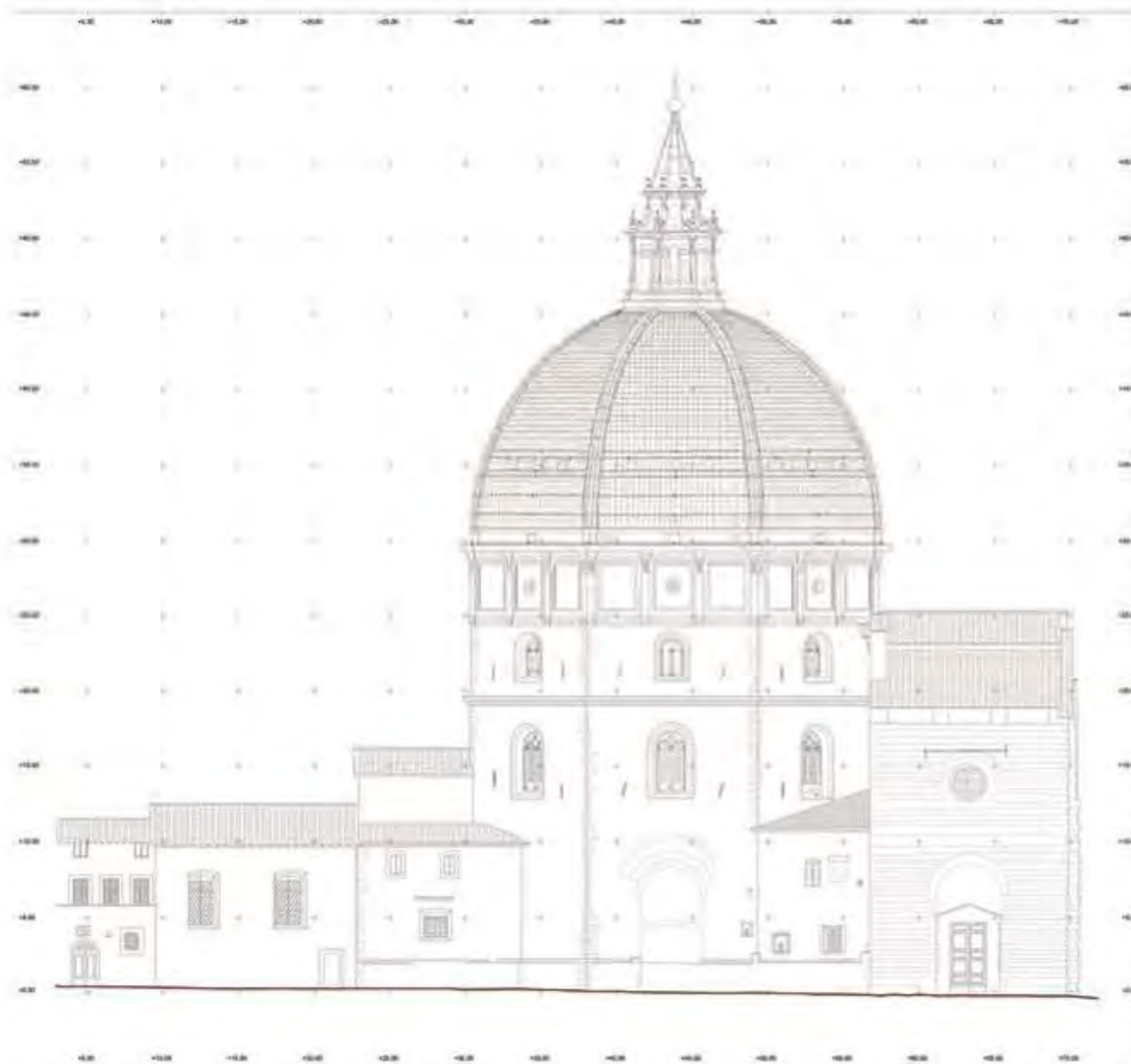


TAV. 4
SEZIONE LONGITUDINALE
ORIGINALE IN SCALA 1:50



Tav. 5
PROSPETTO ORIENTALE
ORIGINALE IN SCALA 1:100





TAV. 6
PROSPETTO OCCIDENTALE
ORIGINALE IN SCALA 1:100

CONFRONTO CON I RILIEVI PRECEDENTI

Il rilievo pregresso più completo e accurato è quello del 1966 realizzato dagli architetti Baldi, Biaggini e Vannucchi per sostenere l'esame di "Restauro dei Monumenti" tenuto dal prof. Sanpaolesi.



Fig. 88 - Prospetto principale. Sovrapposizione dei due rilievi assumendo come riferimento per il confronto la traccia del piano di calpestio della strada e la larghezza della facciata del vestibolo

Dal confronto emerge una corrispondenza tra le misure relative alla stessa porzione ma, laddove è necessario collegare due ambienti distinti, l'errore di misura si propaga proporzionalmente alla distanza dall'elemento preso come riferimento (Figg. 88, 89).

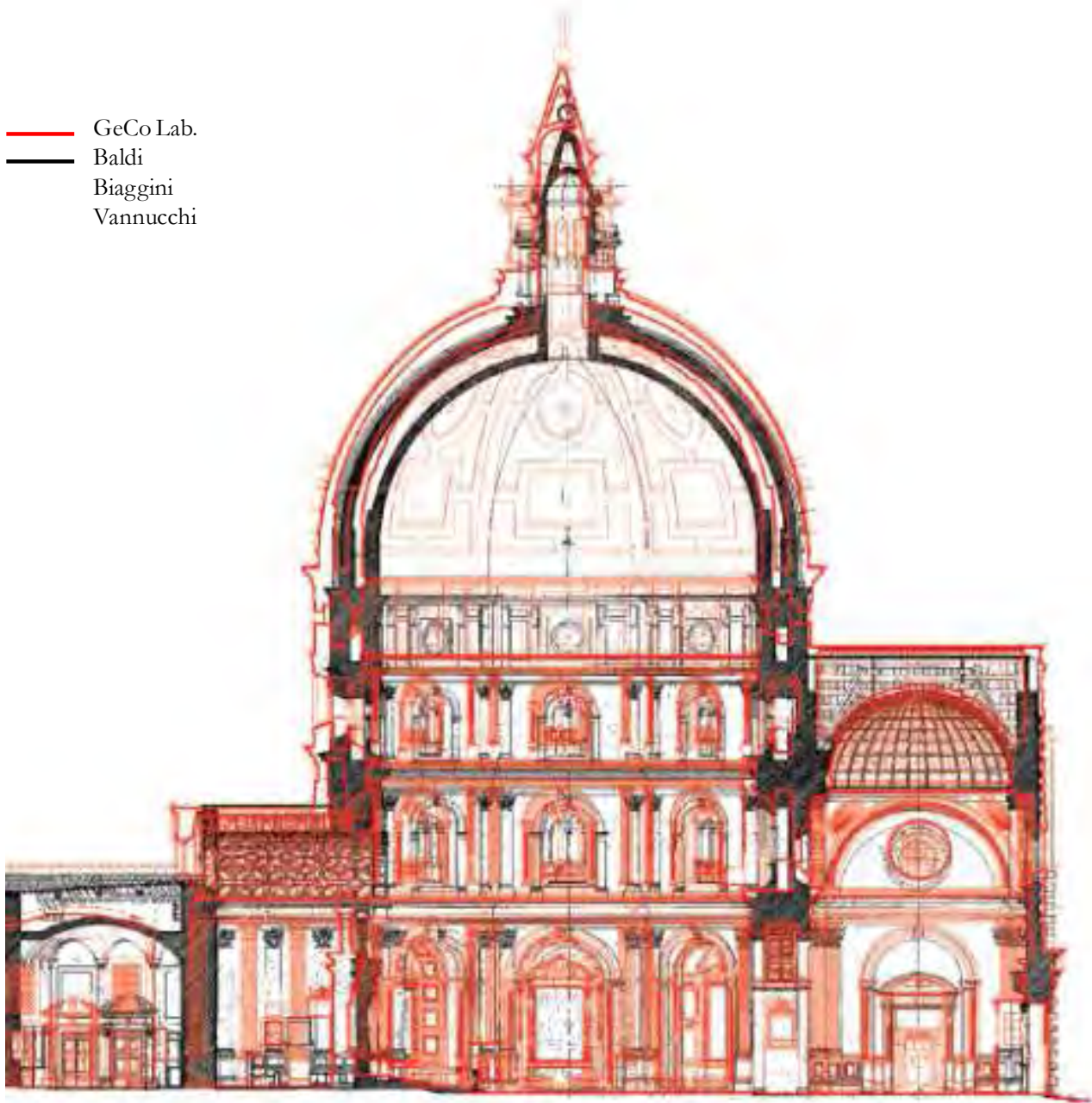
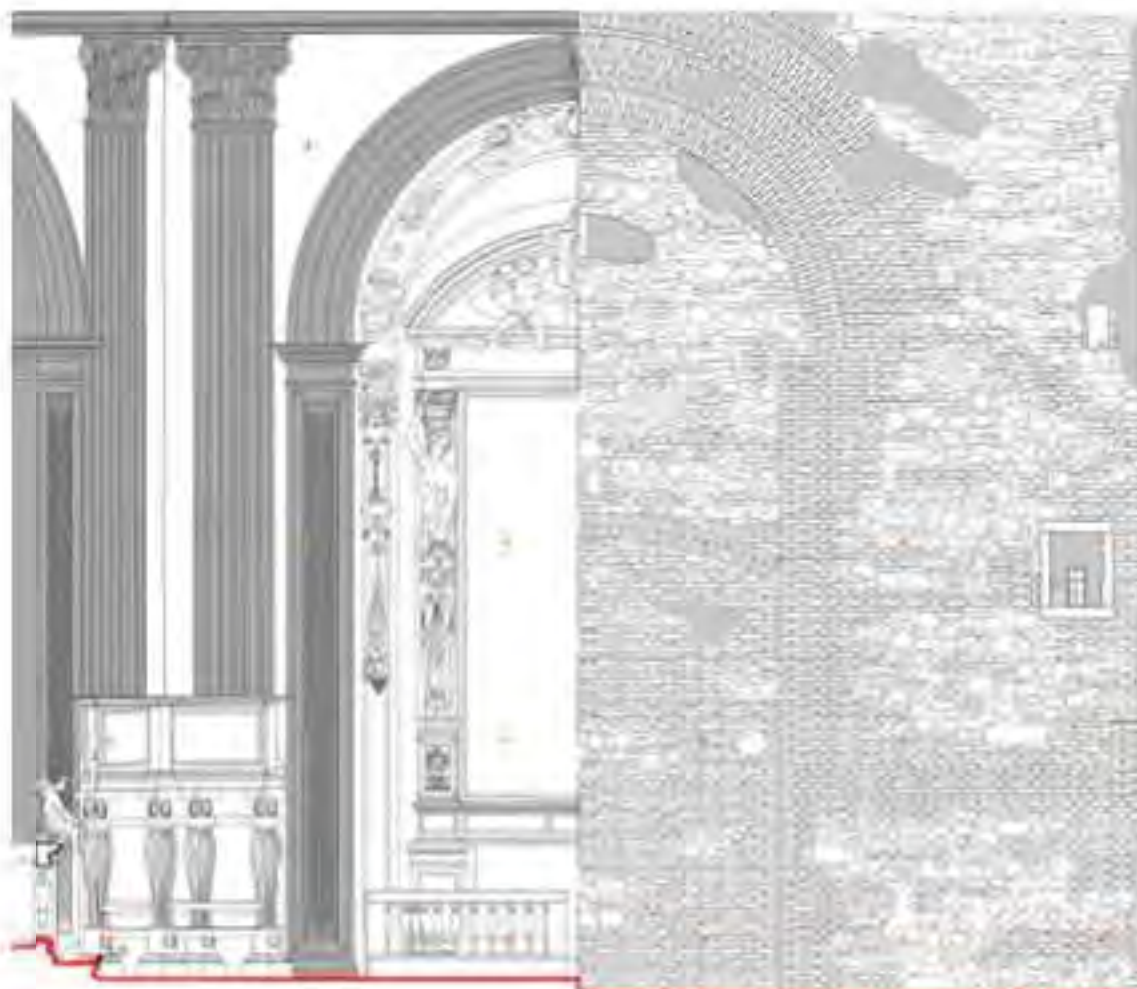


Fig. 89 - Sezione longitudinale della basilica. Sovrapposizione dei due rilievi assumendo come riferimento per il confronto la traccia del piano di calpestio del vestibolo e la sua larghezza sul lato corto



CAPITOLO 6

LA LETTURA DIAGNOSTICA DELLA BASILICA

LA LETTURA DIAGNOSTICA DELLA BASILICA

Lo studio che si effettua *in situ*, spesso, non riesce a rendere pienamente comprensibile la situazione reale che caratterizza una fabbrica di tali dimensioni e importanza. Basti pensare al ripetuto senso di disorientamento che si avverte percorrendo i percorsi ampie, ma ed angusti, e dovuto alla replica uniforme degli elementi costruttivi e all'articolato sistema di collegamento verticale tra i vari livelli.

E' proprio in casi come questo che la banca dati 3D si rivela utile. Il modello tridimensionale, 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 superando ai limiti fisici e agli impedimenti visivi presenti nel mondo reale.

Le attuali tecnologie della geomatica offrono strumenti di rilievo interessanti nel settore dei Beni Culturali e assicurano, se usati con cognizione, un rigore scientifico nel processo di conoscenza. In particolare, *è importante non lasciarsi affascinare dalle immagini accattivanti dei dati laser scanner e individuare protocolli e linee guida tali da ottimizzare il processo di documentazione e rappresentazione necessari alla comprensione delle strutture indagate* [33].

La documentazione metrica prodotta, uniforme e conforme alle esigenze richieste, costituisce una base indispensabile al progetto di restauro e consolidamento.

[33] Balletti C., Guetta F., Pittor L. Integrazione di Tecnologie 3D multiscala per la conoscenza, l'interpretazione e la diffusione di un sito archeologico, in: *Att 10^a Conferenza Nazionale A.I.I.L.A. Bologna, 14 - 17 Novembre 2006, 2006*, ISBN 88-900943-0-3

[34] *Le nuove tecnologie digitali razionalizzano e semplificano le procedure d'indagine 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 stato possibile approfondire la conoscenza della fabbrica attraverso l'indagine tematica computata a partire dalla banca dati 3D.

Si sono evidenziati e quantificati per il vestibolo:

- gli andamenti della struttura e i numerosi fuori piombo, sia nelle pareti perimetrali che nella struttura;
- le discontinuità negli allineamenti dei lacunari delle parti voltate causate dalla rotazione della parete interna della facciata;

per l'aula ottagonale e la cupola:

- i collegamenti interni, sia orizzontali che verticali;
- gli effettivi spessori delle due calotte;
- i materiali e le tecniche costruttive;
- il numero dei costoloni (8 angolari, 16 mediani e 8 centrali a sostegno della lanterna), il loro corretto posizionamento, la loro forma e dimensione;
- il numero di catene metalliche (76 delle quali ben 39 nella cupola), la loro esatta collocazione e dimensione;
- gli interventi di consolidamento;
- le lesioni presenti su entrambe le calotte evidenziando le tele maggiormente danneggiate;
- i legami esistenti tra la geometria, la struttura e le deformazioni manifestatesi nel tempo.

[34] Gisera F., Ballem C., Adami A. 3D multiresolution representations in archaeological sites. in: *Proceeding of the XIX CIP-4 International Symposium International Cooperation in (and for) Cultural Heritage - Turin, September 26 - October 01 2005, 2005*

I RESTAURI E CONSOLIDAMENTI DEL VESTIBOLO

La relazione su altri danni del tetto del Capitano Marcantonio Bettani del 1649 [35] poneva l'attenzione sullo stato di degrado delle coperture che proteggevano cupolino e volte a botte del vestibolo: le grandi incavallature lignee manifestavano numerosi punti deboli. Tuttavia, i parei discordi sulla situazione strutturale non permisero un intervento di consolidamento immediato ma, piuttosto, sistematiche opere di manutenzione periodica e di revisione delle coperture.

Si propose inizialmente una sostituzione della carpenteria della copertura in modo tale da "sgravare la cupoletta dal peso del tetto" (Pier Antonio Tosi, 20 agosto 1723), "disfare la porzione del cupolino uscita dal suo sesto, porre le centine e rimettere le stesse pietre, filare per filare, nello stesso modo" (Giovanni Maria del Fantasia, 1723), sostituire i cavalletti lignei danneggiati e introdurre catene di ferro sul cupolino (Alessandro Saller, 20 marzo 1724); innalzare la facciata per appoggiarvi il nuovo tetto e costruire due pilàstroni a fianco dell'ingresso per contraffortare le murature indebolite e fuori piombo (Alessandro Saller, 21 maggio 1724).

L'ultima relazione in merito, corredata di rilievi, fu redatta da Giovan Battista Bettini il 17 maggio 1725. Lo scritto inizia dalla constatazione dei disvisti:

- il cupolino presentava le formelle che occupano il terzo superiore fuori sesto (Fig. 90);
- il tetto mostrava cavalletti fuori piombo e si registrava un distacco dalle murature laterali in corrispondenza delle due volte a botte del vestibolo.

E prosegue alle indicazioni di restauro:

- riaratura del cupolino lasciando in opera quello esistente onde evitare possibili e prevedibili maggiori danni;
- assicurare le formelle delle volte a botte e del cupolino tramite tiranti metallici aggrappati al rivestimento di laterizio degli estradossi (Fig. 91);
- restauro del tetto con sostituzione dei cavalletti dopo avere armato le due volte a botte con una sopravvolta per evitare eventuali ed irreparabili cadute di materiale (Fig. 92);
- riproccare in piombo le murature attraverso l'inserimento di catene metalliche;
- innalzare la facciata principale per consentire di impostare il nuovo tetto più in alto ed impedire che eventuali cedimenti potessero danneggiare ancora le coperture;

[35] Romby G., La Basilica della Madonna dell'Umiltà di Pistoia: tre secoli di restauro, in: Andreini A., Gori M. (a cura di), *Atti dell'giornata di studio "Centenario del restauro della Madonna dell'Umiltà a Pistoia"*, Pistoia, 5-26 maggio 1992, Pistoia, Società Pistoiese di Storia Patria, 1992, pp. 87-110.



Fig. 90 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Disegno del capolino eseguito da Giovan Battista Bettini nel 1725.

Il capolino, cerchiato da una catena metallica, è diviso in spicchi composti di sette formelle scorniciate e intagliate a raschi.

Le formelle poste al di sotto della quota della catena di ferro appaiono inalterate; quelle disposte al di sopra, invece, sono evidentemente dislocate a causa dell'esile spessore pari a 10 cm di pietra.



- realizzare la costruzione di due pilastri, secondo il disegno originario di Jacopo Lafri, per coadiuvare l'intervento di restauro del cupolino e del tetto;
- rifondare tutta la facciata per assicurare una maggiore stabilità alle fondazioni originali, poco profonde e scarsamente affidabili.

Nell'ultimo trentennio del secolo proseguirono le opere di normale manutenzione fino ad arrivare al 1826 per trovare una nuova serie di interventi di consolidamento. Marco Gamberai, tra il 1826 e il 1830, presenta petizie e disegni relativi agli interventi da attuare:

- aggiungere due catene di ferro, parallele a quelle esistenti, per opporre resistenza alla spinta del carico del cupolino in facciata;
- riedificare interamente il cupolino;
- stuccare l'estradosso del cupolino.

Nonostante i numerosi restauri e consolidamenti, il cupolino continua a destare preoccupazioni soprattutto dopo il terremoto del 1920.

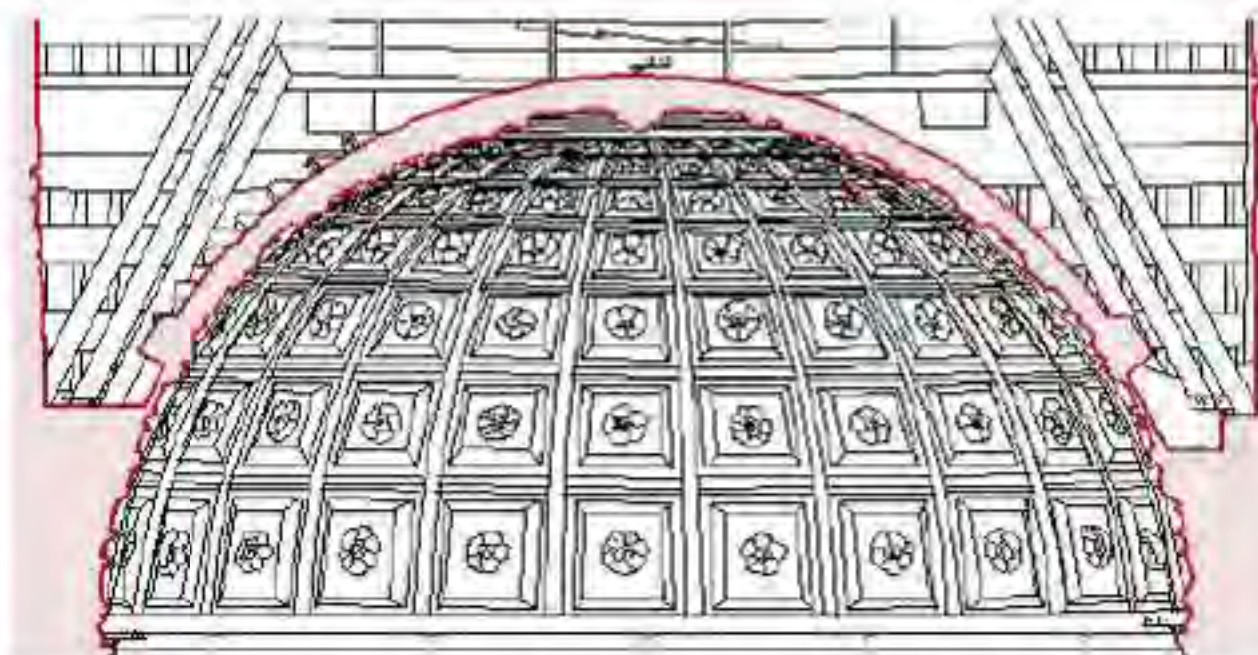


Fig. 91 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Cupolino

Sopra, sezione trasversale del cupolino realizzata nel 2009 (spessore del guscio di 25 cm).
A fianco, sezione della formella (originale in scala 1:5). Il sottilissimo guscio del cupolino è formato da 10 cm di pietra e 15 cm di rivestimento in laterizio al quale sono agganciati i tiranti metallici.

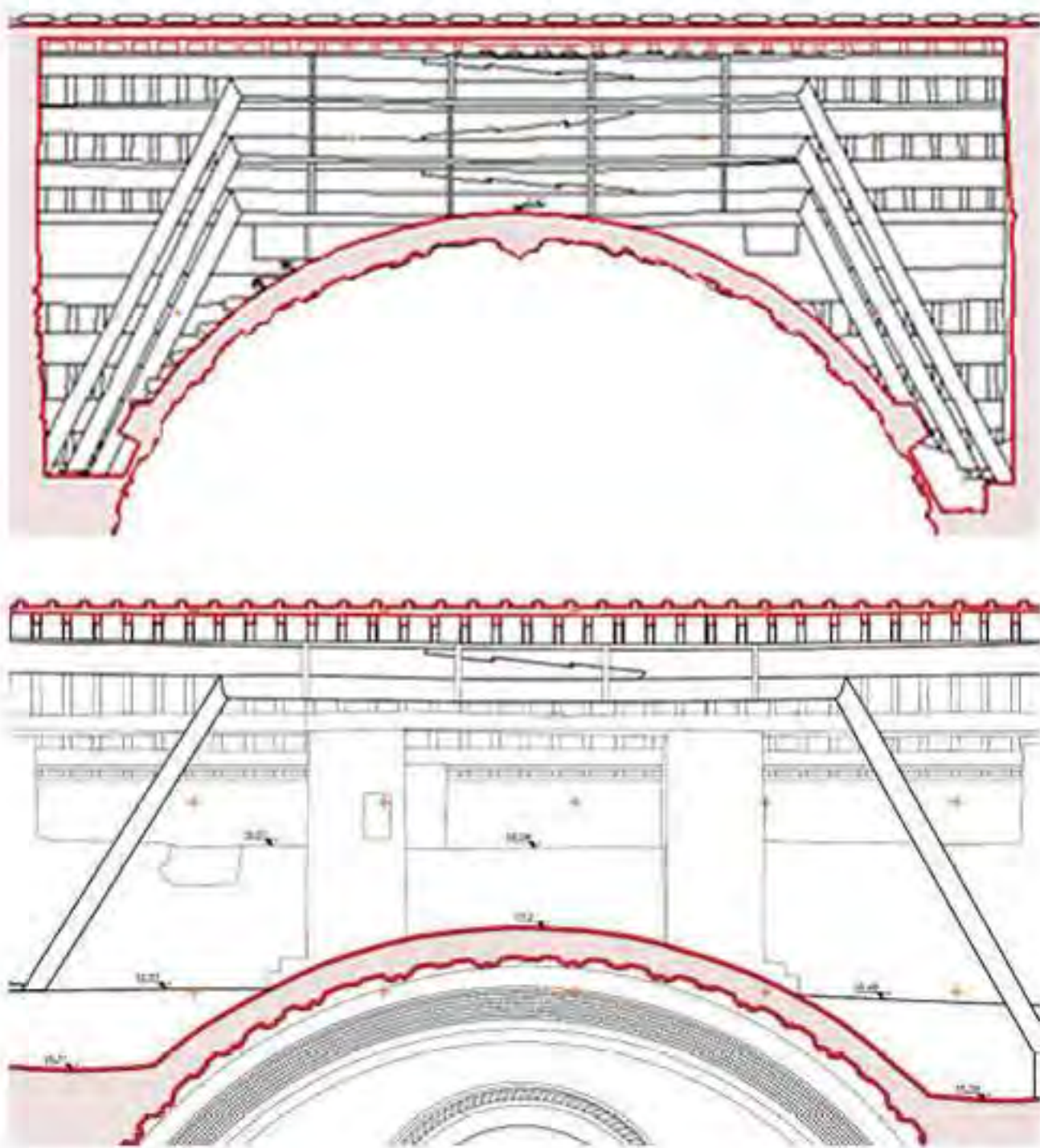


Fig. 92 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Capoline.
Sopra, sezione trasversale passante per il capoline; sotto, sezione trasversale passante per la volta a botte. Rilievi del 2009.
Si noti la divisione dei cavalletti e delle travi in due pezzi sia per assicurare una minore spesa che per la difficoltà di reperire legname di dimensioni pari all'intera luce dei tetti

ANALISI DELLE DEFORMAZIONI DEL VESTIBOLO

Il rilievo tridimensionale del vestibolo della basilica ha evidenziato e quantificato i numerosi fuochi piombo presenti nelle pareti perimetrali e nella struttura del sottotetto.

La deformazione più significativa è lo spanciamento dei prospetti (orientale, meridionale e occidentale) verso l'esterno: maggiore nella facciata principale e in corrispondenza dell'imposta del cupolino; rientrante in prossimità delle catene metalliche (Figg. 93, 94).

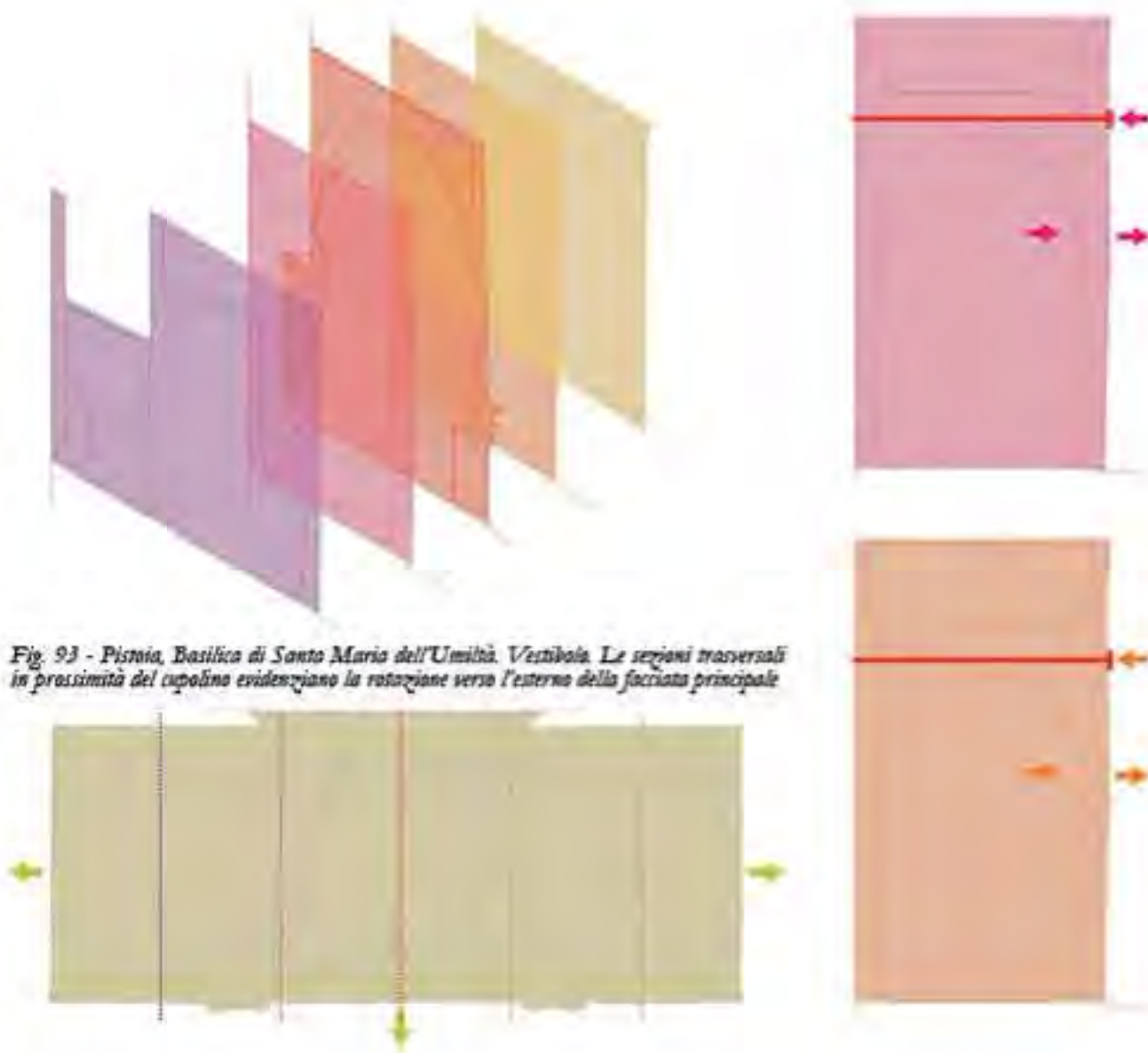


Fig. 93 - Pistoia, Basilica di Santo Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Le sezioni trasversali in prossimità del cupolino evidenziano la rotazione verso l'esterno della facciata principale

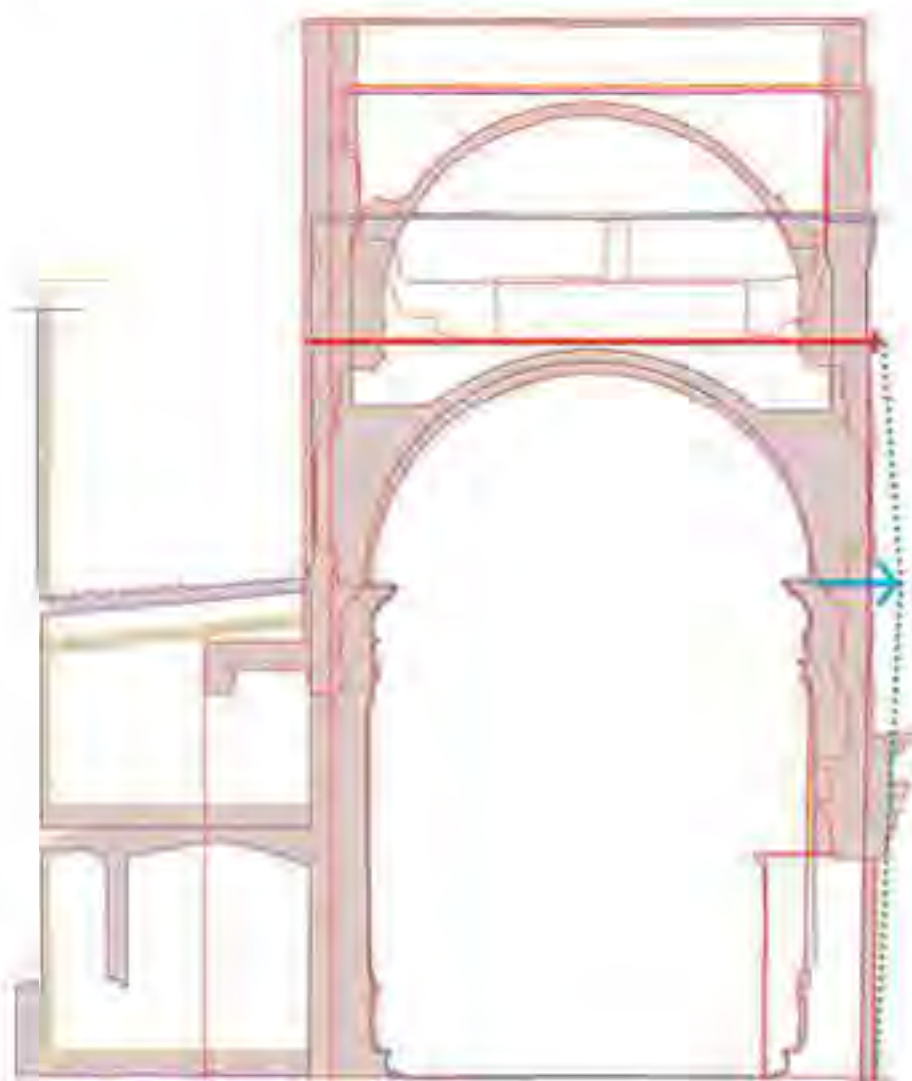


Fig. 94 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Vista ortogonale delle cinque sezioni trasversali, possibile grazie alla comune referenziazione nel medesimo sistema di riferimento. È evidente la rotazione della facciata principale verso l'esterno: massima deformazione in prossimità delle imposte delle volte a botte disposte in linea con i quattro punti di sostegno del cupolino. Tali punti trasferiscono i carichi del cupolino lungo la linea verticale che incontra altri quattro punti deboli (due a oriente e due a occidente) di sostegno delle volte a botte. Il carico, maggiore di quello che la struttura è in grado di sopportare, provoca uno spianciamento. Tale deformazione è ripristinata più in alto per la presenza della catena metallica

Sono state dimensionate e posizionate correttamente le otto catene settecentesche presenti nell'estradosso del vestibolo, alcune visibili altre interrate nella muratura. La comune referenziazione dei sottoprogetti (nel caso specifico: *Vestibolo Livello 0*, *Vestibolo Livello 1*, *Esterno via della Madonna*, v. capitolo 5) ha permesso di relazionare i dati interni con quelli esterni rendendo più agevole la lettura strutturale del vestibolo. Infatti, l'identificazione dei capochiavi D ed F nel prospetto nord-ovest ha evidenziato, da un lato la presenza della catena CD; dall'altro, l'andamento della catena EABF (grazie anche ai capochiavi A e B visibili nel prospetto ovest). Allo stesso modo, il capochiave R ha consentito l'identificazione della catena interrata QR nel prospetto nord-est (Figg. 95, 96).

**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 TORRE DI SAN GIMIGNANO



PROSPETTO NORD-OVEST



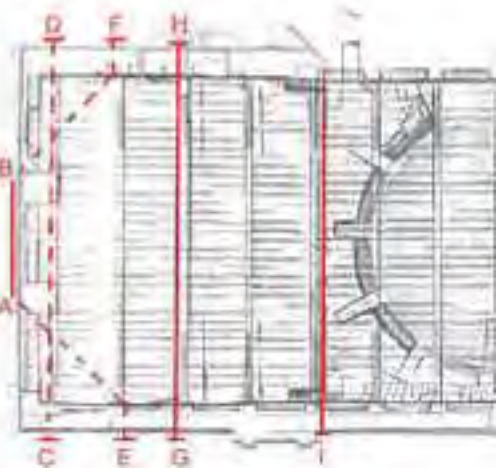
PROSPETTO OVEST



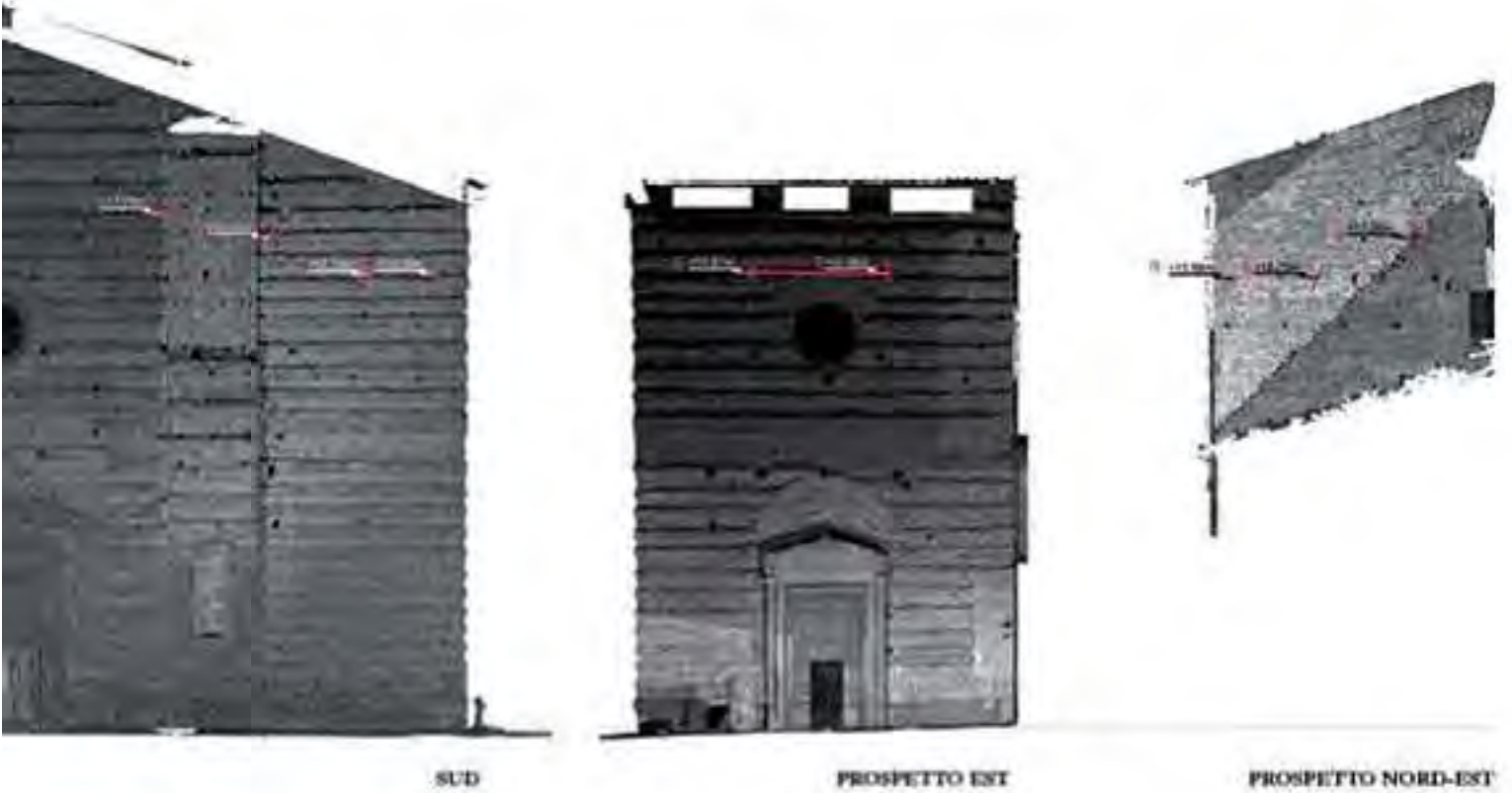
PROSPETTO



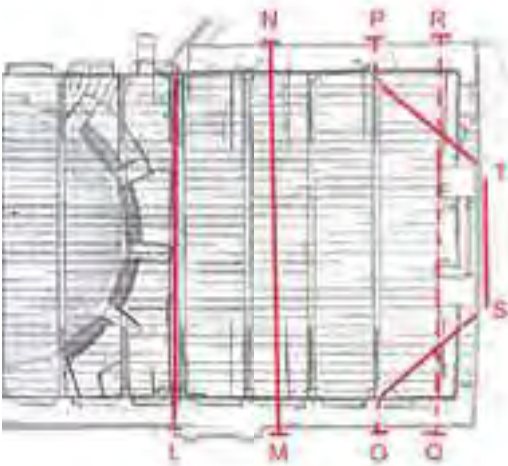
Fig. 95 - Sopra, viste ortogonali del modello di punti, visualizzato in scala



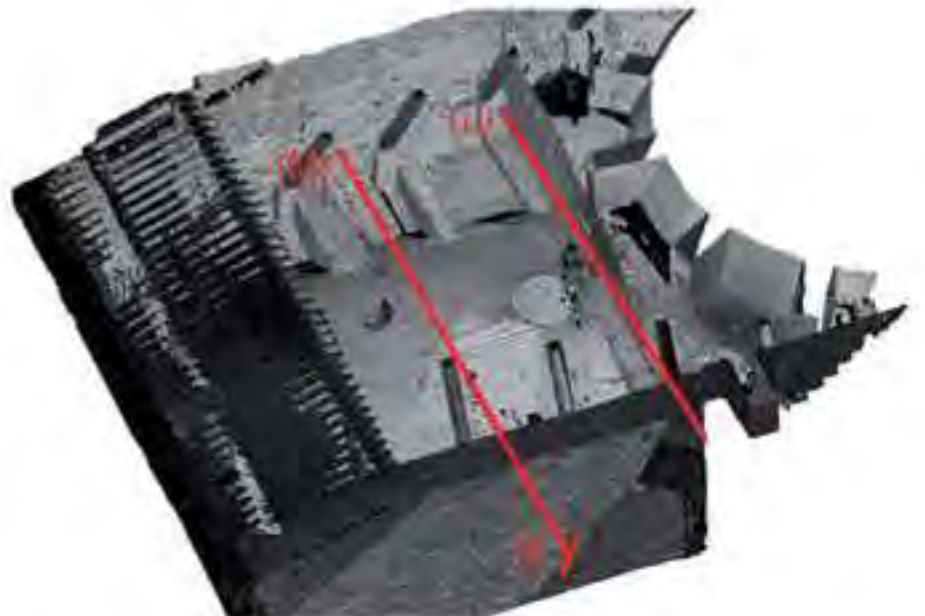
Le otto catene settecentesche sono evidenziate in rosso (tratteggiate quelle all'interno della muratura e perciò non visibili)



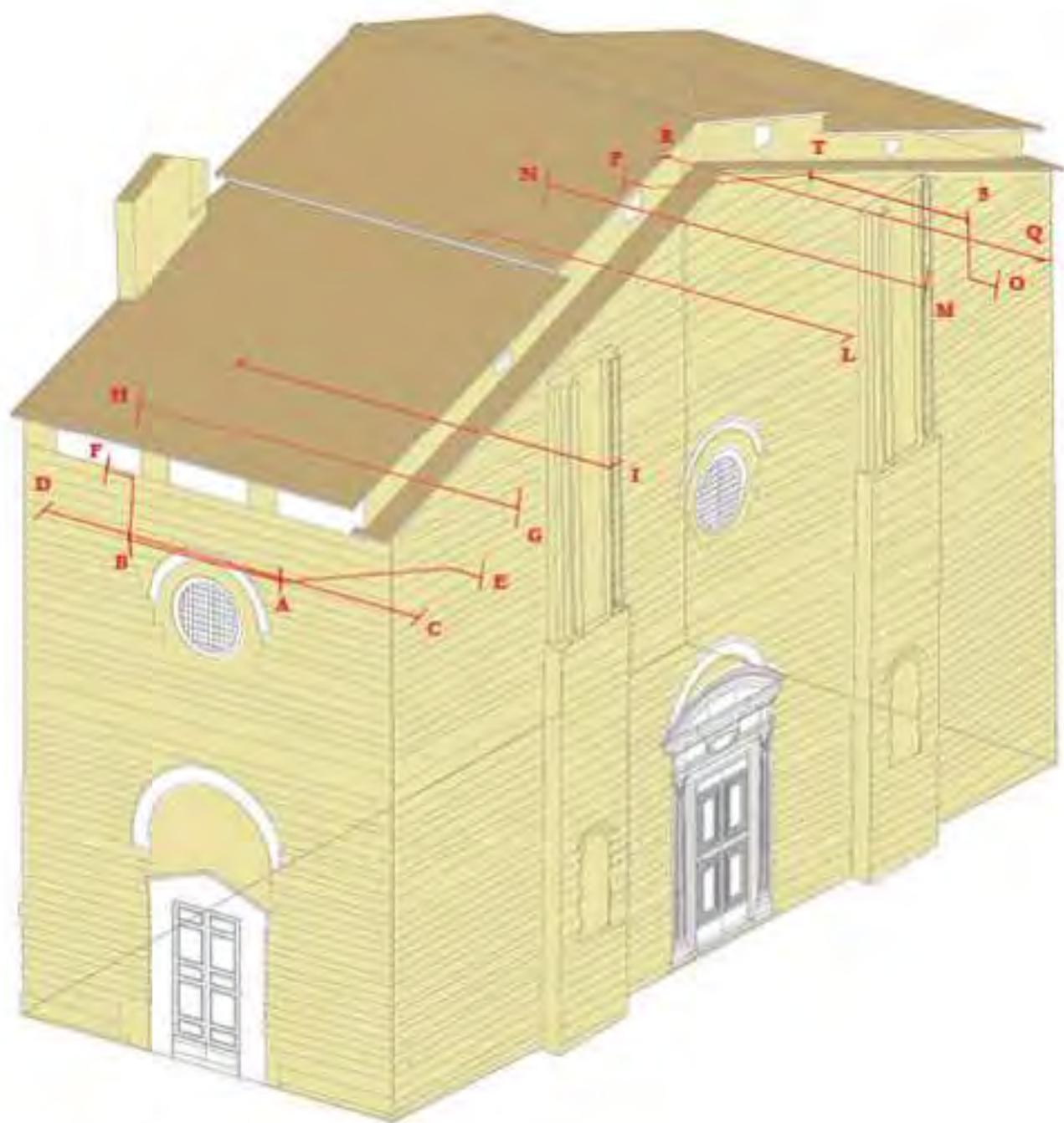
*di grigi, dei quattro prospetti esterni
 Sotto, vista in silhouette dell'estradosso*



*I capochiavi sono stati tutti indicati
 con le lettere alfabetiche.
 Ai lati, alcune viste 3D del modello di
 punti con indicazione delle catene*



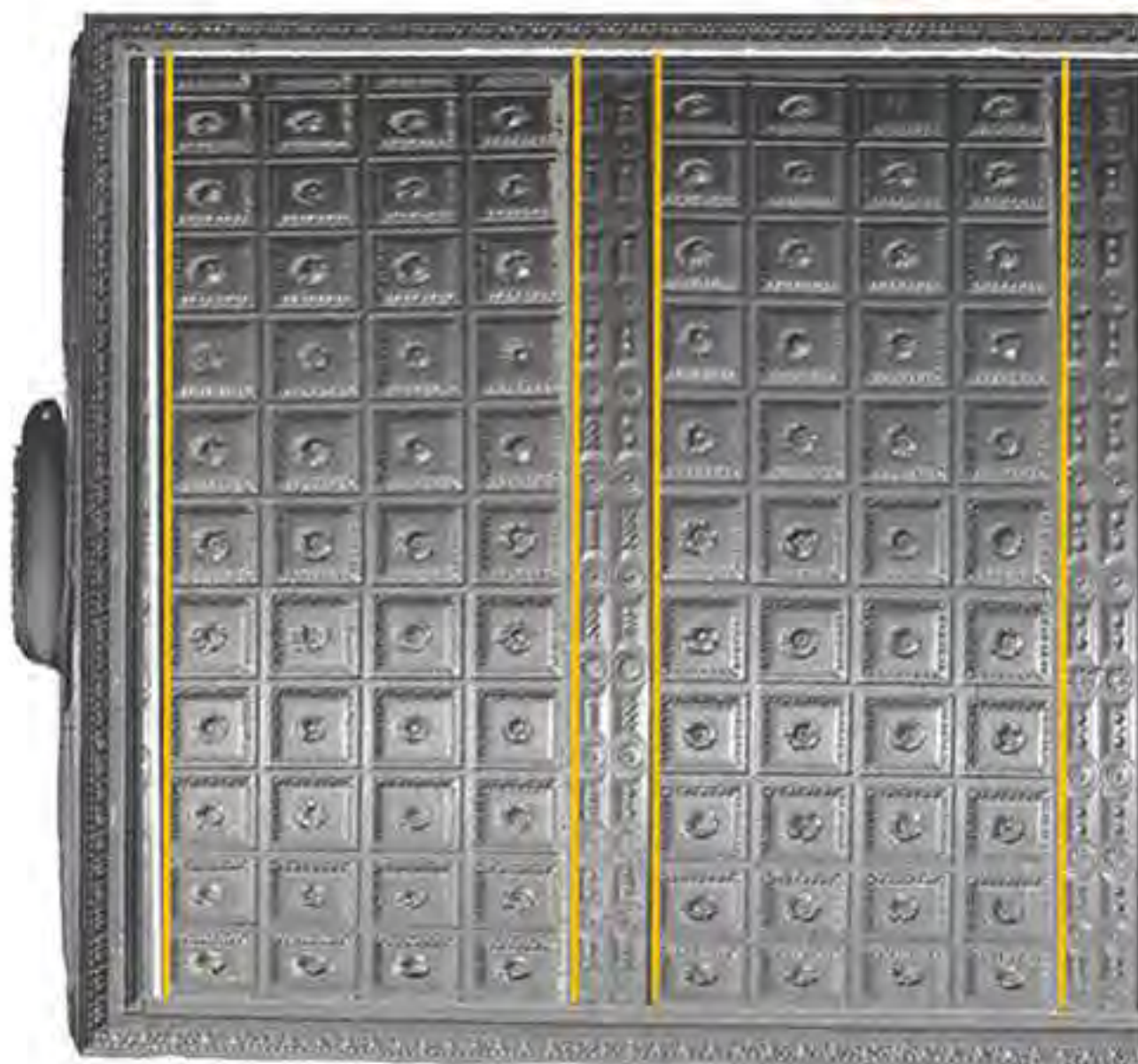
**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA STUDIO DIAGNOSTICO DEI BENI CULTURALI**
DALLA SCALA EDILIZIA ALLA SCALA URBANA: I CASI STUDIO DELLA
BASILICA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA E DELLE TORRE DI SAN GIMIGNANO



*Fig. 96 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo.
Modello 3D del vestibolo, realizzato a partire dal modello complessivo di punti, con l'indicazione del sistema di catene metalliche settecentesche.*

I fuochi piombo letti nelle pareti perimetrali si traducono in una deformazione della volta a botte, accentuata nel prospetto est, probabilmente mai risanata dall'intervento settecentesco (Fig. 97).

Fig. 97 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Modello di superficie 3D dell'intradosso del vestibolo. Particolare della volta a botte orientale. In giallo, la linea ideale che avrebbero dovuto seguire il perimetro della volta; in bianca, la linea reale della volta deformata. Al lato, una foto di dettaglio della lacerazione, nel punto di massima deformazione, calmata da un cuneo di malta



Il calcolo delle deformazioni, a partire dalla banca dati 3D, è stata effettuata sui quattro prospetti del vestibolo attraverso il confronto con un piano verticale di riferimento per osservare le grandi deviazioni principalmente dovute allo spanciamento in prossimità delle imposte delle volte a botte, appesantite dai carichi del cupolino (Figg. 98, 99, 100, 101).

La lettura diagnostica si è sviluppata analizzando le differenze tra ogni prospetto e il relativo piano verticale attraverso una mappa di elevazione. Gli elaborati confermano quanto già osservato precedentemente nelle tavole architettoniche.

In seguito, per interpretare più consapevolmente le deformazioni e assicurare un buon livello di leggibilità, sono state vettorializzate le curve di livello, ogni 5 cm, inevitabilmente riscontrate sui prospetti orientale, meridionale ed occidentale. I maggiori fuori piombo si riscontrano nella facciata principale con deformazione massima pari a circa 25 cm e, a seguire, nelle facciate orientale e occidentale con, rispettivamente, circa 25 cm e 20 cm (Figg. 102, 103, 104, 105).



Fig. 98 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Estrazione di porzioni di punti appartenenti ad un piano dello spessore di 5 cm. Scala crescente da sinistra a destra. Le deformazioni sono calcolate come distanze tra i punti dei prospetti ed il relativo piano verticale di riferimento

PROSPETTO SUD

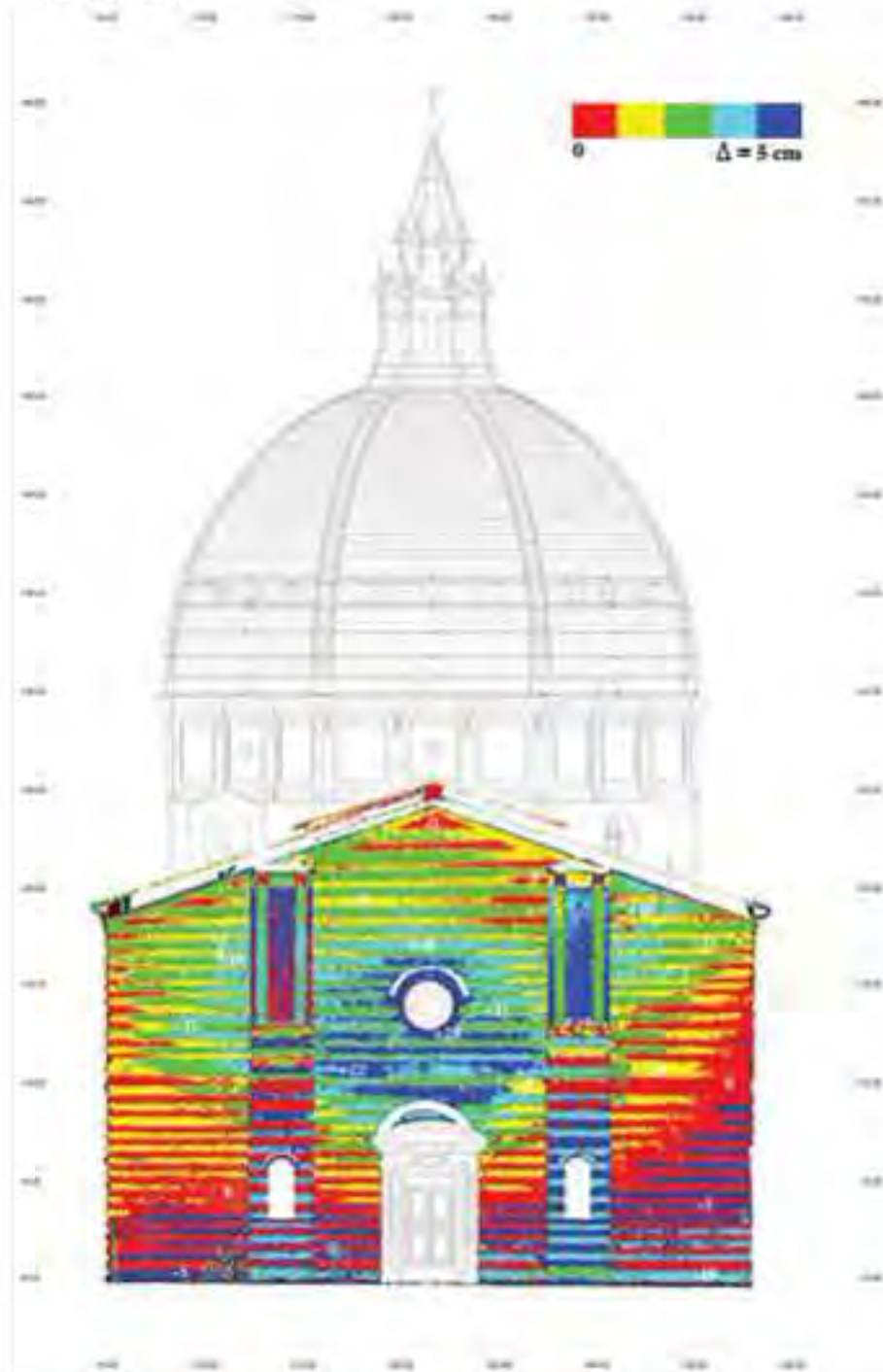


Fig. 99 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Mappa di elevazione, rappresentata in falsi colori, degli eventuali fuori piombo dei prospetti. Le deformazioni sono calcolate come distanze tra i punti dei prospetti ed il relativo piano verticale di riferimento.

I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA STUDIO DIAGNOSTICO DEI BENI CULTURALI
DALLA SCALA EDILIZIA ALLA SCALA URBANA: I CASI STUDIO DELLA
BASILICA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA E DELLE TORRE DI SAN GIMIGNANO

PROSPETTO EST

PROSPETTO OVEST

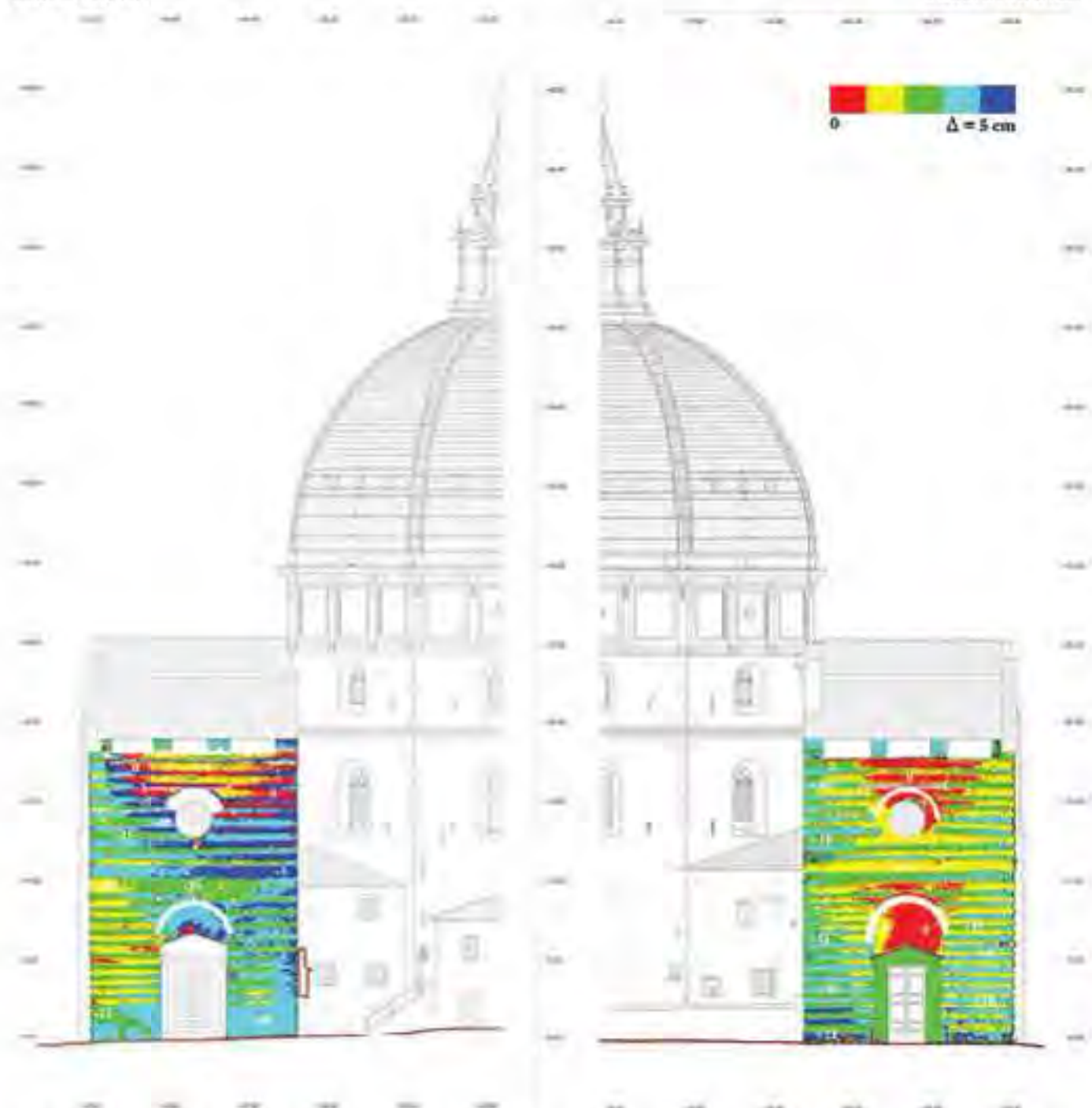


Fig. 100 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Mappa di elevazione, rappresentata in falsi colori, degli eventuali fuori piombo dei prospetti. I falsi colori sono stati calibrati in modo da rappresentare i diversi livelli di elevazione del prospetto a partire da una quota zero (porzione pressochè in piombo, indicata in rosso) con un delta di 5 cm. Le deformazioni sono calcolate come distanze tra i punti dei prospetti ed il relativo piano verticale di riferimento

PROSPETTO NORD

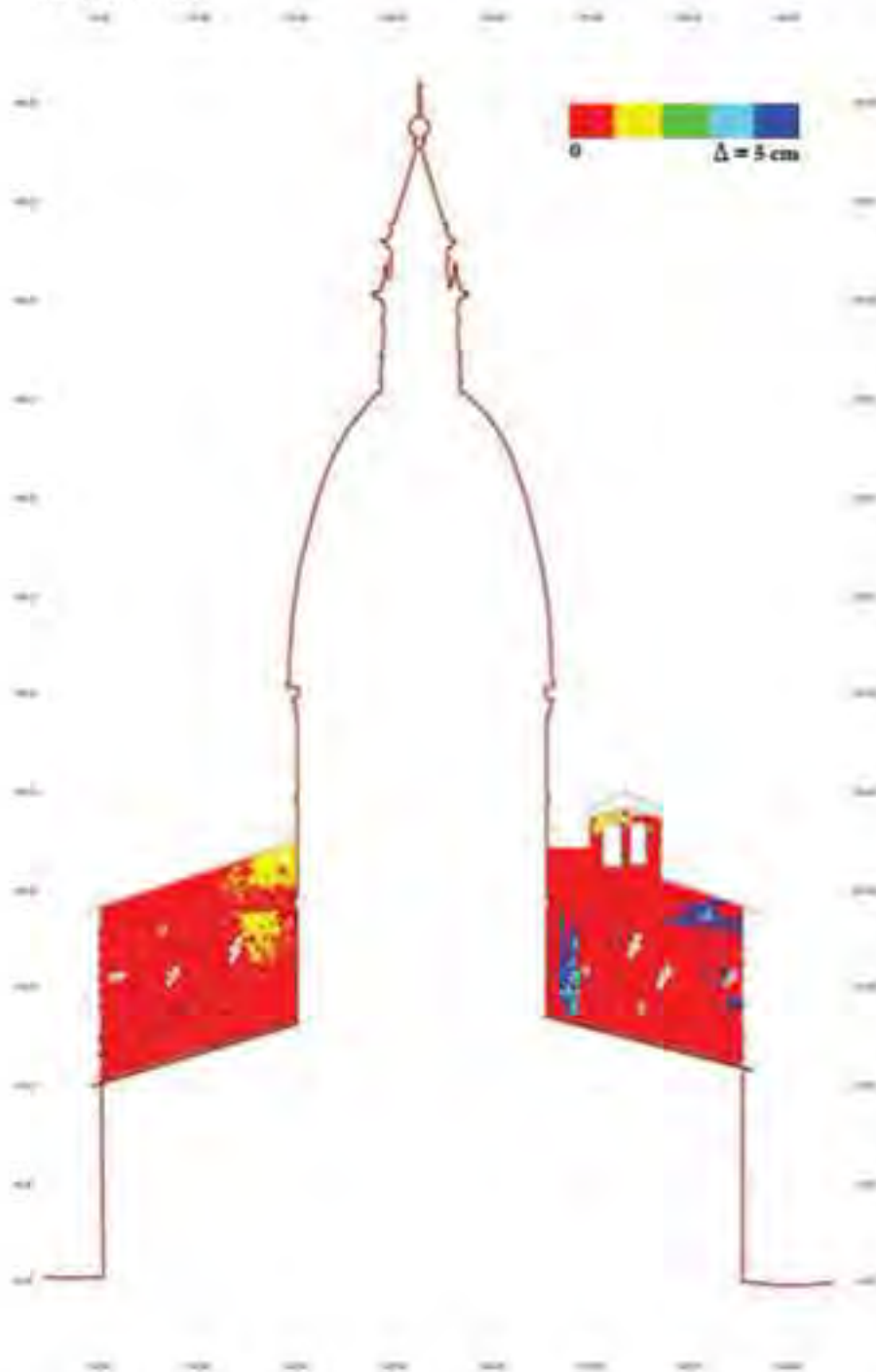


Fig. 101 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Mappa di elevazione, rappresentata in falsi colori, degli eventuali fuori piombo dei prospetti. Le deformazioni sono calcolate come distanze tra i punti dei prospetti ed il relativo piano verticale di riferimento.

PROSPETTO SUD

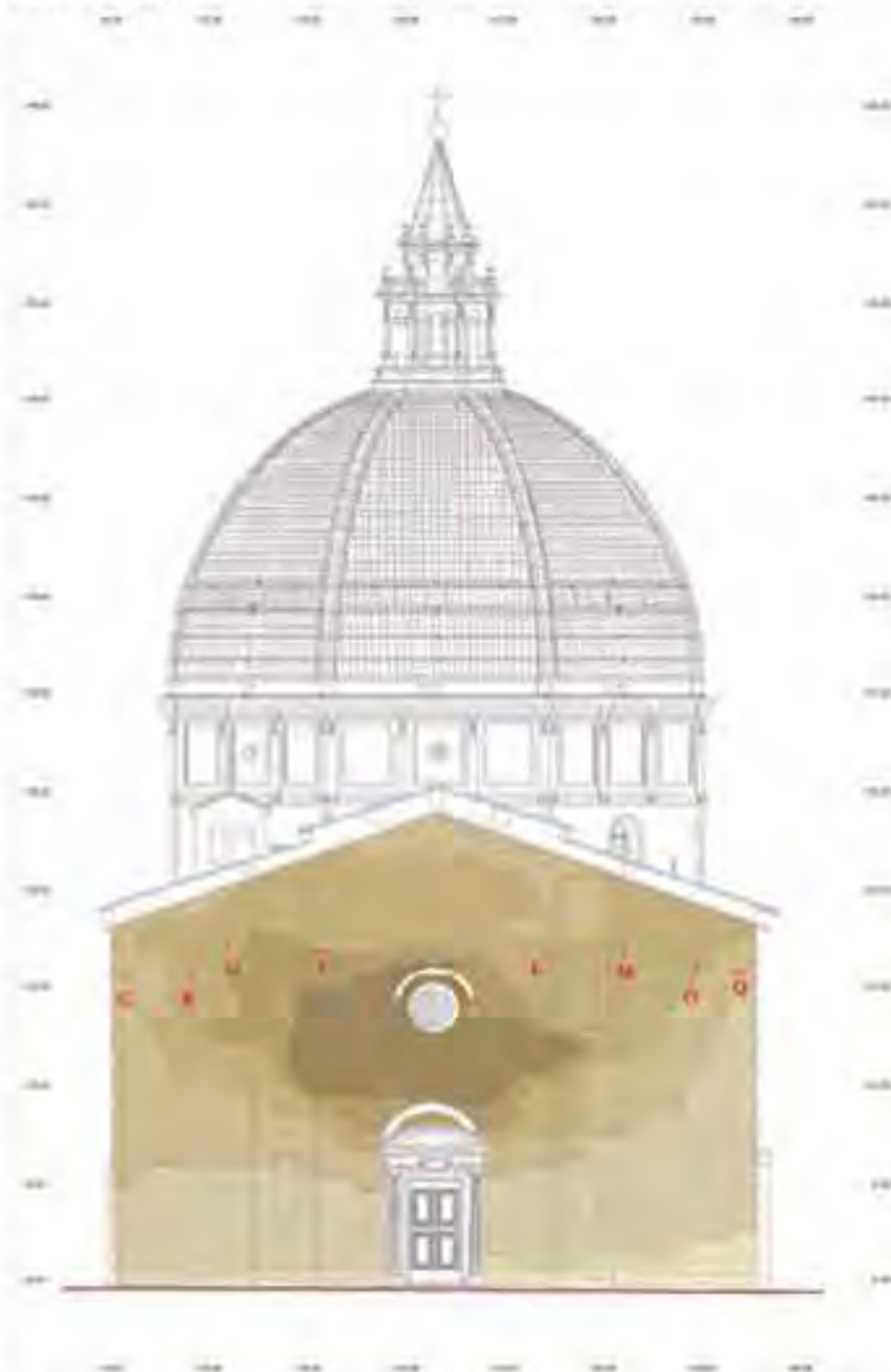


Fig. 102 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Mappa delle curve di livello, tracciate ogni 5 cm, riscontrate sulla facciata principale. E' evidente la massima deformazione in prossimità delle imposte delle volte a botte, appesantite dai carichi del cupolino

PROSPETTO EST

PROSPETTO OVEST

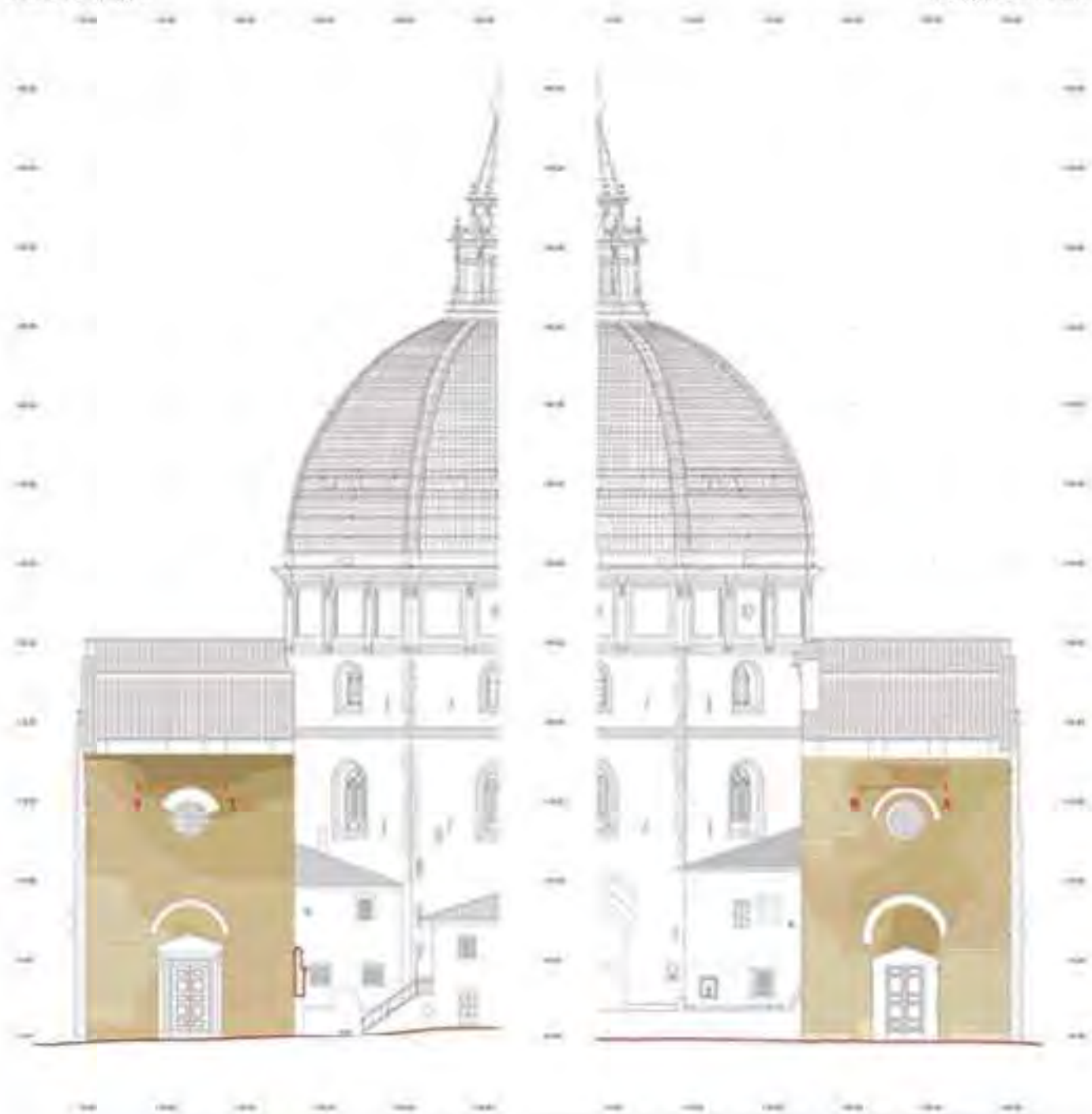


Fig. 103 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Mappa delle curve di livello, tracciate ogni 5 cm, riscontrate sulle facciate orientale e occidentale

PROSPETTO NORD

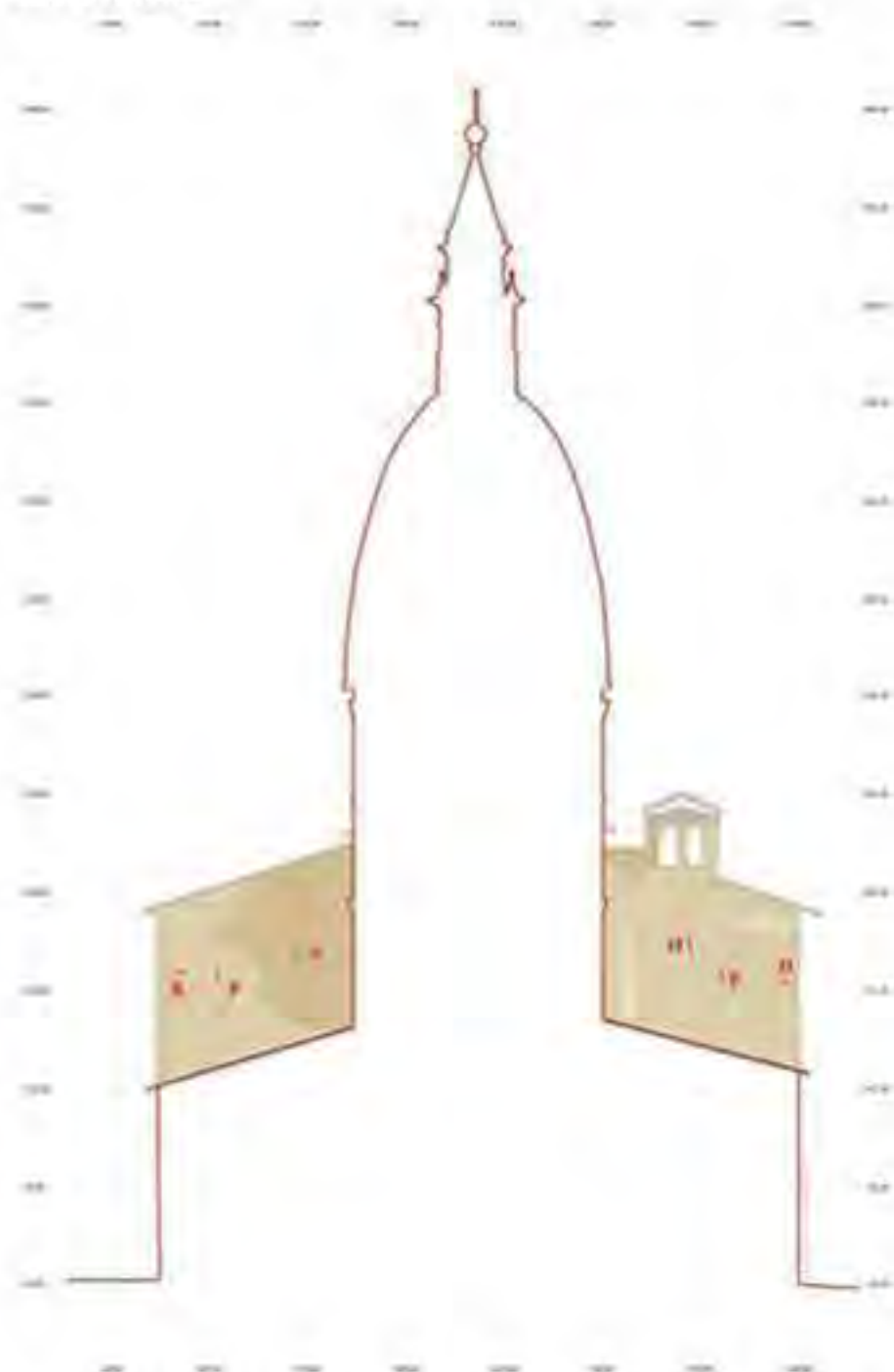


Fig. 104 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Mappa delle curve di livello, tracciate ogni 5 cm, riscontrate sulla facciata settentrionale. Come è evidente dall'elaborato grafico, non si verificano fuori piombo, probabilmente grazie all'irrigidimento dovuto all'aula ottagonale

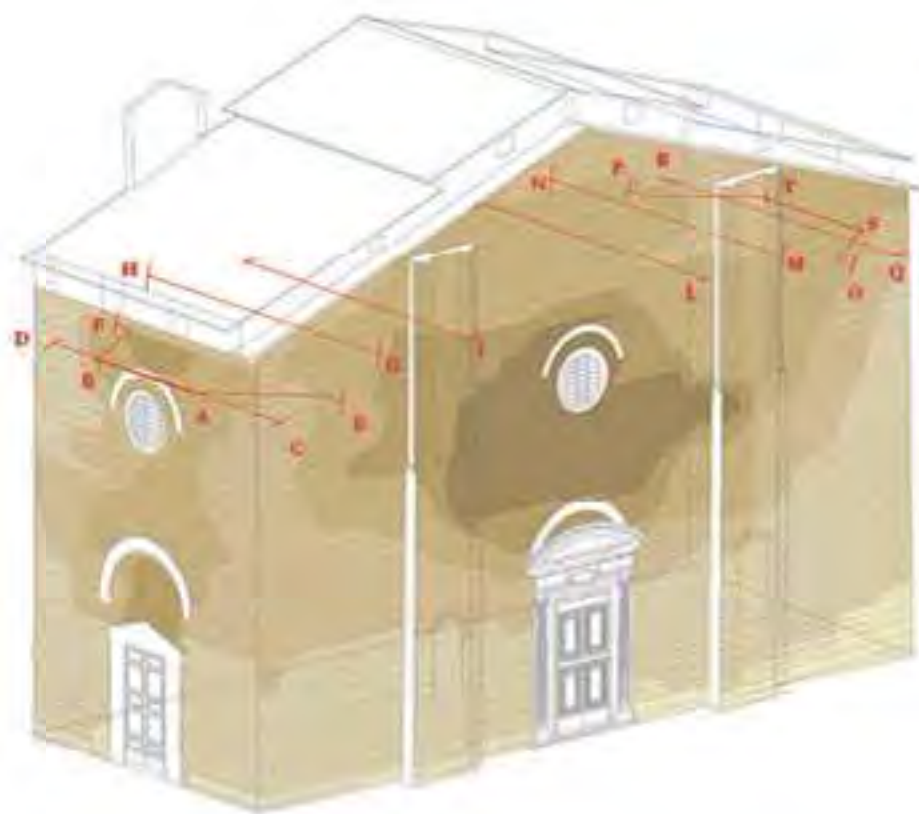
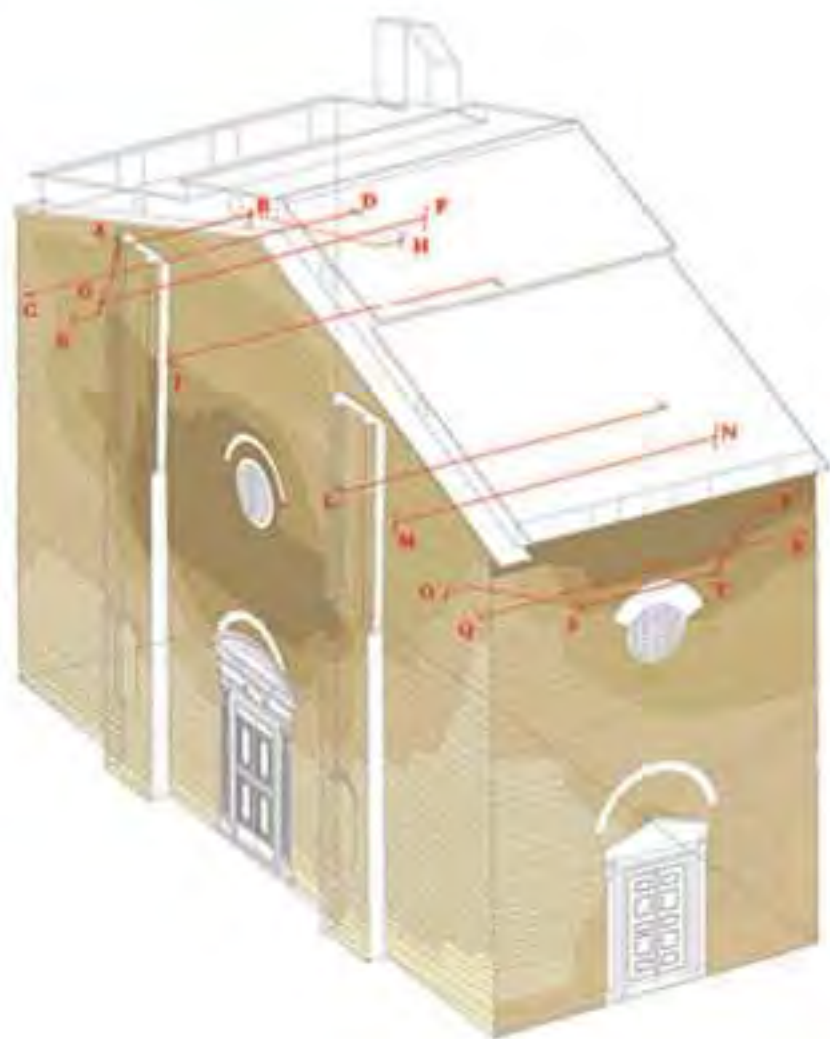


Fig. 105 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Modello 3D con la mappa delle curve di livello, tracciate ogni 5 cm. I maggiori fuori piombo si riscontrano nella facciata principale (spanciamento in prossimità della facciata principale con deformazione massima pari a circa 25 cm e, a seguire, nelle facciate orientale e occidentale con, rispettivamente, circa 25 cm e 20 cm)



Lo studio della situazione statica del monumento e dell'analisi della stabilità strutturale sono stati affidati nel 2008 al prof. Carlo Blasi (Università degli Studi di Parma, Dipartimento di ingegneria civile dell'ambiente del territorio e architettura), che ha redatto la relazione tecnica e il progetto di consolidamento. Gli elaborati grafici forniti dal rilievo tridimensionale, hanno costituito una documentazione metrica di supporto al progetto esecutivo con l'inserimento di nuove catene metalliche disposte in modo tale da formare un ragno cerchiante il cupolino e irrigidire la problematica e indebolita facciata principale (Figg. 106, 107).

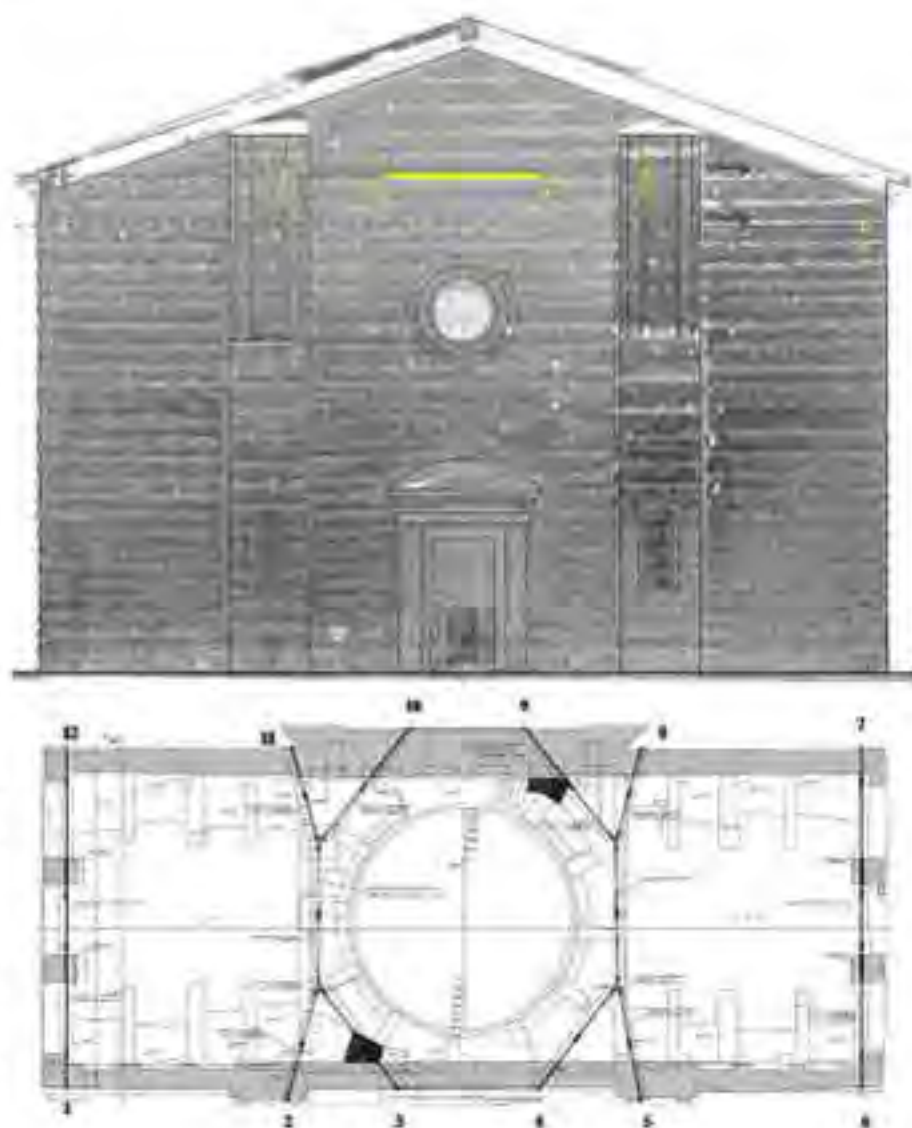


Fig. 106 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Progetto esecutivo di consolidamento, realizzato sulla base metrica degli elaborati architettonici prodotti, con l'introduzione di un nuovo sistema strutturale, a forma di ragno cerchiante il cupolino, costituito da dieci tiranti in acciaio e due nuove catene metalliche in prossimità dei prospetti est e ovest (coordinamento scientifico del prof. Carlo Blasi, Dipartimento di ingegneria civile dell'ambiente del territorio e architettura, Università degli Studi di Parma)

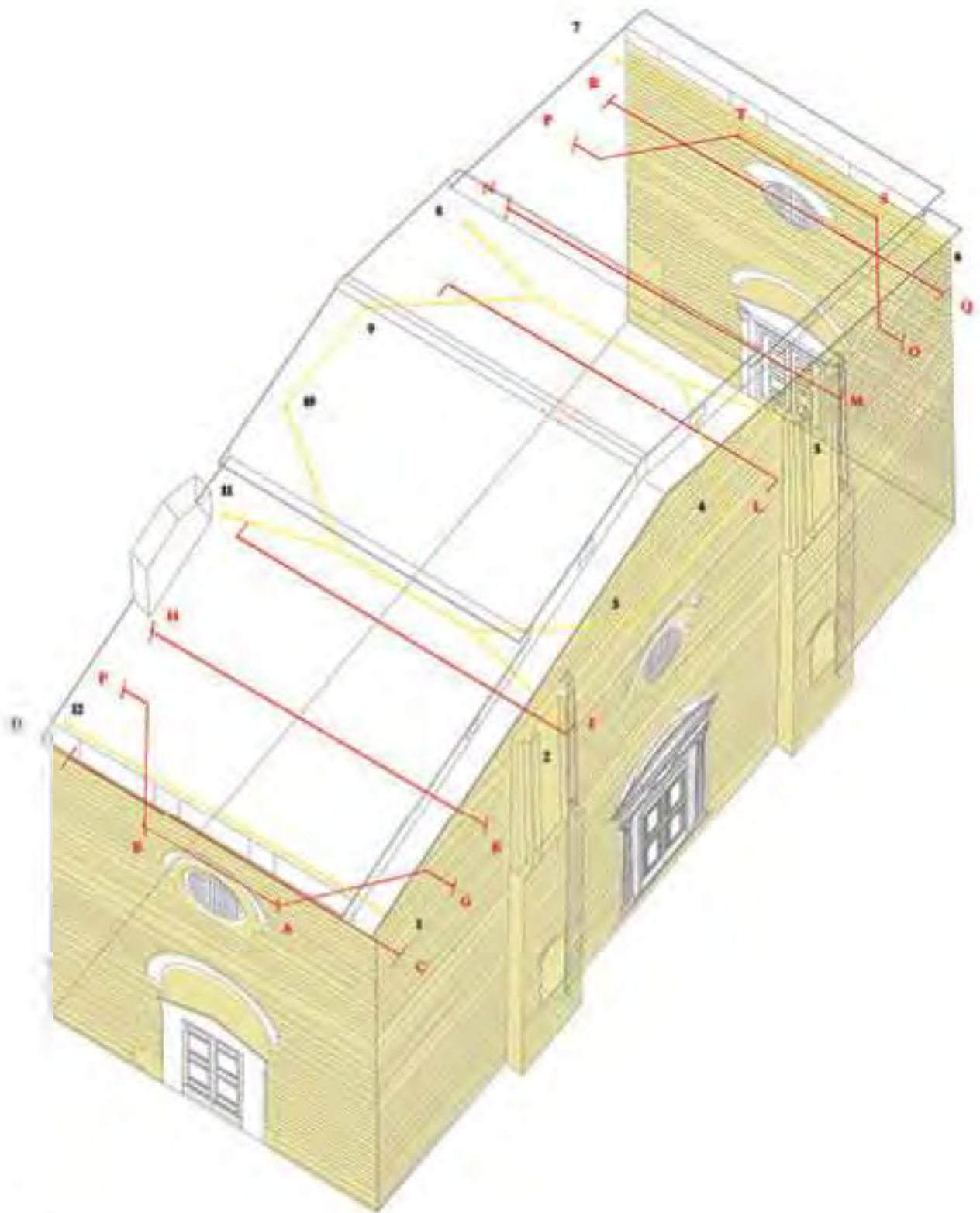


Fig. 107 - Pistoia, Basilica di Santa Maria dell'Umiltà. Vestibolo. Modello 3D con indicazione delle catene settecentesche (in rosso) e delle nuove catene metalliche progettate e realizzate dal prof. Carlo Blasi (Dipartimento di ingegneria civile dell'ambiente del territorio e architettura, Università degli Studi di Parma)



**CONOSCENZA DEI MATERIALI E DELLE TECNICHE COSTRUTTIVE
AULA VITONIANA**

L'aula ottagonale si sviluppa verticalmente nella successione di tre ordini architettonici di altezza decrescente. Al primo ordine, alto circa 11,40, corrispondono le sei cappelle laterali e la cappella maggiore; al secondo e terzo ordine, alti circa 7,50 m, corrispondono stretti percorsi anulari che dividono la struttura muraria in due gusci (figura al lato).

Per facilitare la lettura tematica, l'aula ottagonale è stata analizzata e rappresentata vela per vela, ognuna sezionata con un piano parallelo al lato e numerata in senso orario a partire dal vestibolo (Fig. 108).

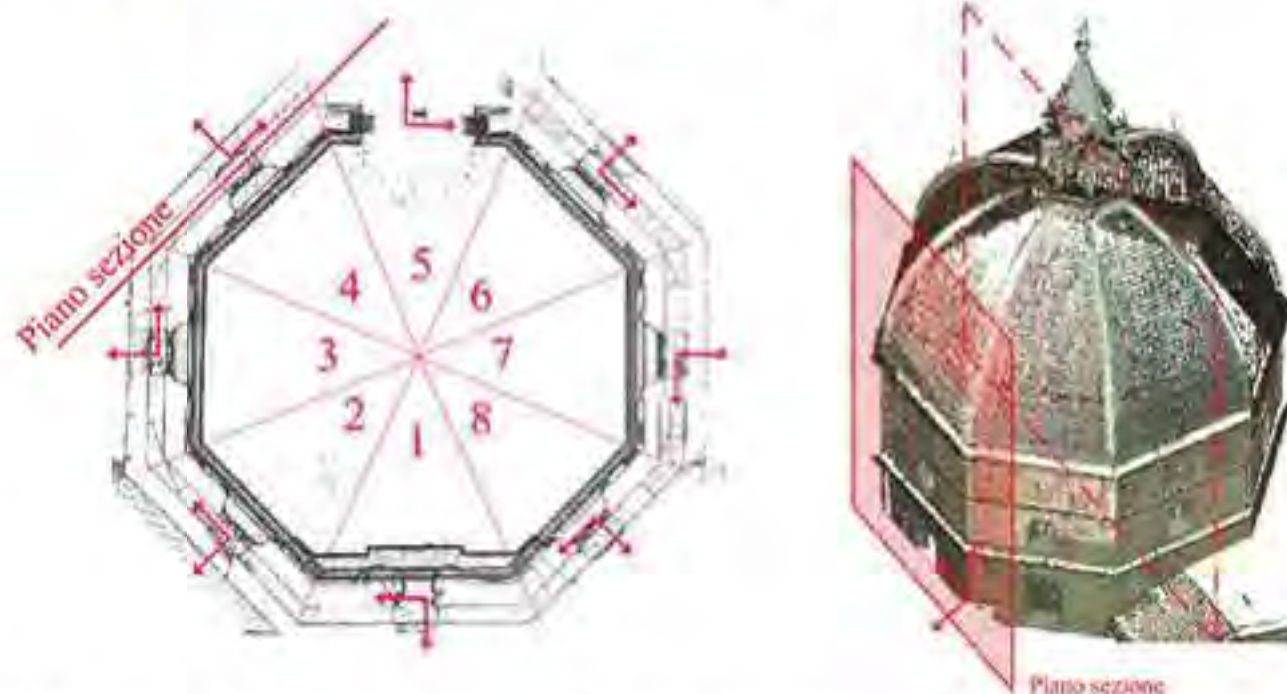
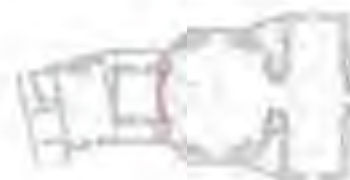


Fig. 108 - Schema sulla numerazione delle vele dell'aula ottagonale e della posizione dei piani sezione individuati per la rappresentazione

La forma ottagonale dell'aula è irregolare come evidente dal lato n. 1 più lungo di 0,5 m rispetto agli altri per dare maggior respiro all'arcone centrale. Tutte le cappelle sono incorniciate di pietra serena proveniente dalle cave di Quarrata.

Il primo camminamento è accessibile attraverso la scala a chiocciola, posta nel lato n. 8 e circoscritta in una struttura di mattoni, costituita da un pilastro centrale e da gradini aggettanti in pietra arenaria (Fig. 109).



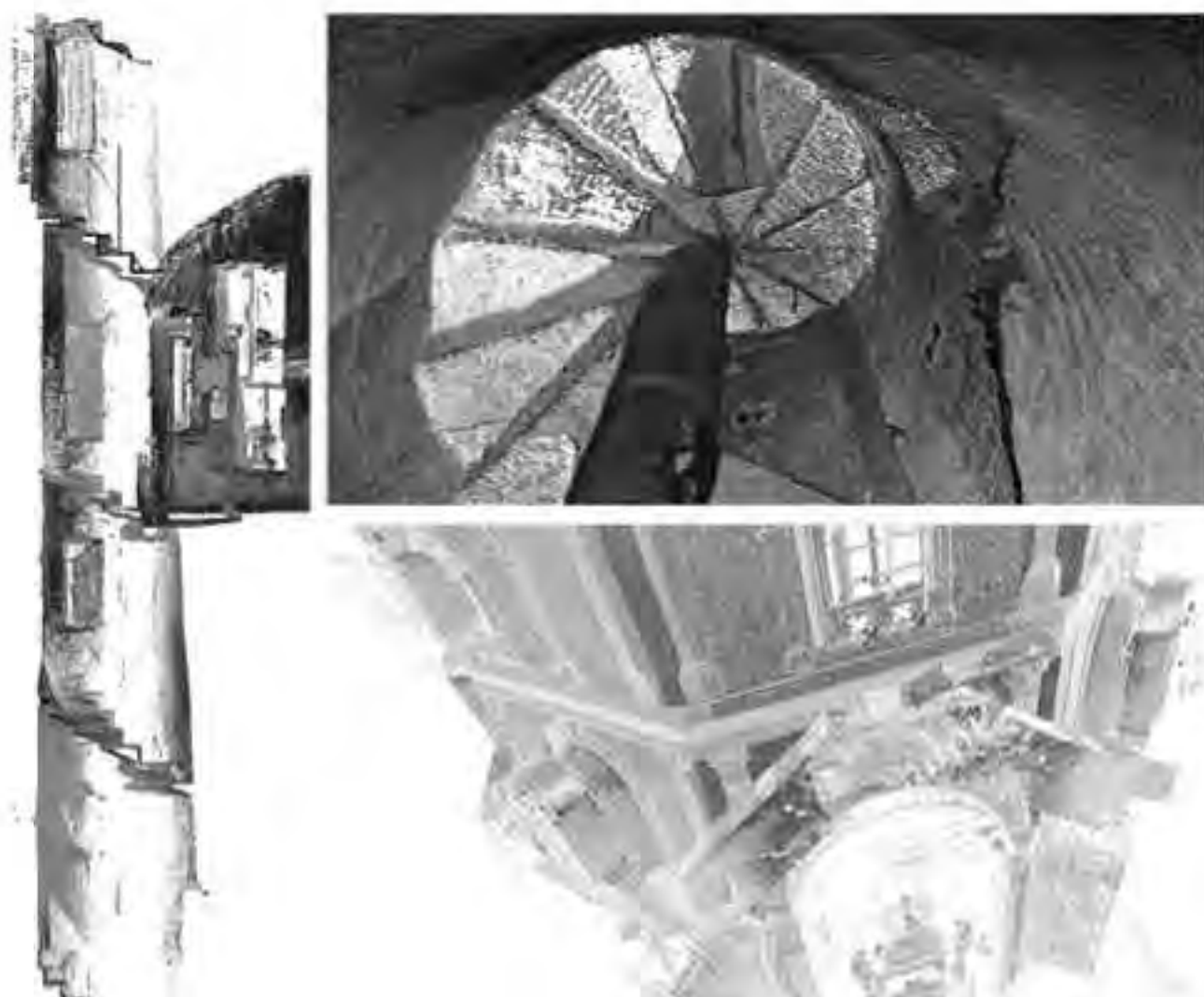


Fig. 109 - Viste 3D del modello di punti: a sinistra e in alto, la scala a chiocciola; in basso, la doppia scala lineare posta sopra l'altare maggiore

Il secondo camminamento è raggiungibile attraverso la doppia scala lineare in muratura di mattoni che si sviluppa a partire dal primo anello sopra l'altare maggiore nel lato n. 5 (Fig. 109).

La ricerca di una rappresentazione grafica esaustiva degli elementi strutturali caratterizzanti ogni vela ha prodotto la restituzione bidimensionale di entrambi i gusci attraverso i prospetti sezione delle porzioni intradossali ed estradossali. Si riportano di seguito, a titolo esemplificativo, le vele n. 5 e n. 8 contenenti la scala a chiocciola e la doppia scala lineare (Fig. 110).

[36] Rocca M., La Basilica della Madonna dell'Umiltà di Pistoia. Dalla Banca dati 3D al rilievo tematico dell'aula ottagonale e della cupola per il progetto di conservazione. Tesi di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio, Politecnico di Milano, a.a. 2011-2012. (Relatori: Cruciani Fabozzi G., Tucci G. / Correlatori: Nobile A., Tesi V.)

**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 TORRE DI SAN GIMIGNANO



Fig. 110 - A sinistra, vela n. 5 nel prospetto sezione dell'intradosso del guscio esterno; a destra, vela n. 8 nel prospetto sezione dell'estradosso del guscio interno; al centro il dettaglio delle scale (in alto, la doppia scala lineare e in basso la scala a chiocciola) [36]

Nel primo anello si aprono dodici finestre, sei nel guscio interno e sei in quello esterno. Nel secondo anello, invece, si aprono quindici finestre, di cui otto interne e sette esterne. All'interno di ciascun anello l'altezza è variabile (Fig. 111).

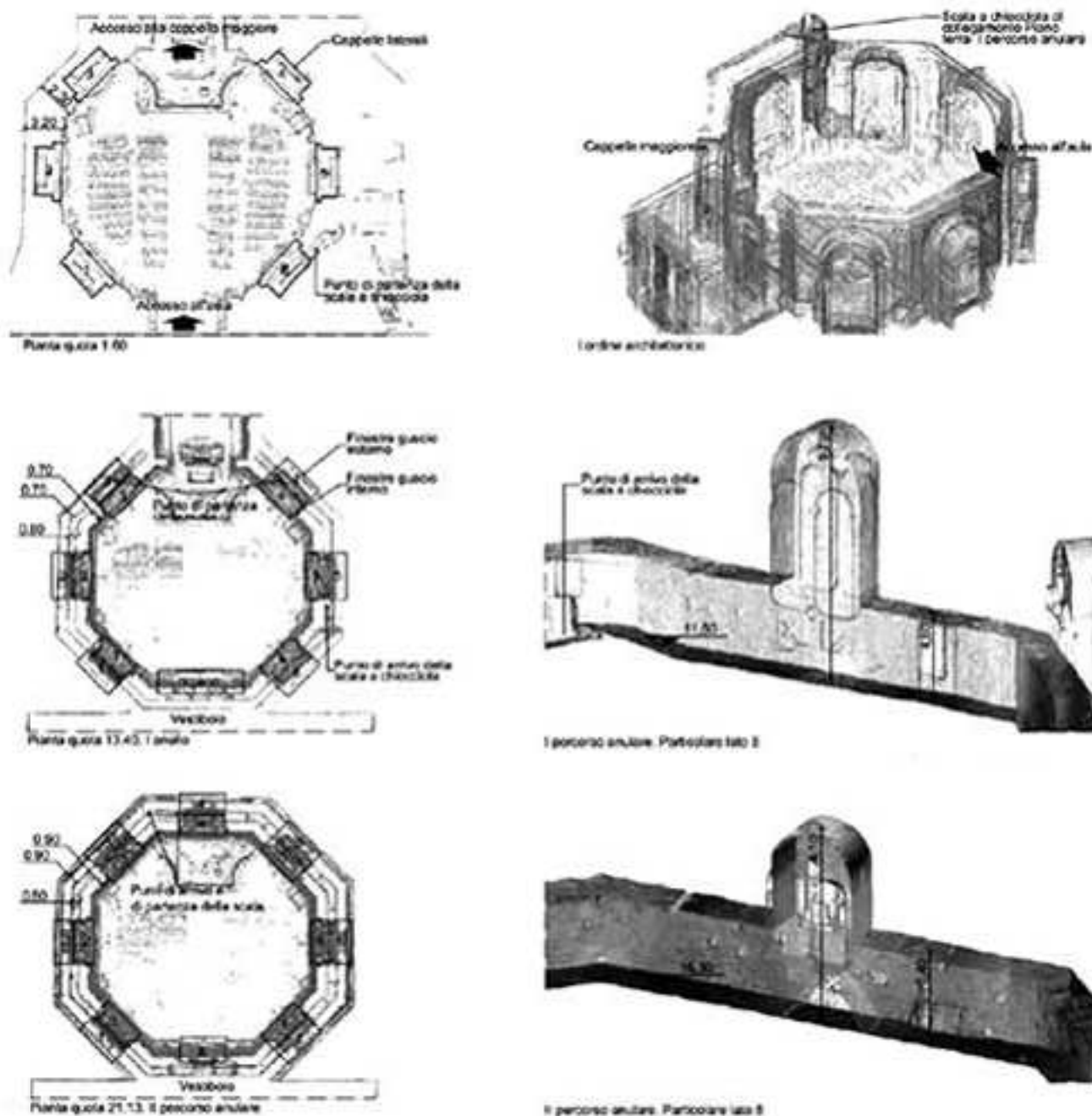


Fig. 111 - Modello di punti: a sinistra, profili sezione a quota + 1,60 m, + 13,40 m e + 21,13 m; a destra viste 3D dei primi tre ordini architettonici

Le strutture murarie dei due gusci hanno uno spessore variabile. Alla base si ha uno spessore maggiore che si assottiglia man mano che si procede verso i piani superiori (Fig. 112).

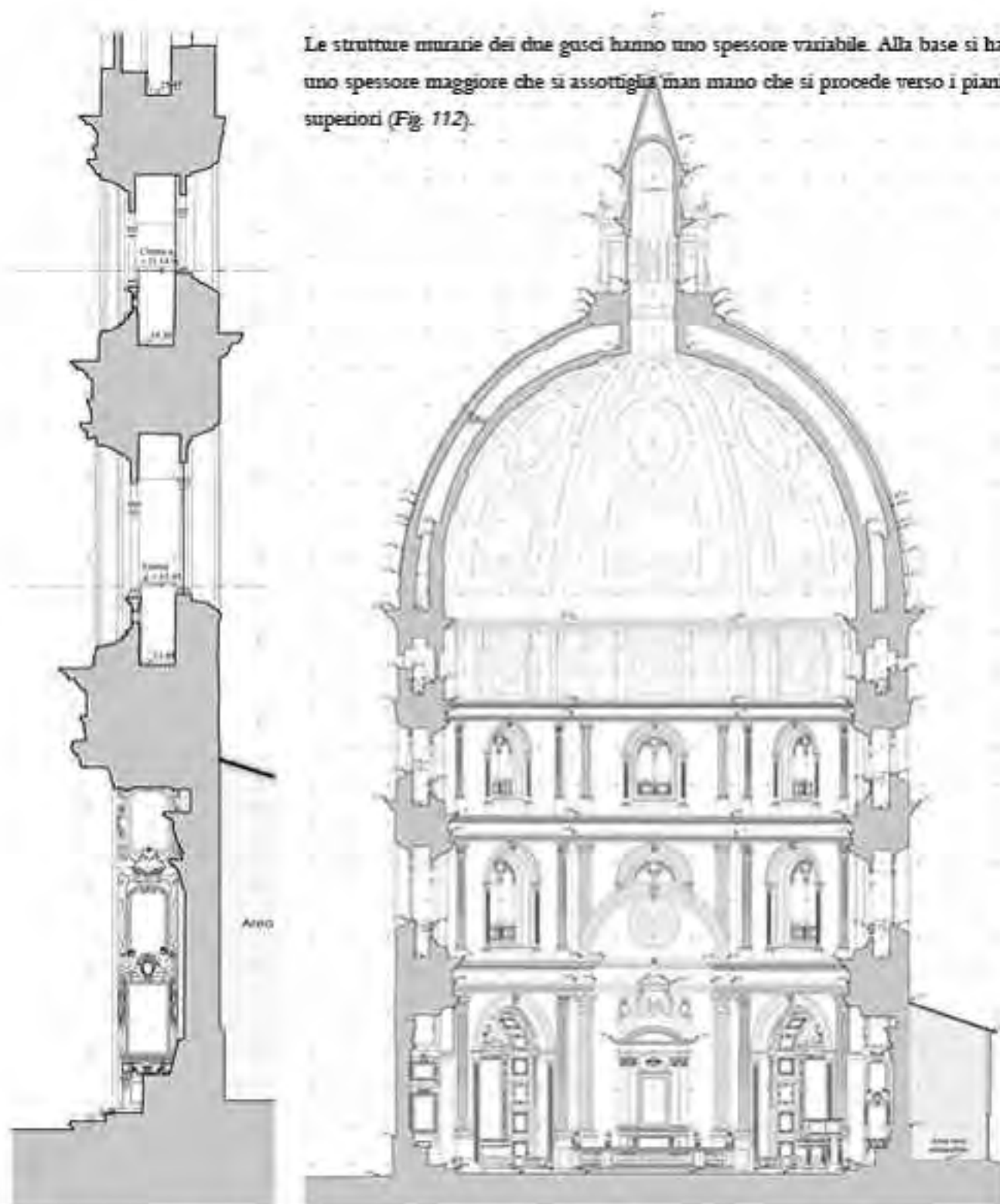


Fig. 112 - Sezione trasversale dell'aula ottagonale. Originale in scala 1:50. In alto a destra, in dettaglio i primi tre ordini architettonici

Per entrambi i gusci possiamo ipotizzare una muratura piena viste le dimensioni ridotte (difficilmente ipotizzabile a sacco).

Il guscio esterno ha un paramento esterno in ciottoli, pietra arenaria sbazzata e mattoni. Gli elementi sono apparecchiati in modo tale da non avere ripianamenti regolari. La muratura non presenta ammorsature: solo in corrispondenza degli spigoli sono inseriti blocchi di pietra arenaria di varie dimensioni a rinforzo della struttura (Figg. 113, 114).

Il paramento interno è costituito da mattoni disposti a filari orizzontali. I ricorsi di malta non sono regolari ed hanno uno spessore abbastanza grosso. L'apparecchiatura muraria è visibile dove lo strato di intonaco si è staccato.

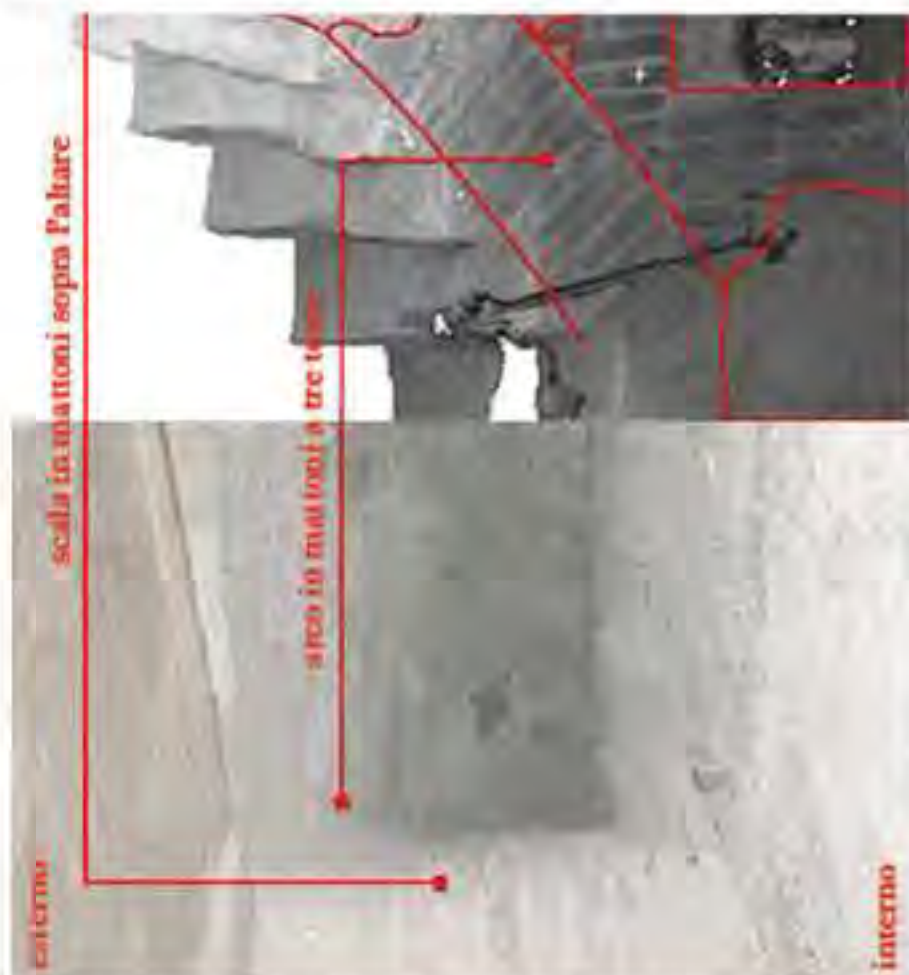


Fig. 113 - A destra, guscio esterno: in alto foto del secondo e terzo ordine architettonico; al centro, dettaglio del paramento in ciottoli, arenaria e mattoni; in basso, dettaglio degli spigoli in arenaria. A sinistra, particolare del paramento murario interno di entrambi i gusci

Sezione G-G

Prospetto su via Vitani

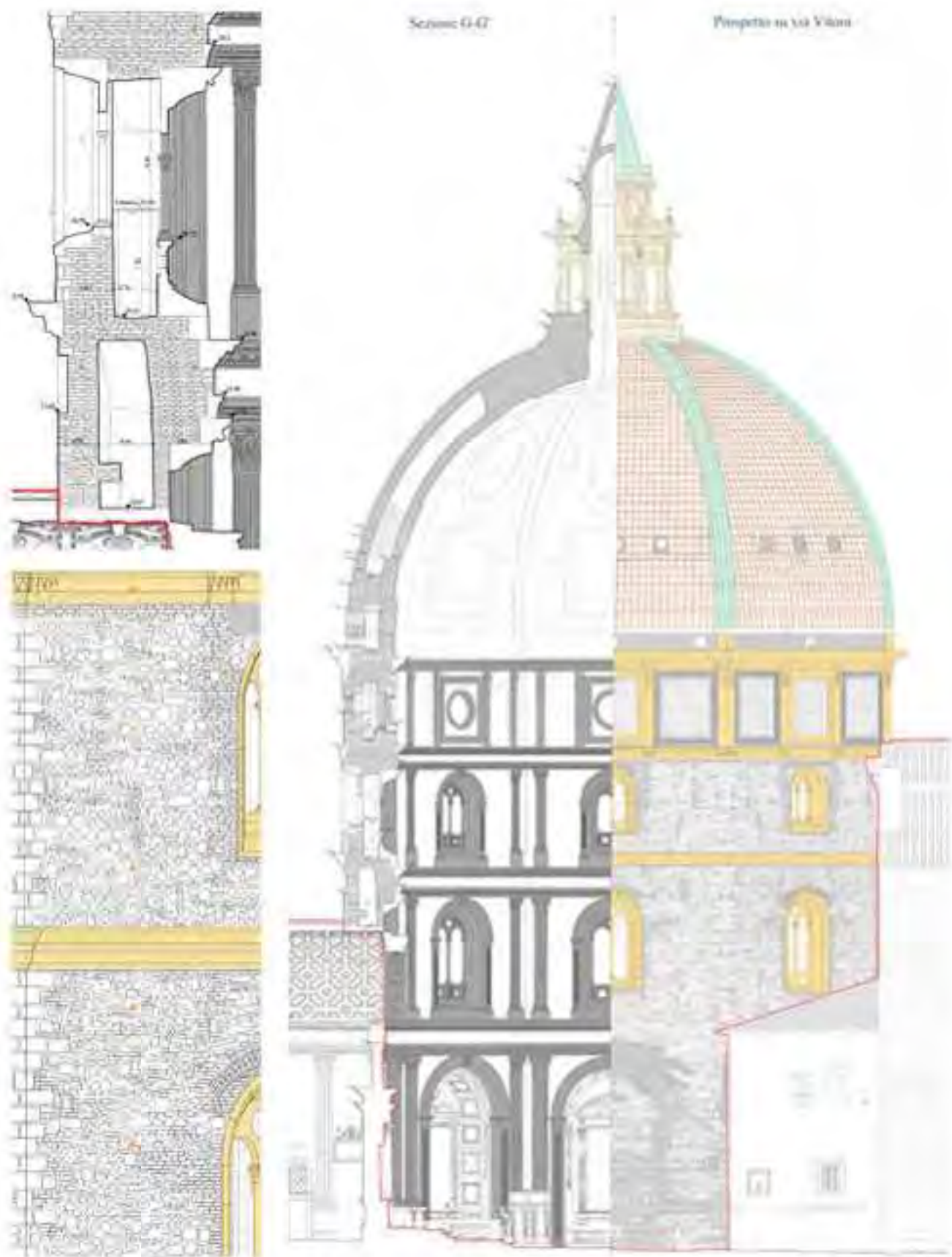


Fig. 114 - Analisi dei materiali. In alto: a sinistra, la sezione longitudinale e a destra il prospetto su via Vitani. Originale in scala 1:30. A sinistra: in alto, dettaglio della muratura piena dei due gusci; in basso, dettaglio del paramento esterno del guscio esterno [36].

ATTICO VASARIANO

L'attico vasariano rappresenta il quarto ed ultimo ordine architettonico di cui è composta l'aula ottagonale. Ha un'altezza interna di 4,50 m ed è caratterizzato, come gli anelli sottostanti, da un camminamento percorribile senza interruzioni. All'interno dell'anello le altezze sono variabili, minori lungo il percorso e maggiori in corrispondenza delle aperture (Fig. 115).

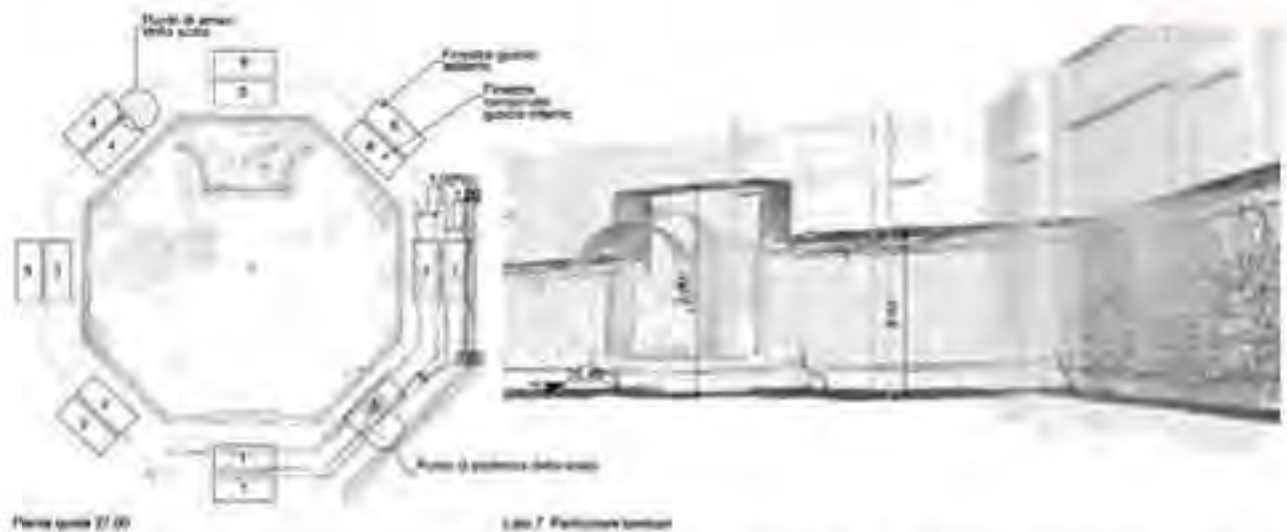


Fig. 115 - Modello di punti: a sinistra, profilo sezione a quota + 27,00 m; a destra vista 3D del camminamento interno del tamburo

L'anello è caratterizzato da aperture circolari in entrambi i gusci, di dimensioni ridotte per non indebolire la compattezza della compagine muraria.

Nel guscio interno si aprono otto finestre tamponate durante i lavori di consolidamento. Nel guscio esterno, invece, ne ritroviamo sette in quanto un lato, il n. 8, è occupato dalla scala che collega il piano del tamburo con quello dell'imposta della cupola (Figg. 115, 116).

La muratura dell'attico è interamente in mattoni apparecchiati in modo da formare una sovrapposizione orizzontale di filari (Fig. 117).

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA STUDIO DIAGNOSTICO DEI BENI CULTURALI**
DALLA SCALA EDILIZIA ALLA SCALA URBANA: I CASI STUDIO DELLA
BASILICA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA E DELLE TORRE DI SAN GIMIGNANO

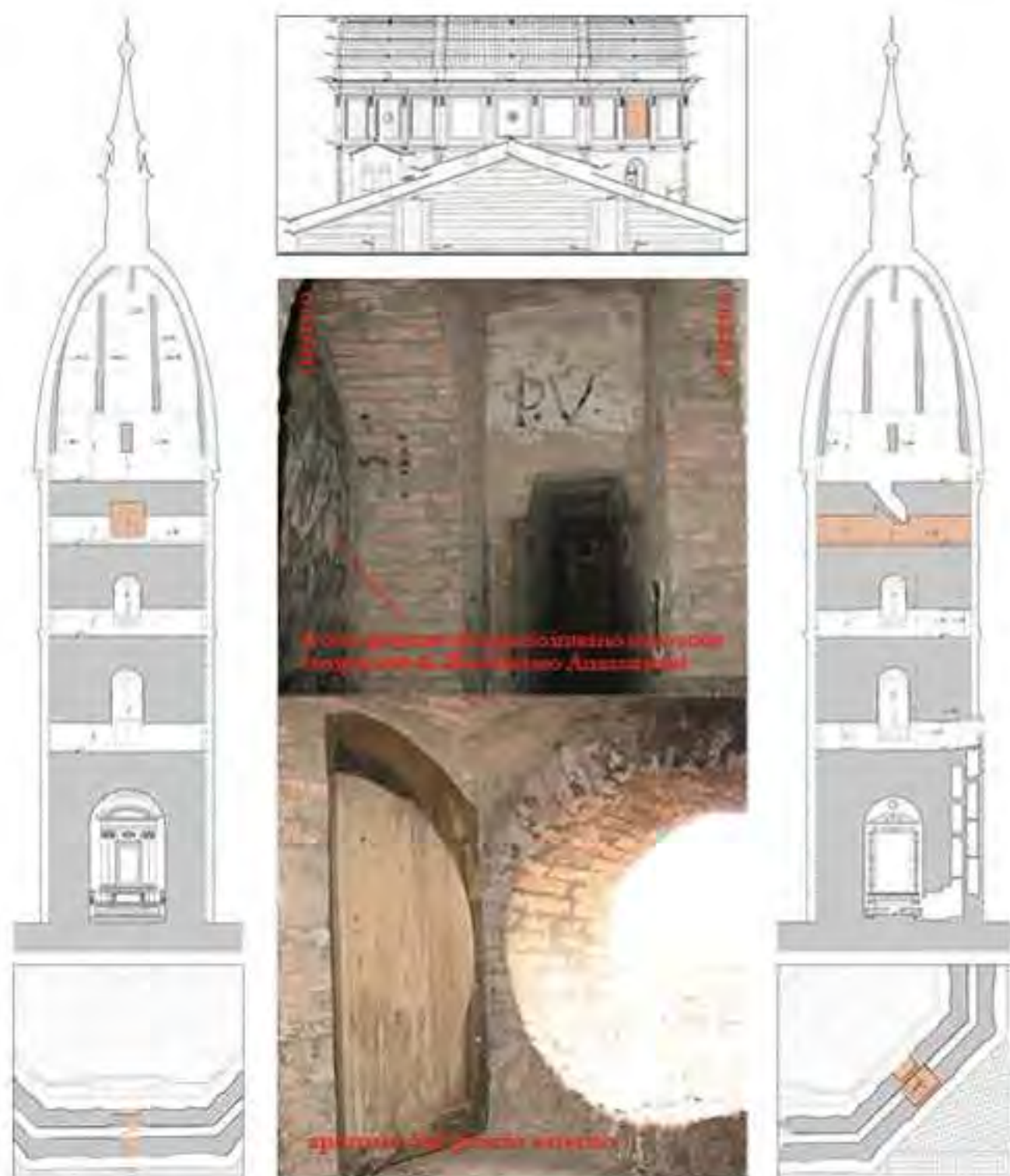


Fig. 116 - A sinistra, vela n. 1 nel prospetto sezione dell'estradosso del guscio interno; a destra, vela n. 8 nel prospetto sezione dell'estradosso del guscio interno; al centro: in alto, il prospetto su via della Madonna; in basso, il dettaglio delle finestre [36]

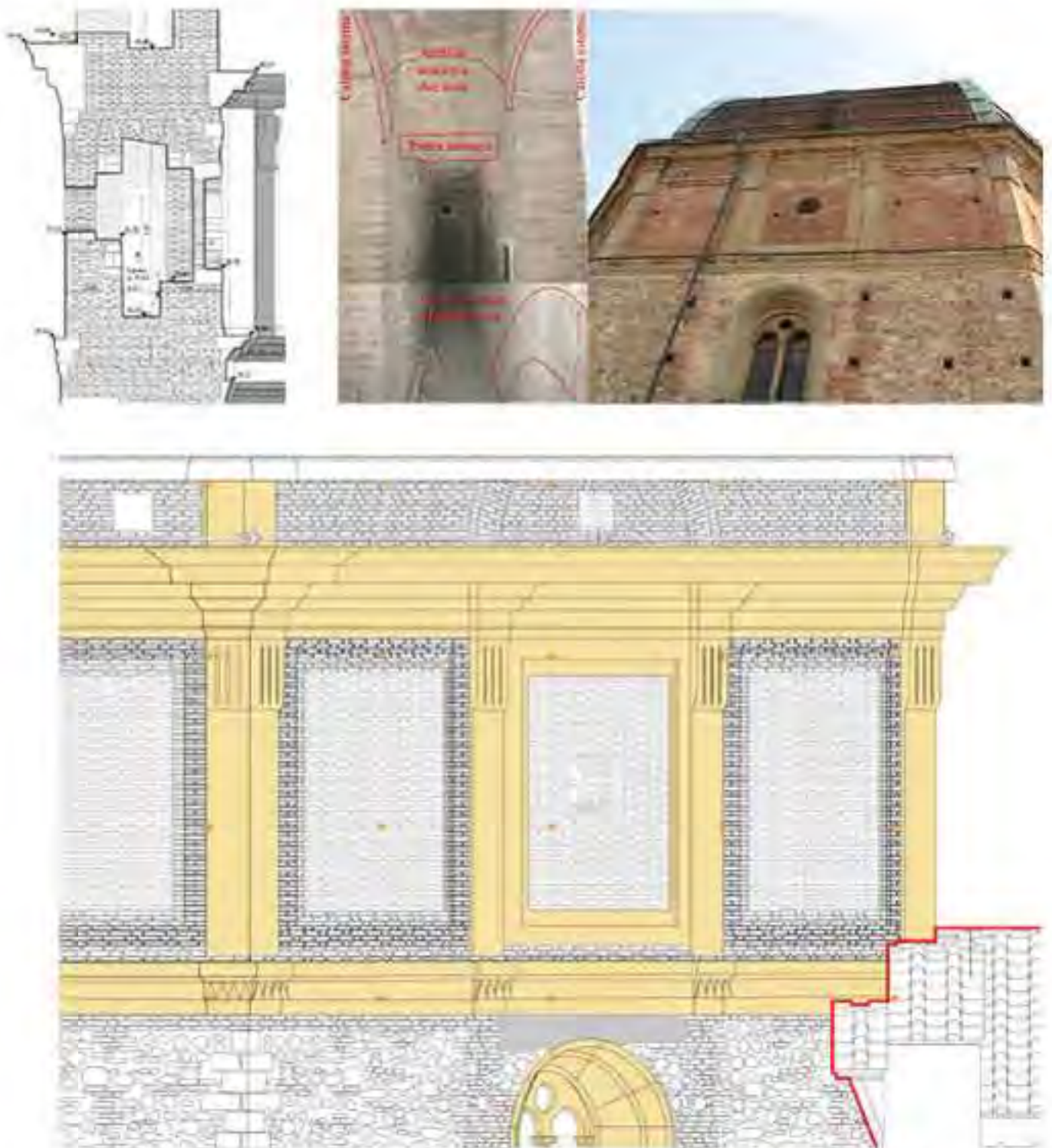


Fig. 117 - Analisi dei materiali. In alto: a sinistra, la sezione longitudinale e in basso il prospetto su via Vitoni. Originale in scala 1:30. In alto, al centro e a destra, dettaglio della muratura piena dei due gusci nel camminamento interno e nel paramento esterno [36]

CUPOLA VASARIANA

La cupola emisferica, spartita esternamente da otto costoloni rivestiti in rame ed incoronata dalle catene metalliche, afferma l'importanza architettonica della basilica pistoiese. E' costituita da una doppia calotta, interamente in muratura di mattoni, che si sviluppa lungo il prolungamento del doppio guscio sottostante. Il piano di calpestio dell'imposta ha una quota approssimativa di + 29,60 m. Le due calotte presentano due rastremazioni: + 34,20 m per la calotta interna e + 33,10 m per la calotta esterna.

I due corpi hanno una sezione muraria pressoché uguale, lo spessore è maggiore al di sotto delle rastremazioni, circa 1 m per la calotta esterna e 0,80 m per quella interna; da questo punto in poi le calotte si assottigliano gradualmente e raggiungono un minimo di 0,35 m sotto la lanterna (Fig. 118).



Fig. 118 - A destra, modello di punti del profilo sezione a quota + 31,20 m e vista ortogonale dell'estradosso della calotta interna. A sinistra, particolare della sezione longitudinale. Originale in scala 1:50.

Le due calotte sono collegate per mezzo di trentadue costoloni: otto angolari, sedici mediani e otto centrali a sostegno della lanterna. Convergono tutti verso il centro ad eccezione di quelli mediani perpendicolari invece alle due calotte. Sono costituiti da una base in pietra arenaria e dal corpo in mattoni.

Gli otto costoloni angolari si sviluppano dalla quota di circa 2 m dal piano d'imposta fino sotto alla lanterna (Fig. 119).

Legenda	
ca	Costoloni angolari
cl	Costoloni lanterna
cm	Costoloni mediani

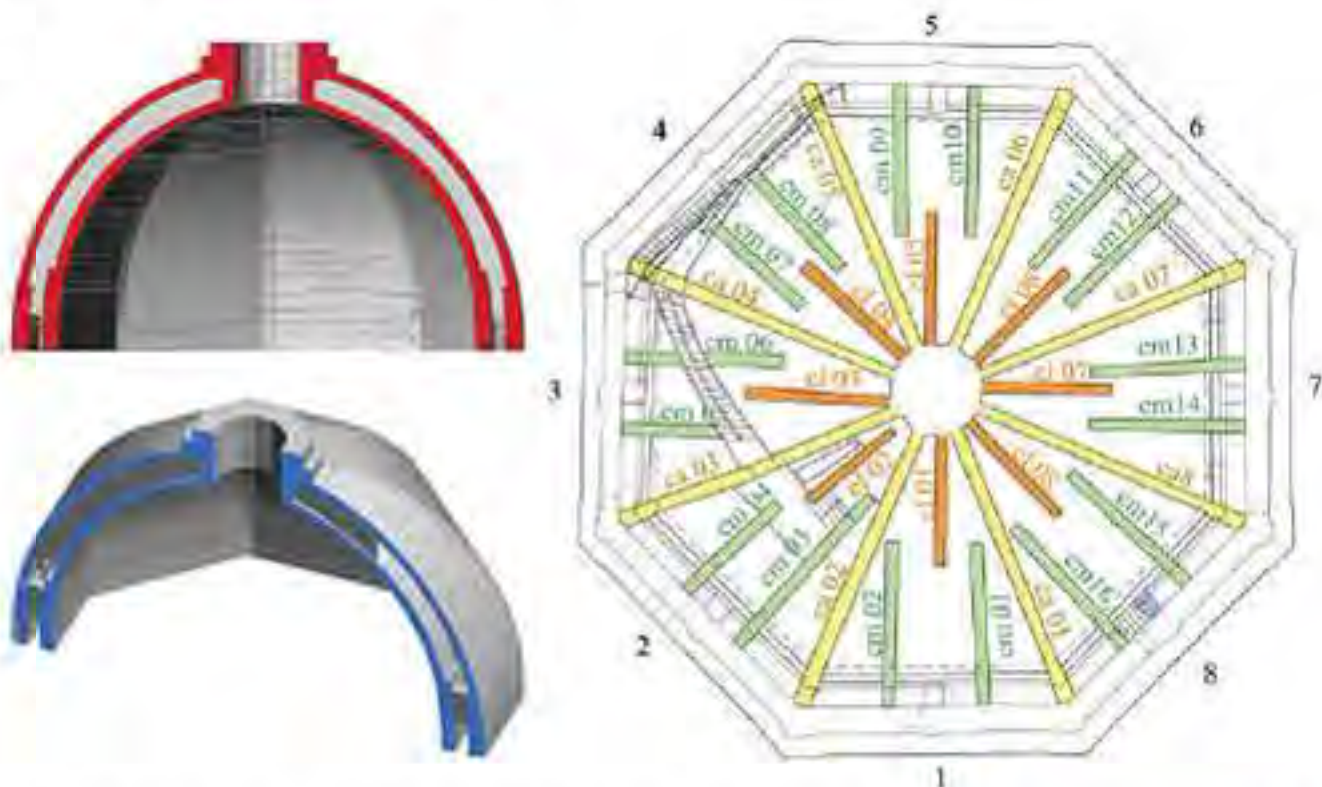


Fig. 119 - In alto: a sinistra, modello di superficie 3D sezionato lungo la diagonale (in alto) e lungo la mediana verticale (in basso); a destra, schema strutturale dei costoloni. Al lato, foto del costolone angolare del lato n. 7 [modello 3D, 36]

I sedici costoloni mediani, due per ogni vela, si sviluppano dalla rastremazione della calotta interna fino alla quota di circa + 42,60 m. Poggiano su due mensole in mattoni (Figg. 119, 120).

Gli otto costoloni centrali, a sostegno della lanterna, si sviluppano dalla sommità della cupola fino alla quota in cui si arrestano i costoloni mediani. La disposizione e la tecnica costruttiva differente portano ad ipotizzare che siano stati aggiunti in un periodo successivo (Relazione del 1620 di Jacopo Leffi, [27]).





Un ulteriore collegamento dei due gusci è garantito da sette setti murari (Fig. 121). Si sviluppano dalla quota di circa 2 m dal piano d'imposta (come i costoloni angolari) fino alla quota della rastremazione della calotta esterna e scaricano il loro peso su un arco a quattro teste dello spessore pari a quello del guscio esterno (Fig. 122).



Fig. 121 - A destra, modello di superficie del sistema strutturale della cupola privata del guscio esterno (in alto visto 3D; in basso, da sinistra: estradosso della calotta interna, estradosso della calotta interna con elementi strutturali, intradosso della calotta esterna). A sinistra, dall'alto: foto del costolone mediano del lato n. 6, foto del costolone centrale del lato n. 3 e foto del setto murario del lato n. 7 [36]

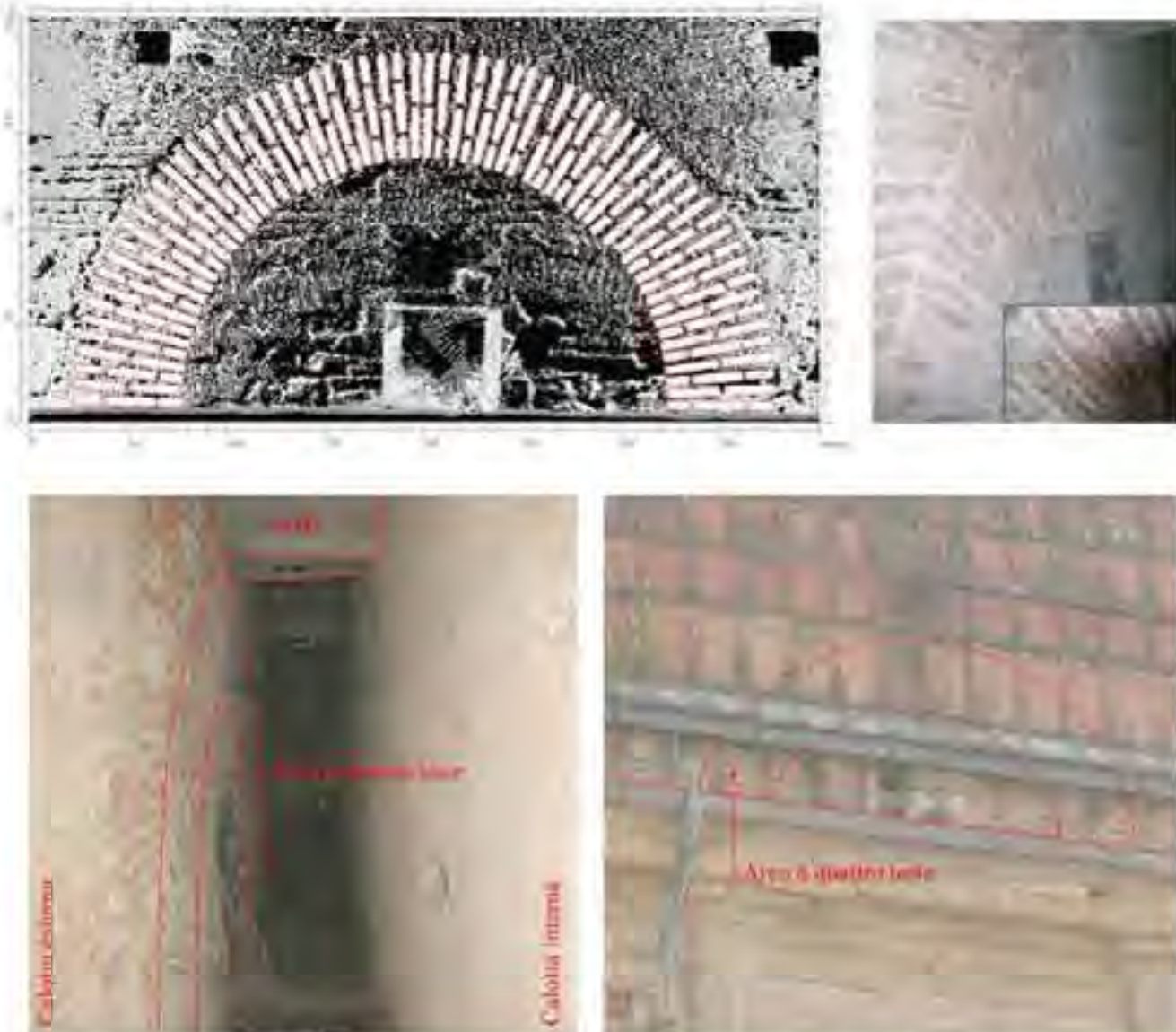


Fig. 122 - Particolare dell'arco di scarico collocato nella mezzeria del lato. In alto, vista ortogonale del modello di punti con restituzione vettoriale dei mattoni dell'arco; in basso foto dell'intradosso e dell'estradosso del guscio esterno. E' evidente che l'arco occupa interamente lo spessore della calotta esterna

I letti di posa dei laterizi, nei costoloni e nel paramento murario dell'intercapedine (Figg. 123, 124), sono ad assise orizzontale con una debole inclinazione, inferiore ai $20^\circ - 25^\circ$, anche in sommità. La sagoma a tutto sesto è ottenuta per approssimazione attraverso l'aggetto di una fila di mattoni rispetto a quella inferiore. Il fenomeno è particolarmente evidente in sommità dove l'aggetto raggiunge i di 4 - 5 cm [38].

[37] Relazione di Jacopo Lapi, Architetto Firenze, opera la Cupola Grande della Chiesa della Madonna dell'Umiltà della Città Antichissima di Fiesole, Firenze, Biblioteca Nazionale Centrale, fondo Rossi Carrigoli, un. misc. 335

[36] Tosetti U., Esoli L., Calosci M. Sulle condizioni statiche della cupola della Madonna dell'Umiltà di Pistoia: storia di una costruzione non propriamente brunelleschiana, in Andreini A., Gori M. (a cura di), *Atti delle giornate di studio "Centenario del miracolo della Madonna dell'Umiltà a Pistoia"*, Pistoia 5-26 maggio 1992, Pistoia, Società Pistoiese di Storia Patria, 1992, pp. 87-110

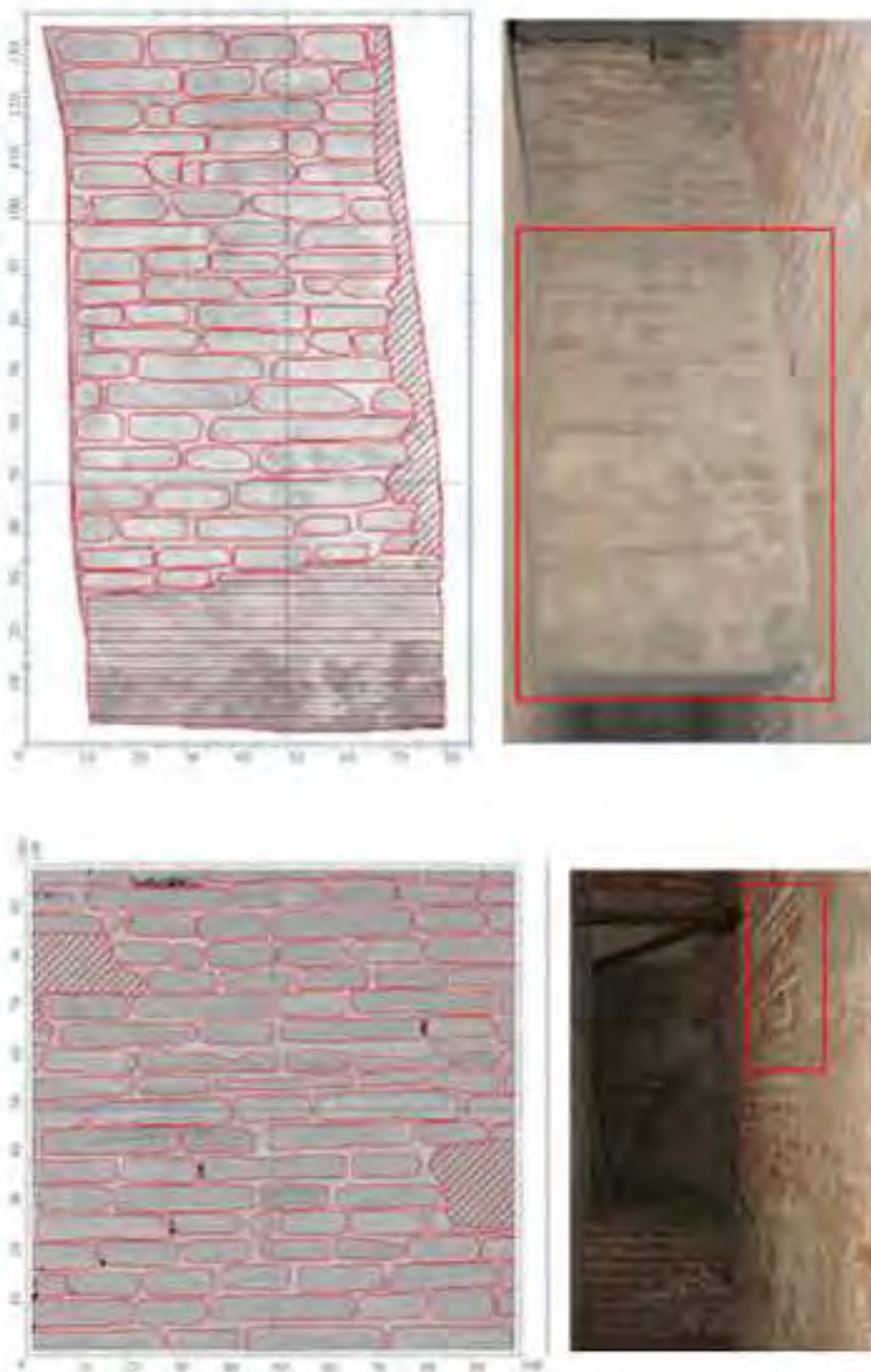


Fig. 123 - Particolare della muratura: in alto setto murario, in basso intradasso della calotta esterna. A sinistra, vista ortogonale del modello di punti con restituzione vettoriale dell'apparecchiatura muraria; a destra, foto di riferimento [36]

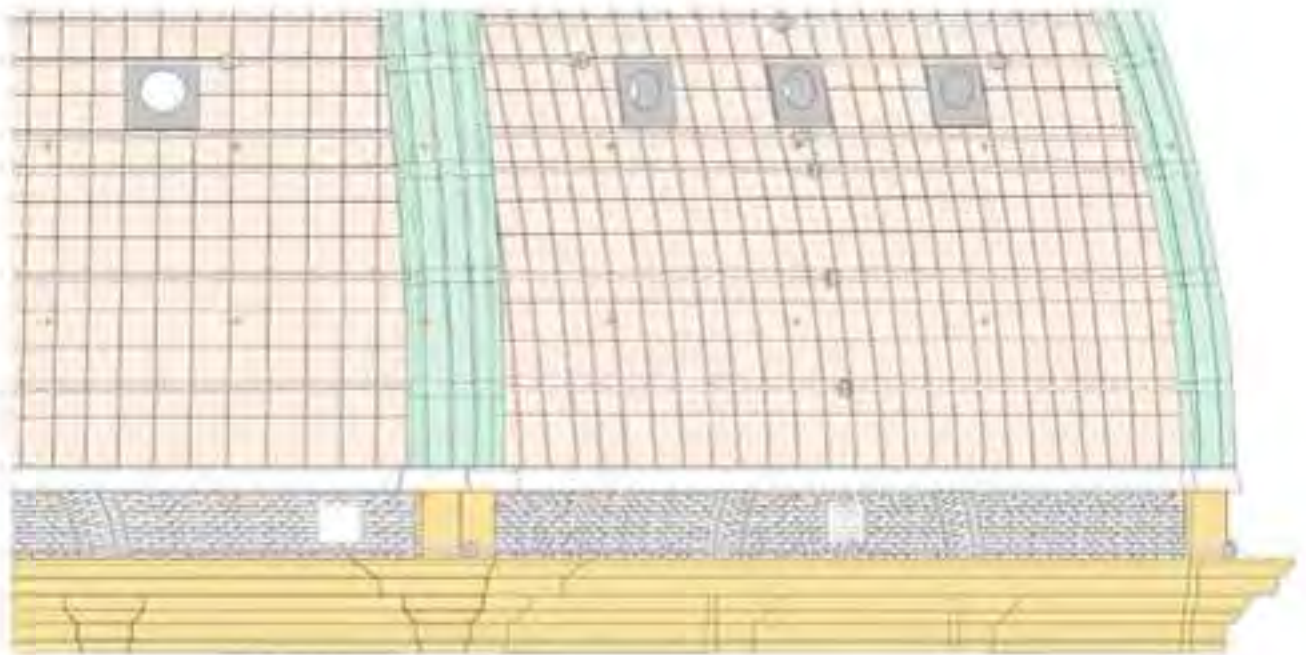


Fig. 124 - Analisi dei materiali. In alto, prospetto su via Vittoni; in basso, a sinistra, sezione longitudinale. Originale in scala 1:50. In basso, a destra, foto della cupola [36]



Fig. 125 - Cupola di Santa Maria dell'Umiltà di Pistoia. Particolare di uno spigolo: in alto, tra vele adiacenti e in basso, tra vela e costolone. E' evidente la mancanza di ammorsamento

ANALISI DELLA TECNICA COSTRUTTIVA DELLA CUPOLA

Jacopo Lafri, nella sua *Relazione del 1620* [37], è il primo ad indagare la tecnica costruttiva della cupola vasariana:

Le calotte sono male manipolate; perché ora si muovono a terzo alto, ora a semicircolo; poi ritornano a terzo acuto, e così vanno ondeggiando, poi per altro terzo che sono gli angoli dei costoloni della cupola di fuori vanno serpenti in modo che si viene a false intersecazioni.

Egli attribuisce i dissesti della cupola alla qualità scadente dei mattoni (di estrazione fluviale e non mineraria) e alla mediocre tecnica costruttiva (mancanza di ammorsamento tra le vele, tra le vele e i costoloni e tra i due gusci, Fig. 125), probabilmente causata dalla incostante presenza del Vasari sul cantiere.

I mattoni usati, per le vele e per i costoloni, hanno misure variabili nello spessore e nella lunghezza. La posa in opera è approssimativa ed i ricorsi di malta sono irregolari e spessi (superiore al centimetro).

Più tardi, nel 1753, anche Giovan Battista Nelli con i suoi *Discorsi di architettura* [39] ne indaga la tecnica costruttiva prendendo come riferimento quella della cupola brunelleschiana, svelata nel suo funzionamento costruttivo e strutturale da una vasta letteratura.

La tecnica costruttiva della cupola del duomo di Firenze si basa sulla disposizione dei mattoni a "corde blande", ossia i letti di posa seguono una curva aperta verso l'alto (detta corda blanda) e non una giacitura orizzontale (Figg. 126, 127).

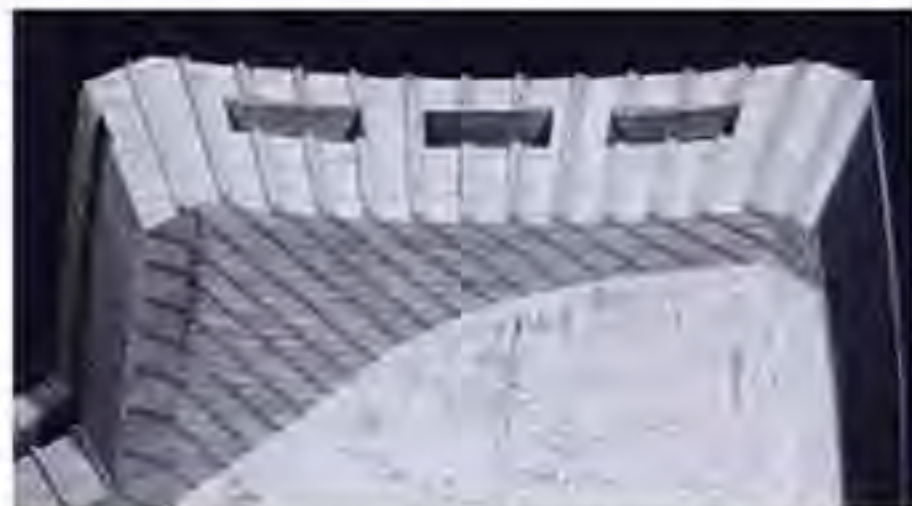


Fig. 126 - Cupola di Santa Maria del Fiore di Firenze. Ricostruzione dei letti di posa dei mattoni che generano coniche con concavità rivolta verso l'alto

[39] Nelli G. B., *Discorsi di Architettura*, Firenze, Per gli eredi Paperini, 1753

[40] Corazzi R., Conti G., *Il segreto della cupola del Brunelleschi a Firenze*, Firenze, Pontecorboli Editore, 2011

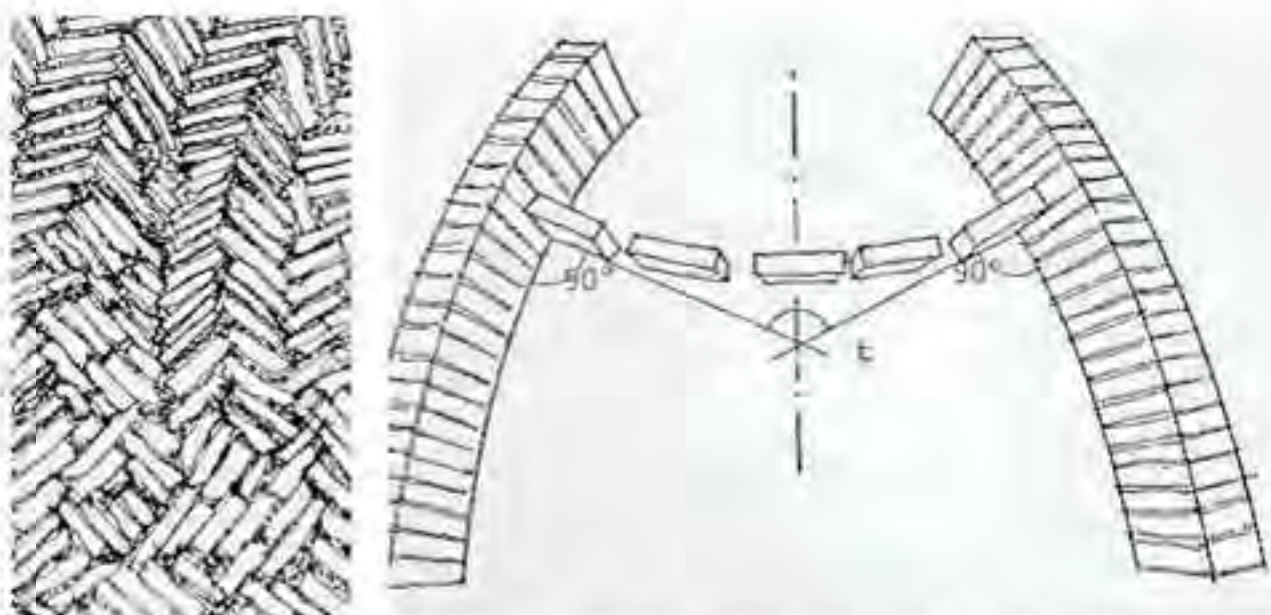


Fig. 127 - Cupola di Santa Maria del Fiore di Firenze. Disposizione dei mattoni a corda blanda. A sinistra, particolare dell'estradosso della vela esterna (rilievo FO.ART.); a destra, schema nel quale si evince che anche i mattoni dei costoloni formano angoli di 90° [40, pp. 58, 59].

La massima inclinazione dei corsi di mattoni risulta di poco superiore ai 60° [37], contro i $20 - 25^\circ$ di quella della cupola pisanesca (Fig. 128).

Secondo l'interpretazione di Salvatore di Pasquale le corde blande sono il risultato dell'intersezione di "coni costruttivi" (di rotazione) con la superficie cilindrica delle vele; Si ottiene, conseguentemente, una cupola simile a quella di rotazione, con letti di posa leggermente curvati verso il basso. In questo modo le superfici di posa di due qualsiasi vele adiacenti formano, nel loro insieme, un'unica superficie appartenente ad un cono circolare con asse verticale coincidente con l'asse centrale della cupola e vertice rivolto verso il basso (Fig. 129). Le corde blande assolvono quindi alla funzione di realizzare, per due qualsiasi vele contigue, superfici di posa dei mattoni prive di discontinuità dei piani tangenti sugli spigoli. Questa disposizione, assieme all'impiego di mattoni angolari negli spigoli (Fig. 130), assicura una tessitura dell'ordito murario esente di discontinuità lungo tutto l'anello e quindi non si creano zone deboli in corrispondenza degli sproni angolari, fondamentali per la stabilità della cupola [40].

L'unico inconveniente di questa tecnica costruttiva è che al crescere della costruzione i mattoni si inclinano sempre di più (Fig. 131); per evitare un loro



Fig. 128 - Cupola di Santa Maria del Fiore di Firenze. Centri di curvatura dei profili angolari e giacitura dei mattoni [40, pp. 118, 124].

**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 TORRE DI SAN GIMIGNANO

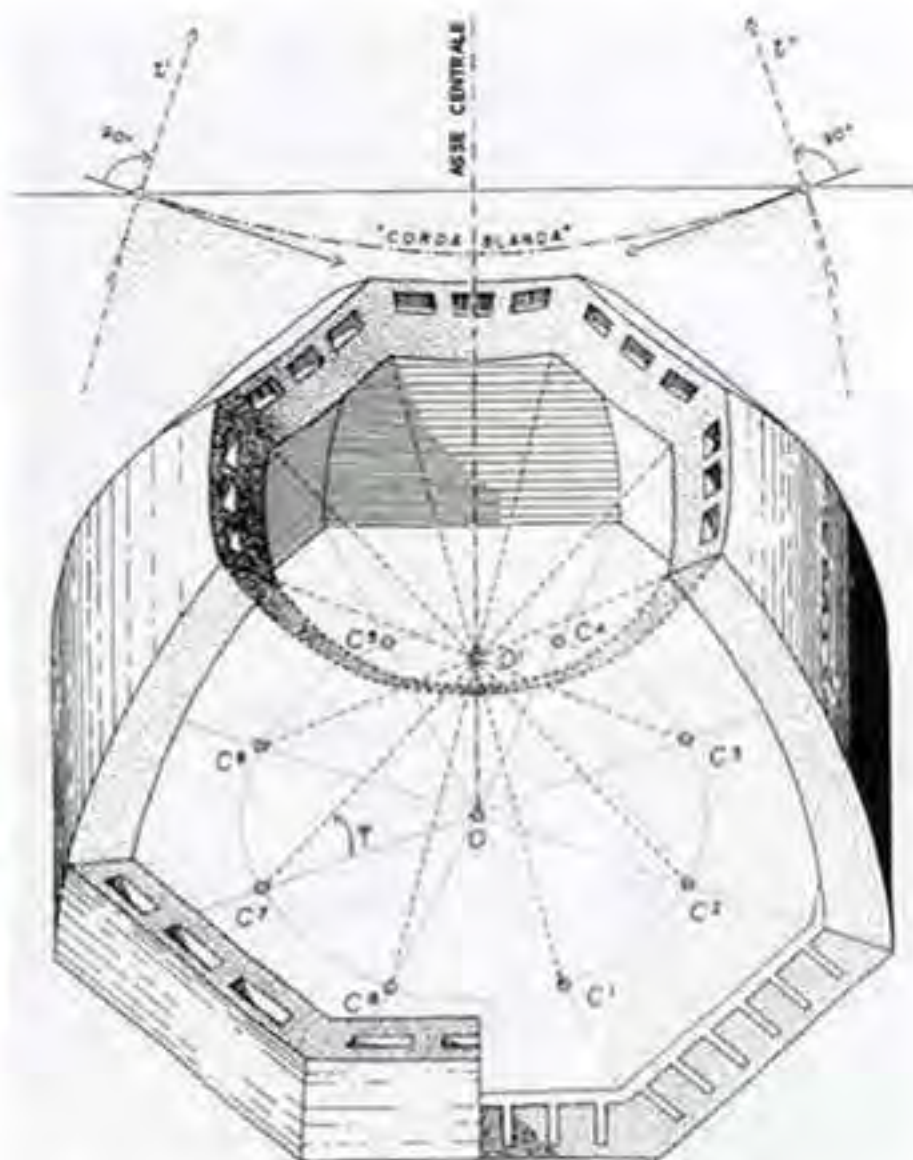
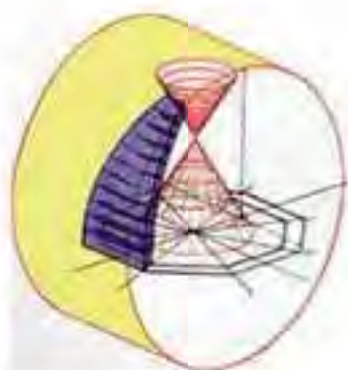


Fig. 129 - Cupola di Santa Maria del Fiore di Firenze. In alto, spaccato assonometrico del tracciato della corda blanda (Disegno di L. Ippolito e C. Perani) [40, p. 125]

Fig. 130 - Cupola di Santa Maria del Fiore di Firenze. A sinistra, in alto, schema assonometrico del tracciato della corda blanda [40, p. 56]; al centro, modello in vetro resina di una porzione di uno spigolo (in evidenza i mattoni angolari); in basso, rappresentazione grafica [40, p. 135]

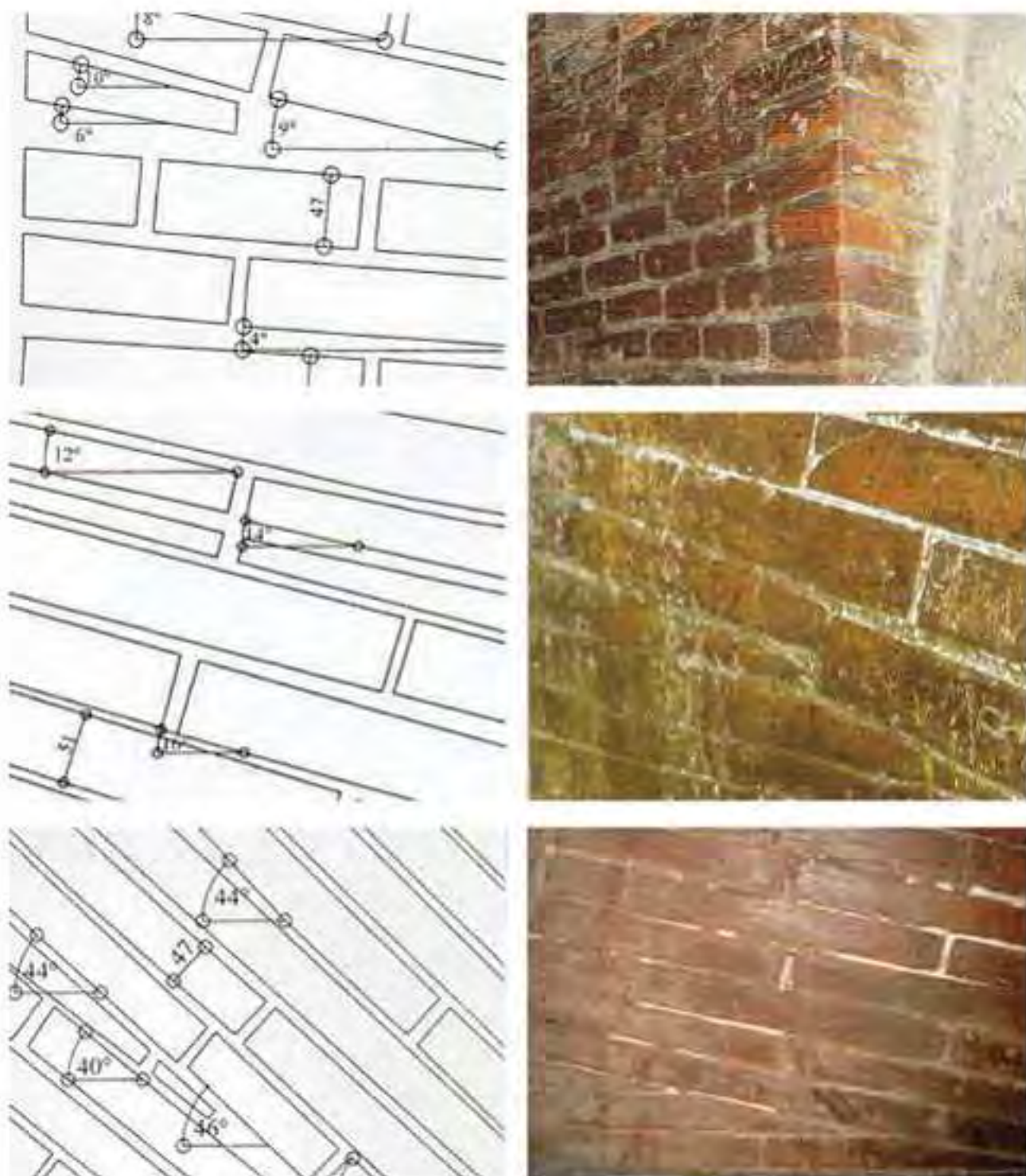


Fig. 131 - Cupola di Santa Maria del Fiore di Firenze. Inclinazione dei mattoni: a sinistra, la rappresentazione grafica e a destra, la foto. Dall'alto, particolare del primo camminamento (quota + 63,60 m), del secondo camminamento (quota + 70,45 m) e del terzo camminamento (quota + 79,15 m) [40, pp. 130-132]

scivolamento verso il basso, prima dell'indurimento della malta vengono disposti ad intervalli regolari alcuni mattoni per coltello (a "spinapesce") [40].

Il Vasari, invece, pur ispirandosi chiaramente all'opera del Brunelleschi nella struttura a doppia calotta, nell'impostazione della lanterna e nella discontinuità cromatica tra i costoloni lapidei e le vele rivestite in laterizio, adotta una tecnica costruttiva diversa, approssimativa e priva di accorgimenti particolari, tale da indurre un risultato totalmente differente nonostante le dimensioni ridotte (circa 1/8): 2.800 tonnellate per la cupola dell'Umiltà contro le 24.000 tonnellate della cupola di S. Maria del Fiore [38, 40].

Il modello vasariano denota, dal punto di vista strutturale, una grande analogia con il battistero fiorentino nel parallelismo dei costoloni mediani alle vele (Fig. 132); mentre, dal punto di vista formale, si ispira alla cupola emisferica michelangiolesca di S. Pietro. A quest'ultima, tra l'altro, la lega lo stesso destino di problemi statici immediati e preoccupanti dopo la sua conclusione [38].

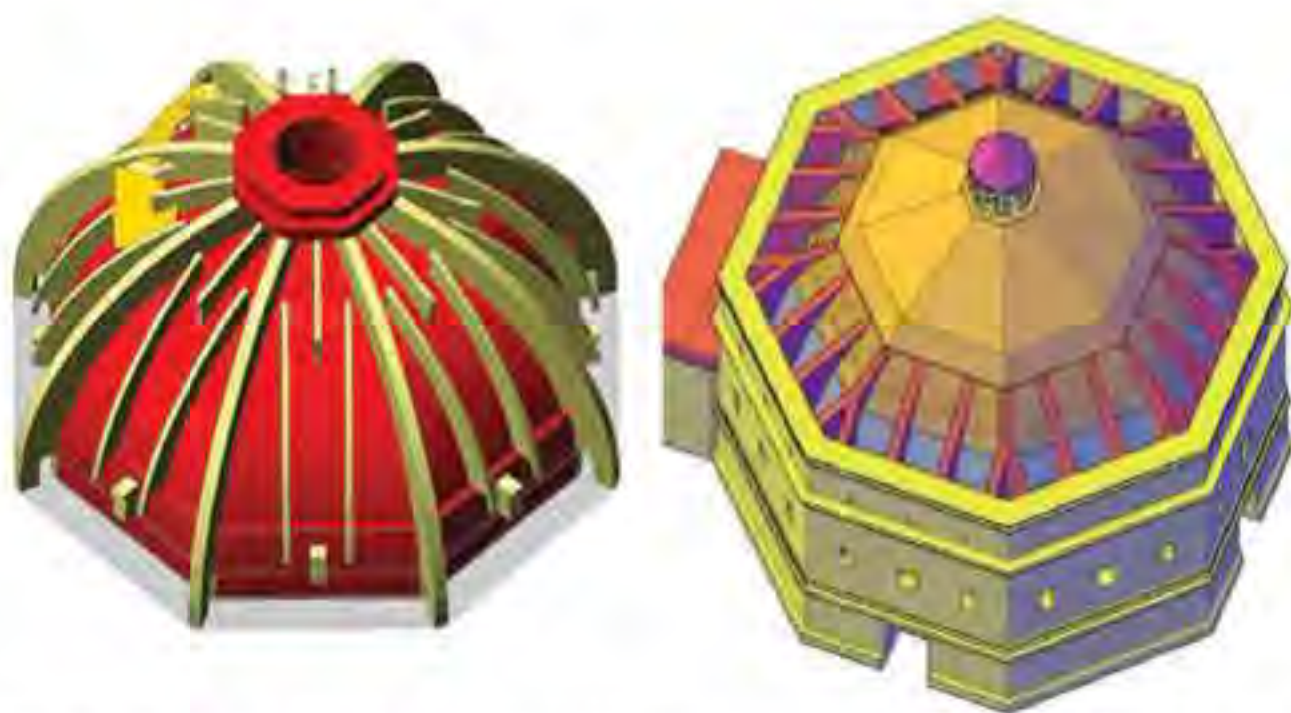


Fig. 132 - A sinistra, cupola della Basilica dell'Umiltà di Pistoia (elaborazione grafica a cura dell'arch. M. Riemma). A destra, cupola del Battistero di San Giovanni di Firenze (elaborazione grafica a cura dell'ing. M. Betti). Sono evidenti le analogie tra le due strutture sia nel parallelismo dei costoloni mediani alle vele.

IL QUADRO FESSURATIVO DELLA CUPOLA

Le due calotte sono interessate da due gruppi di lesioni:

- il primo dipende dal debole collegamento tra le vele;
- il secondo dal debole collegamento tra i gusci.

Il primo gruppo corre prevalentemente lungo gli spigoli in entrambi i gusci (Figg. 134, 135). I filari di mattoni, apparecchiati su piani orizzontali, producono intersezioni negli spigoli dell'ottagono secondo angoli diedri minori di 180° (Fig. 133) determinando, con l'impossibilità effettiva di incardinamento, una sorta di frattura precostituita e, di conseguenza, una linea di notevole debolezza e di limitata affidabilità laddove, invece, avrebbe dovuto esserci una maggiore consistenza statica [40].

Le cupole sono generalmente soggette ad un doppio regime di sollecitazioni: uno sforzo di compressione sui meridiani e uno sforzo di trazione sui paralleli, maggiore in prossimità dell'imposta. Nel caso della cupola pistoiese, non essendo verificata la solidarietà strutturale, è sufficiente una modesta componente di trazione per creare giunti di separazione negli spigoli delle vele.

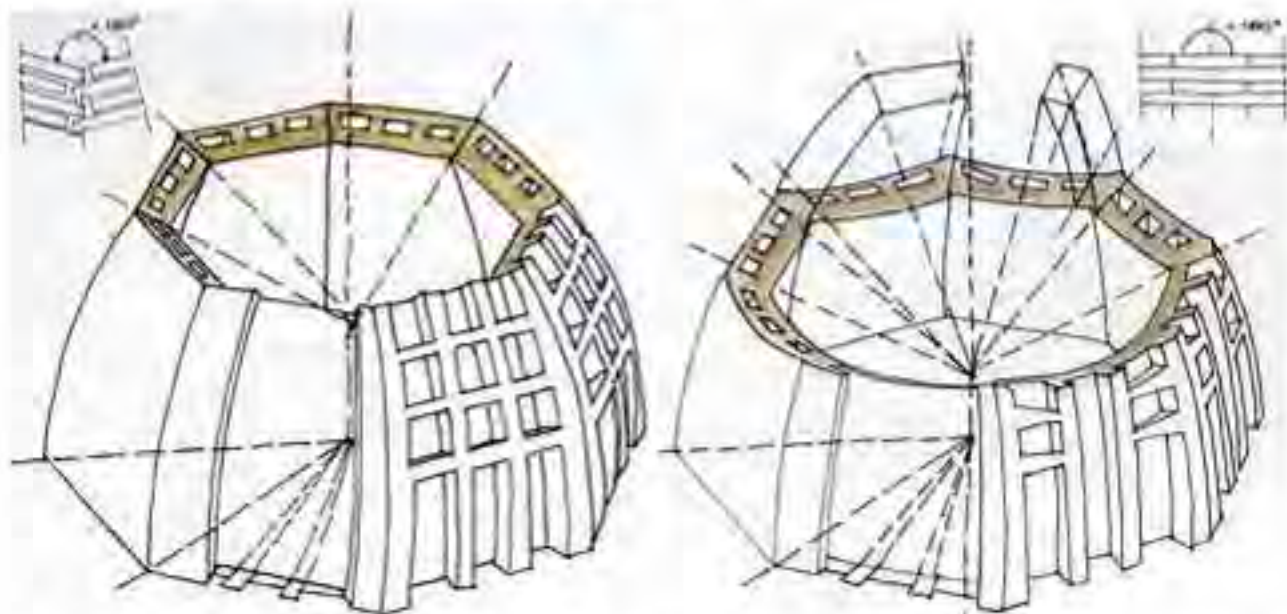


Fig. 133 - Cupola di Santa Maria del Fiore di Firenze. Disegni di Paolo Alberto Rossi. A sinistra, ipotesi costruttiva a filari orizzontali (i letti di posa formano un angolo diedro tra le vele minore di 180° impedendo l'ammorsamento); a destra, ipotesi costruttiva a filari a corda blanda (i letti di posa formano un angolo diedro tra le vele di 180° garantendo un raccordo continuo) [37, p. 170].

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA STUDIO DIAGNOSTICO DEI BENI CULTURALI**
DALLA SCALA EDILIZIA ALLA SCALA URBANA: I CASI STUDIO DELLA
BASILICA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA E DELLE TORRE DI SAN GIMIGNANO

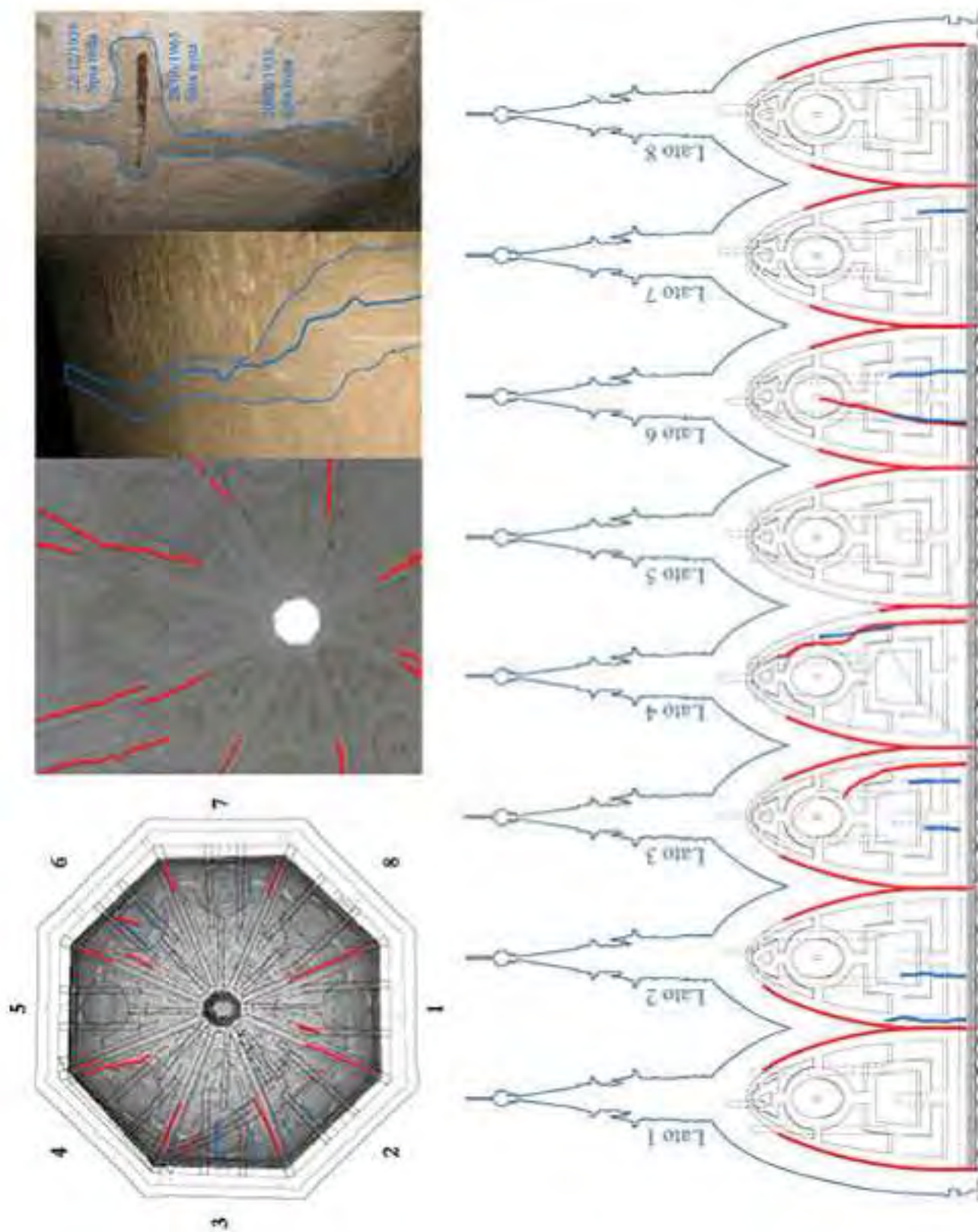


Fig. 134 - Cabotta interna, schema del primo gruppo di lesioni. In rosso, le lesioni nell'intestacchio; in blu, le lesioni nell'estradosso [36]

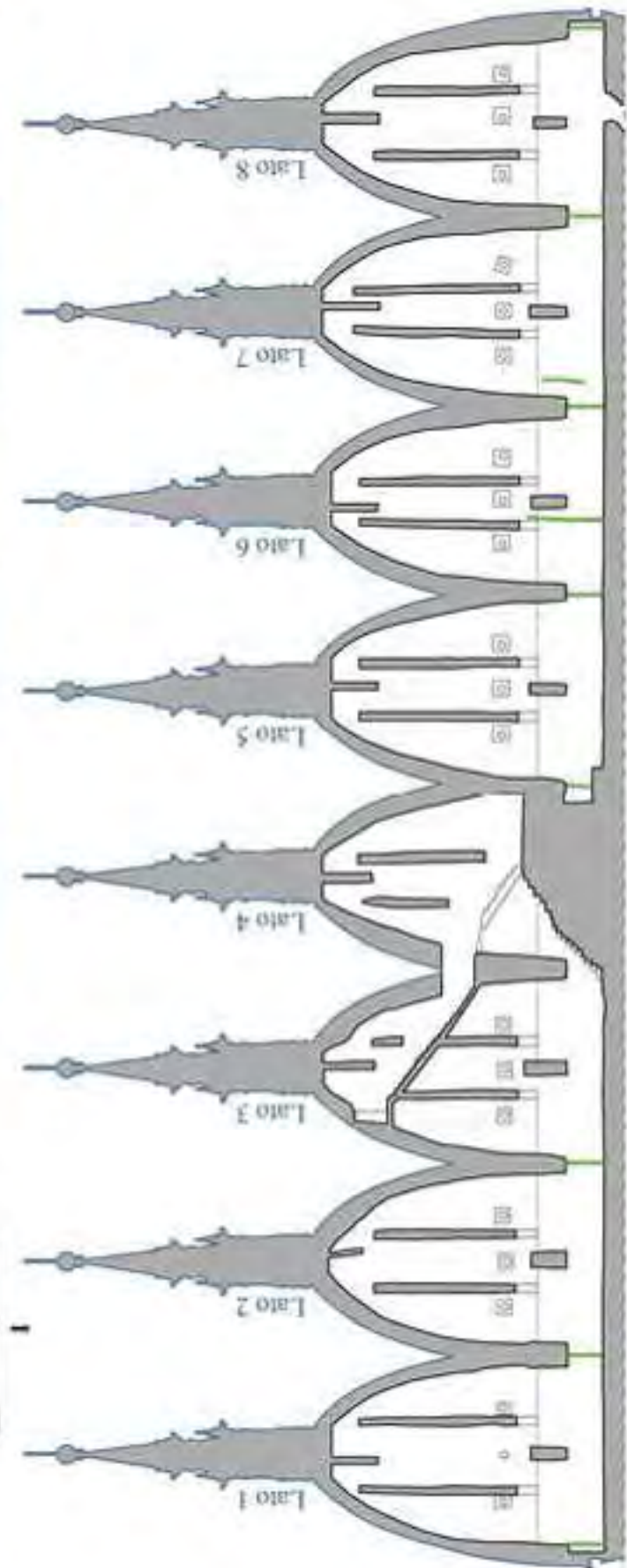
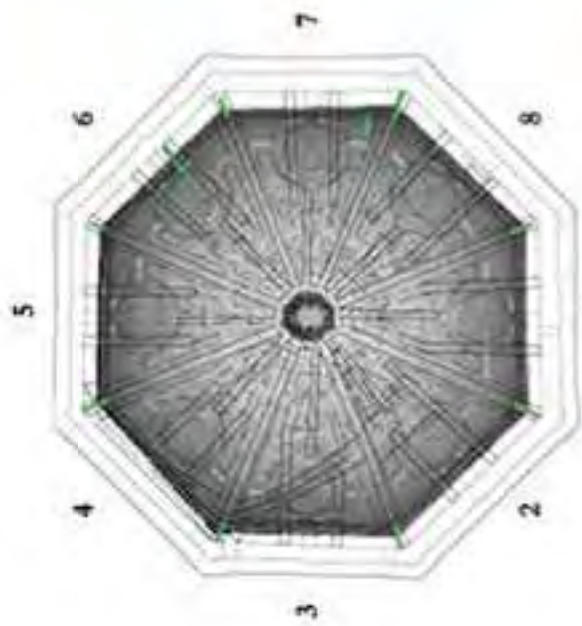


Fig. 135 - Cabretta esterna, schema del primo gruppo di bracci. In arca, le bracci multitracciate [36]



Per contrastare questo primo gruppo di lesioni furono inserite otto cerchiature metalliche (Fig. 136): sette sull'estradosso della calotta esterna della cupola e una sull'estradosso della calotta interna a livello del tamburo.

- 1 } 1572 - 1574 Giorgio Vasari
- 2 } 1575 - 1576 Bartolomeo Ammannati
- 3 } 1575 - 1576 Bartolomeo Ammannati
- 4 } 1575 - 1576 Bartolomeo Ammannati
- 5 } 1575 - 1576 Bartolomeo Ammannati
- 6 } 1585 Bartolomeo Ammannati - Jacopo Lafrè
- 7 } 1585 Bartolomeo Ammannati - Jacopo Lafrè
- 8 } 1585 Bartolomeo Ammannati - Jacopo Lafrè

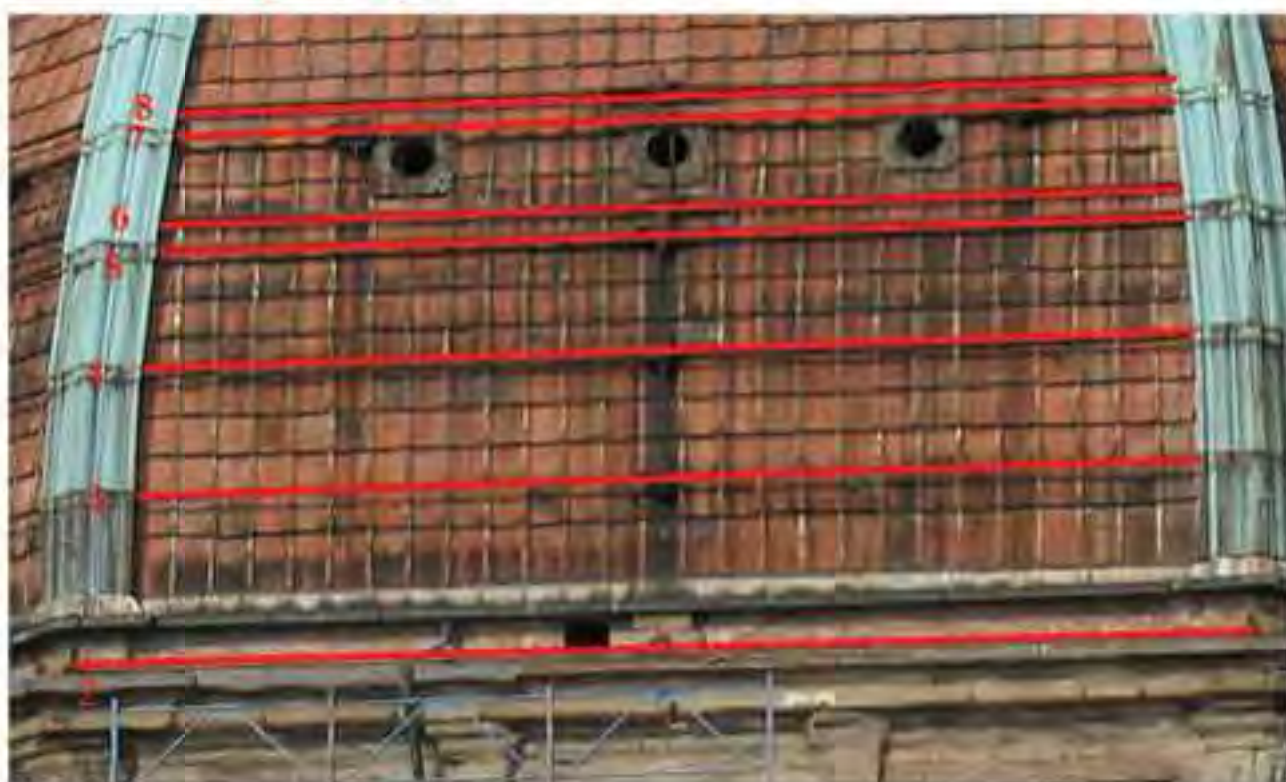


Fig. 136 - Catene metalliche cerchianti introdotte per contrastare le lesioni sugli spigoli di entrambi i gusci (primo gruppo) dovute alla mancanza di ammortamento tra le vele. Sopra, le catene esterne; a sinistra, la catena a livello del tamburo

Il secondo gruppo di lesioni, dovuto al movimento relativo tra i due gusci, taglia i costoloni mediani e quelli della lanterna e provoca preoccupanti distacchi tra le calotte e i costoloni (Fig. 137).

Per contrastare questo secondo gruppo di lesioni furono inserite ventuno catene metalliche trasversali alle due calotte nel tamburo e nella cupola (Fig. 138).



Fig. 137 - Secondo gruppo di lesioni: a sinistra e al centro, lesioni sui costoloni mediani e della lanterna; a destra, lesioni tra costoloni angolari e calotte

5	1572-1574	Giorgio Vasari
2	1575	Bartolomeo Ammannati
14	1594	Filippo Baglioni



Fig. 138 - Catene metalliche trasversali introdotte per contrastare le lesioni sui costoloni mediani e sui costoloni della lanterna (secondo gruppo) dovute al movimento relativo dei due gusci. A sinistra, le catene inserite a livello del tamburo; al centro e a destra, le catene inserite nella cupola

Intorno alla prima metà del novecento Piero Sanpaolesi compì uno studio approfondito sulle condizioni statiche della cupola: riscontrò numerose lesioni nei piedritti e nei due gusci, segno di un evidente movimento delle calotte. Appose un numero considerevole di spie in vetro per monitorare eventuali altri cedimenti. Le prime spie, inserite nel 1935, risultarono in gran parte rotte l'anno successivo.

INDIVIDUAZIONE DELLE CATENE NELL'AULA OTTAGONALE E NELLA CUPOLA
Il modello tridimensionale di punti, insieme alle rappresentazioni grafiche elaborate, ha fornito un supporto indispensabile alla agevole e corretta identificazione e catalogazione di tutte le catene presenti nel corpo ottagonale e nella cupola.

Sono state individuate 78 catene metalliche (Fig. 139), delle quali ben 39 nella cupola. Nelle figure seguenti (Figg. 140, 141, 142) sono evidenziate, in rosso, le catene inserite dal Vasari prima di voltare la cupola, a consolidamento della struttura; in azzurro, le catene inserite subito dopo la conclusione dei lavori per contrastare i dissesti.

E' evidente che il maggior numero di catene (ben 15) si trova nei lati n. 4 e n. 5 (Fig. 141) proprio laddove, afferma il Lafri [37], si sono verificate le prime lesioni pochi anni dopo la conclusione della cupola. Il camminamento che collega questi due lati è stato murato probabilmente in occasione dei consolidamenti della struttura.

Ogni catena, adeguatamente rappresentata, dimensionata e posizionata su piante, prospetti e sezioni, è anche stata tabellata in un abaco indicandone la tipologia, la posizione planimetrica ed altimetrica, la funzione strutturale, la cronologia ed un'ipotetica attribuzione (Tab. 5). Il numero totale di catene presenti nella cupola è 39.

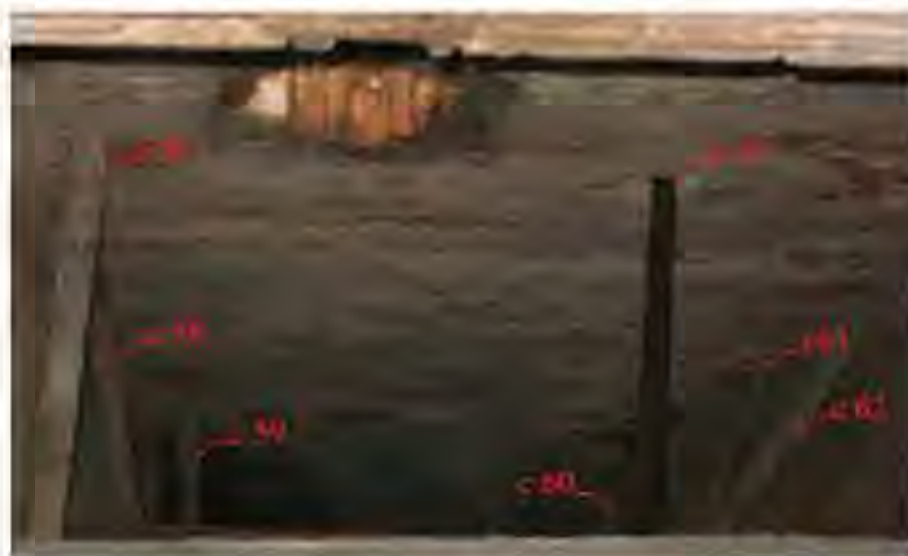


Fig. 139 - Foto di alcune catene metalliche dell'aula ottagonale e della cupola



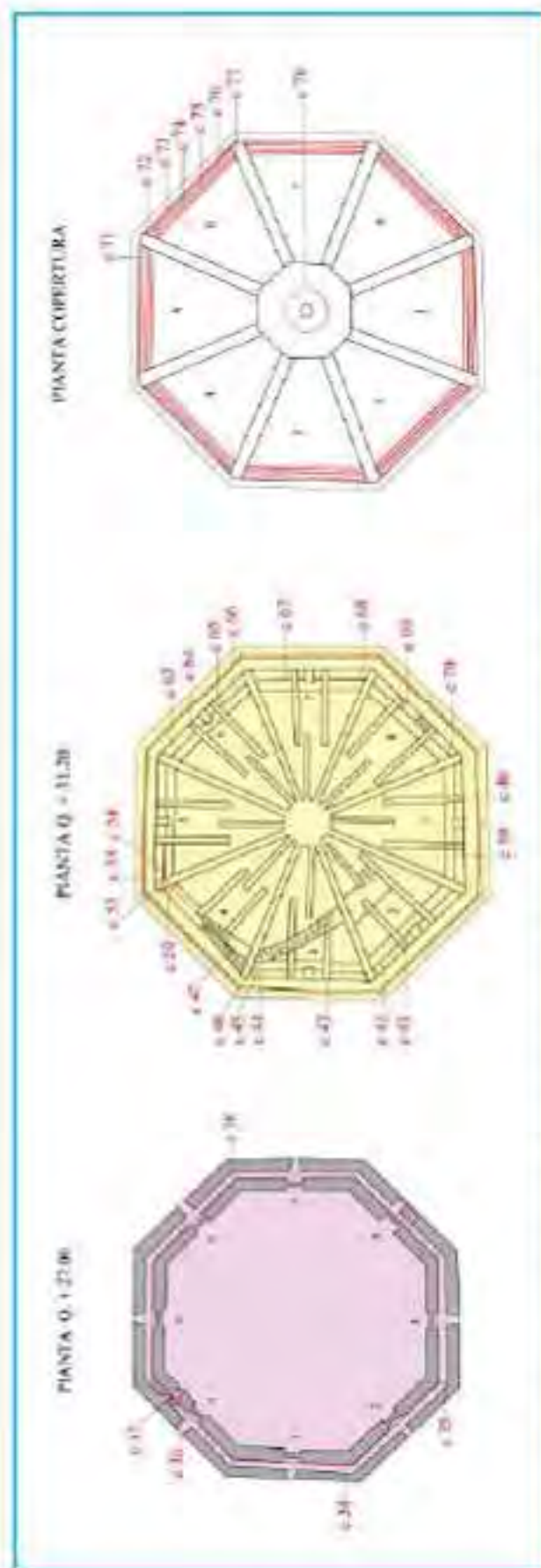
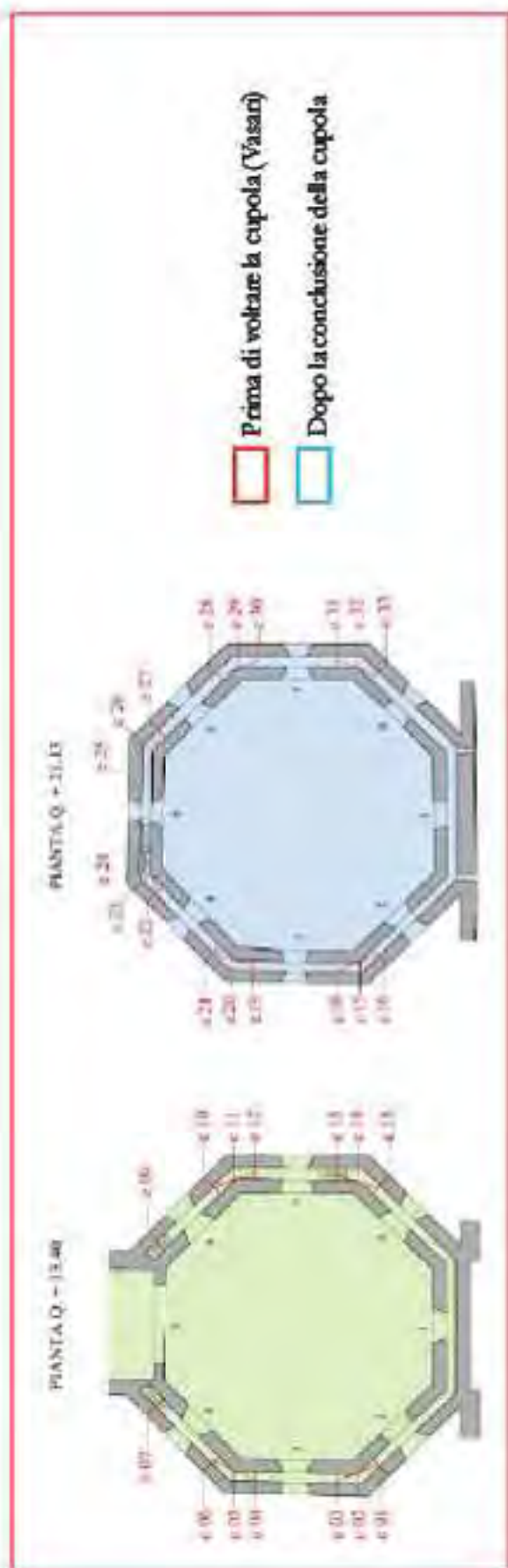


Fig. 140 - Identificazione delle catene a tutti i livelli del corpo ottagonale. In alto, da sinistra: primo camminamento, secondo camminamento, tamburo, imposta e copertura

CALOTTA ESTERNA - LATO INTERNO

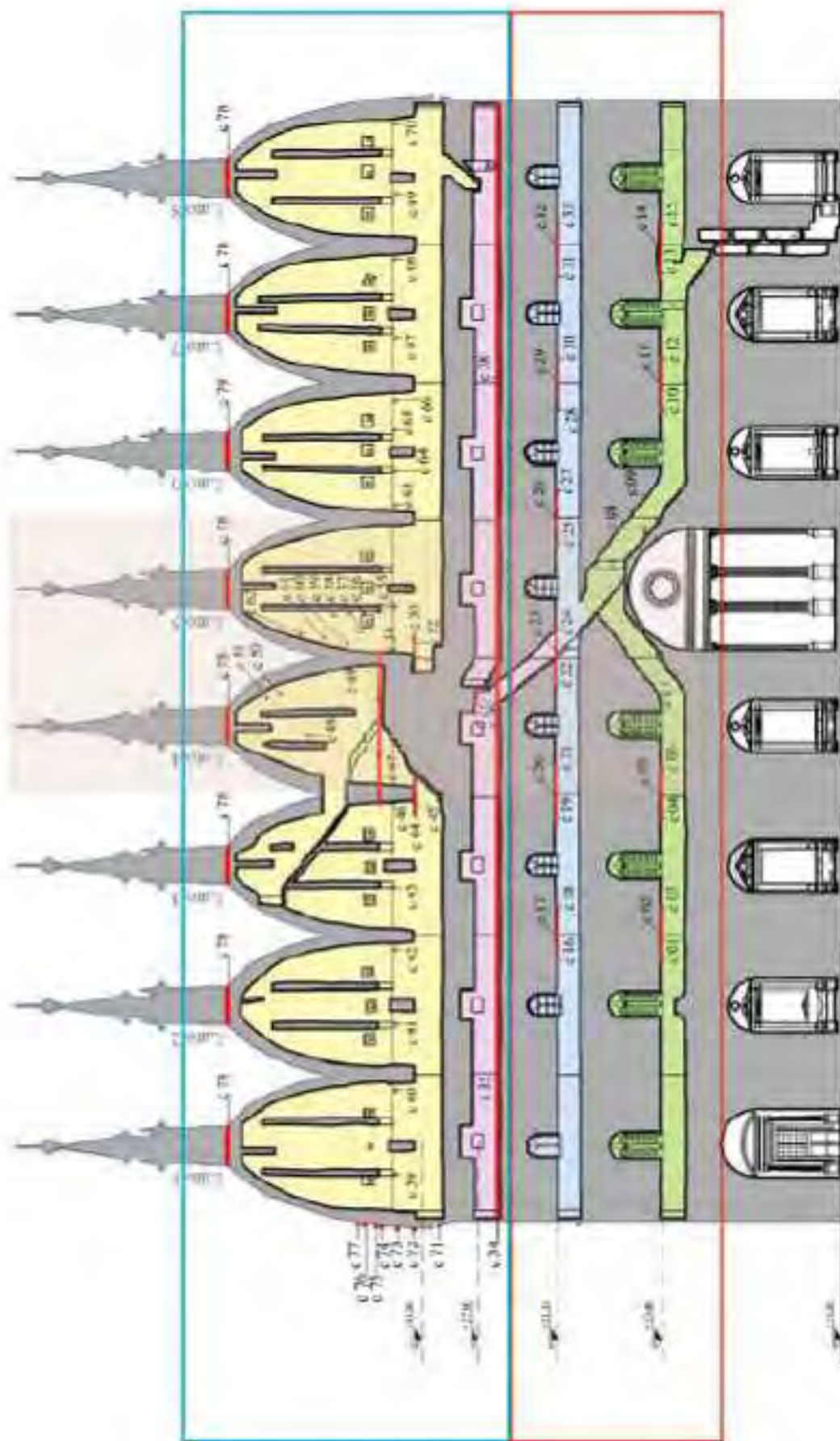


Fig. 141 - Identificazione delle catene nello sviluppo dell'istrucchio della calotta e interna [36]

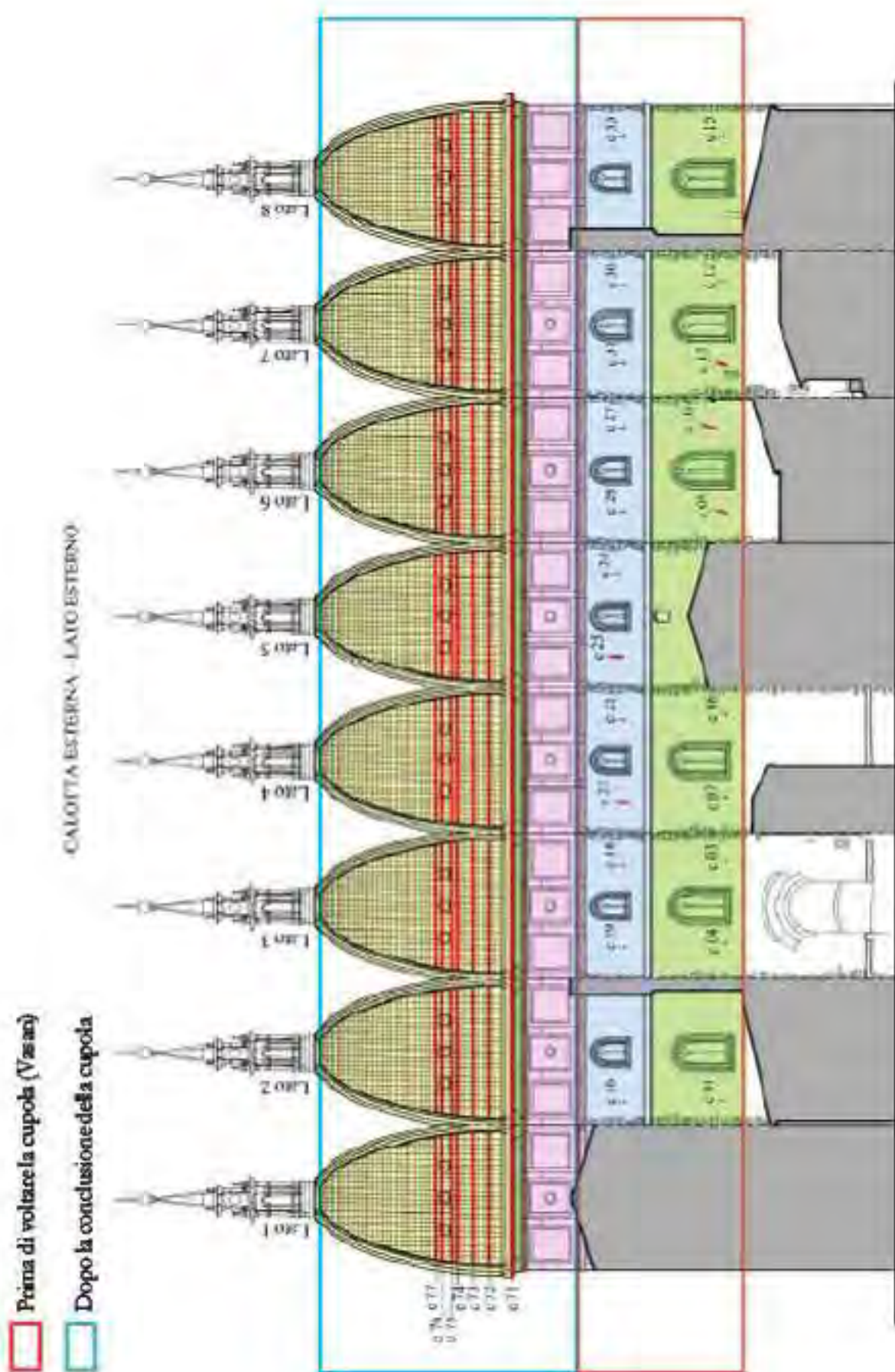


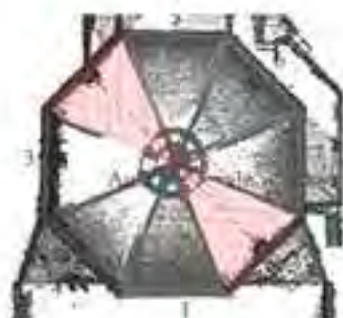
Fig. 142 - Identificazioni delle catene nello sviluppo dell'estradosso della calotta esterna [36]

	N. Catena	Lato	Quota (m)	Tipologia	Funzione strutturale	Cronologia e ipotetica attribuzione
I Camminamento	c 01	Lato 2	+ 13,40	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gasci	1562-1563 Giorgio Vasari prima di voltare la cupola
	c 02	Lato 2 - lato 3		Barra metallica	Collegamento c 01 - c 03	
	c 03	Lato 3	+ 13,41	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gasci	
	c 04		+ 13,42			
	c 05	Lato 3 - lato 4		Barra metallica	Collegamento c 04 - c 06	
	c 06	Lato 4	+ 13,36	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gasci	
	c 07		+ 14,15			
	c 08	Lato 5	+ 14,60	Barra metallica		
	c 09	Lato 6	+ 14,33	Barra metallica con capochiave a paletta		
	c 10		+ 13,44			
	c 11	Lato 6 - lato 7		Barra metallica	Collegamento c 10 - c 12	
	c 12	Lato 7	+ 13,45	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gasci	
	c 13		+ 13,52	Barra metallica con capochiave a paletta		
	c 14	Lato 7 - lato 8		Barra metallica	Collegamento c 13 - c 15	
	c 15	Lato 8	+ 13,43	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gasci	
15	Totale catene I camminamento					
II Camminamento	c 16	Lato 2	+ 21,16	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gasci	
	c 17	Lato 2 - lato 3		Barra metallica	Collegamento c 15 - c 17	
	c 18	Lato 3	+ 21,21	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gasci	
	c 19		+ 21,29			
	c 20	Lato 3 - lato 4		Barra metallica	Collegamento c 18 - c 20	
	c 21	Lato 4	+ 21,31	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gasci	
	c 22		+ 21,28	Barra metallica con capochiave a paletta		
	c 23	Lato 4 - lato 5		Barra metallica	Collegamento c 21 - c 23	
	c 24	Lato 5	+ 21,33	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gasci	

	c 25		+ 21.26	Barra metallica con capochiave a paletta			
	c 26	Lato 5 - lato 6		Barra metallica	Collegamento c 24 - c 26		
	c 27	Lato 6	+ 21.24	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gioci		
	c 28		+ 21.17				
	c 29	Lato 6 - lato 7		Barra metallica	Collegamento c 27 - c 29		
	c 30	Lato 7	+ 21.14	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gioci		
	c 31		+ 21.12				
	c 32	Lato 7 - lato 8		Barra metallica	Collegamento c 30 - c 32		
	c 33	Lato 8	+ 21.15	Barra metallica senza capochiave visibile	Collegamento dei gioci		
	18	Totale catene II camminamento					
	33	Totale catene aula ottagonale					
TAMBURO	c 34	Circonda il guscio interno	+ 25.70	Barra metallica con capochiave a paletta	Unione dell'intero guscio interno	1572 - 1575 Giorgio Vasari in seguito al manifestarsi delle prime lesioni.	
	c 35	Lato 1	+ 25.70		Collegamento dei gioci		
	c 36	Lato 4	+ 27.70 ca.		Collegamento scala a chiocciola - gioci		
	c 37				Collegamento dei gioci		
	c 38	Lato 6	+ 25.70		Collegamento dei gioci		
	5	Totale catene tamburo					
CUPOLA	c 39	Lato 1	+ 33.15	Barra metallica	Collegamento dei gioci		
	c 40						
	c 41	Lato 2					
	c 42						
	c 43	Lato 3				+ 31.60	
	c 44						
	c 45	Lato 3 - lato 4				+ 34.40	
	c 46	Lato 3					
	c 47	Lato 4	+ 39.50	Barra di legno			
	c 48		+ 35.50	Barra metallica			
	c 49			Barra di legno			
	c 50						
	c 51						
	c 52	Lato 4 - lato 3	+ 31.70	Barra metallica			
	c 53	Lato 5	+ 34.40				
	c 54		+ 33.15				
	c 55		+ 35.5		Barra di legno		
c 56	+ 35.70		Barra metallica				
c 57			Barra di legno				
c 58							

	c 59							
	c 60							
	c 61							
	c 62							
	c 63	Lato 6	+ 33,15	Barra metallica	Unione circolare della cupola	1572 - 1575 Giorgio Vasari in seguito al manifestarsi delle prime lesioni.		
	c 64							
	c 65							
	c 66							
	c 67	Lato 7	+ 33,15					
	c 68							
	c 69	Lato 8	+ 33,15					
	c 70							
	c 71	Esterno cupola	+ 29,88					
	c 72		+ 31,72					
	c 73		+ 32,95					
	c 74		+ 34,25					
	c 75		+ 34,66					
	c 76		+ 35,48					
	c 77		+ 35,90					
39	Totale catene cupola							
LANTERNA	c 78	Interno	+ 44,30				Barra metallica	1572 - 1575 Giorgio Vasari in seguito al manifestarsi delle prime lesioni.
	1	Totale catene lanterna						
	78	Totale sistema corpo ortogonale e cupola						

Tab. 5 - Abaco delle catene [36]



ANALISI DEI COLLEGAMENTI VERTICALI (ATTICO VASARIANO - CUPOLA)
La Banca dati 3D ha permesso di fare alcune ipotesi circa i collegamenti verticali. Allo stato attuale, arrivati alla quota dell'attico vasariano (lato n. 4), è visibile una scala a chiocciola (Fig. 143, in alto), murata in corrispondenza del sesto scalino dal Vasari a conclusione della cupola, a seguito del manifestarsi delle prime lesioni. Tuttavia, per ripristinare il dislivello formatosi, inserisce le rampe n. 1 e n. 2 (lato n. 8) per raggiungere il livello dell'imposta della cupola (Fig. 143, in basso).

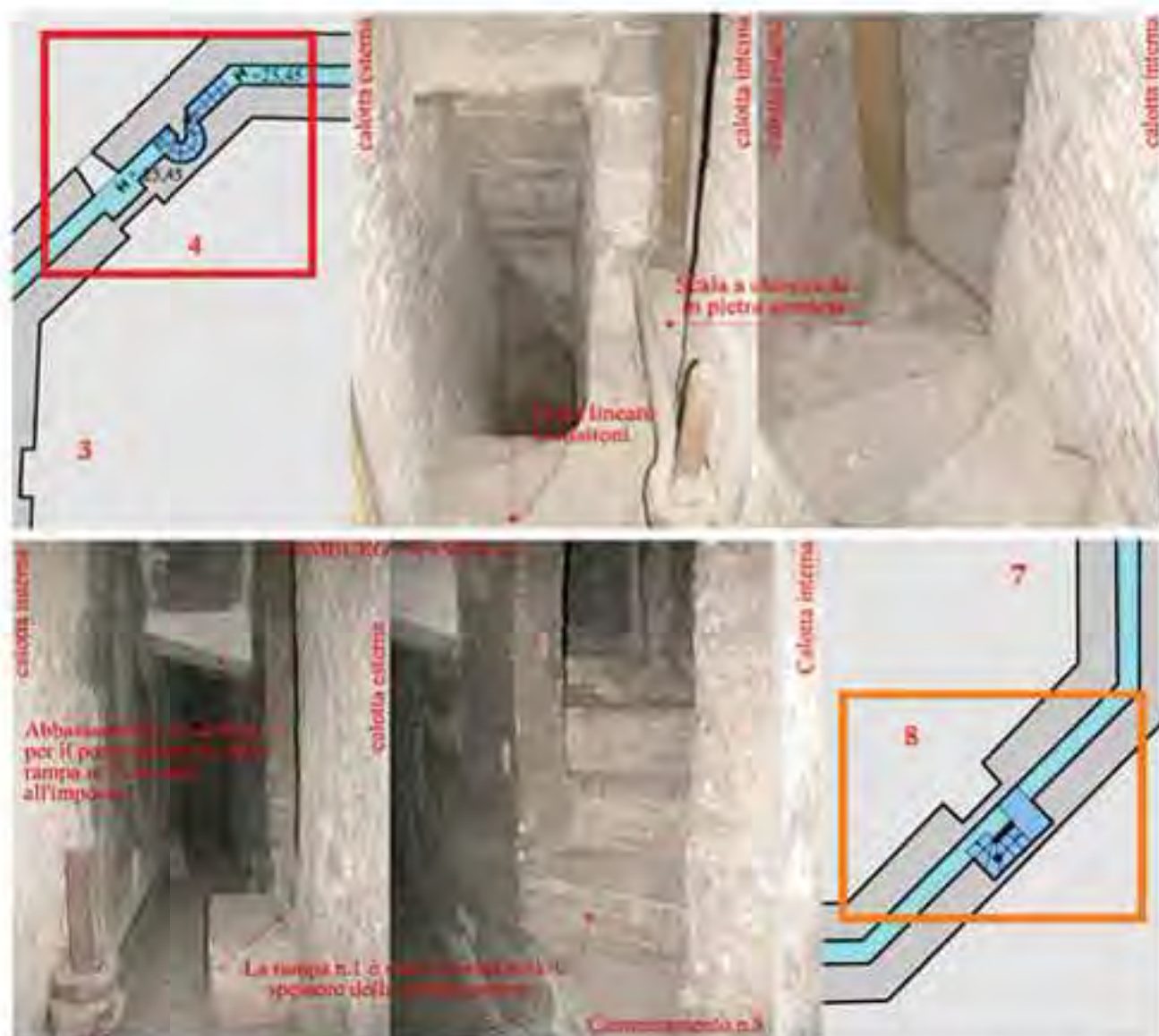


Fig. 143 - In alto, scala a chiocciola a livello del tamburo, murata in corrispondenza del sesto scalino. In basso, rampa n. 1

Probabilmente, però, la scala a chiocciola consentiva anche l'accesso diretto alla lanterna collegandosi con le rampe n. 4, n. 5 e n. 6 (Figg. 145, 146). Ecco perché il Vasari, costretto a superare il dislivello creato tra la quota dell'imposta e la rampa n. 4, costruisce la rampa n. 3 (Fig. 144).

Questa ipotesi è avvalorata da due fattori non trascurabili:

- la rampa n. 1, ricavata nella muratura del guscio esterno (Fig. 143), fa presupporre una costruzione posteriore a quella del livello del tamburo. Supposizione sostenuta anche dalla presenza di un'asse di legno (figura al lato, in alto) indispensabile per percorrere l'anello in verso antiorario, essendo la luce del camminamento completamente ingombra della rampa n. 2

- la rampa n. 3, stretta e impervia, è accessibile passando sotto il costolone angolare (spigolo tra il lato n. 3 e n. 4), troppo basso sulla scala, tale da indurre il visitatore a chinarsi per l'attraversamento (figura al lato, in basso). Difficile credere che sia stata ideata dal Vasari in fase progettuale.

Entrambi i fattori sono accreditati dalla mancanza di logica che caratterizza la

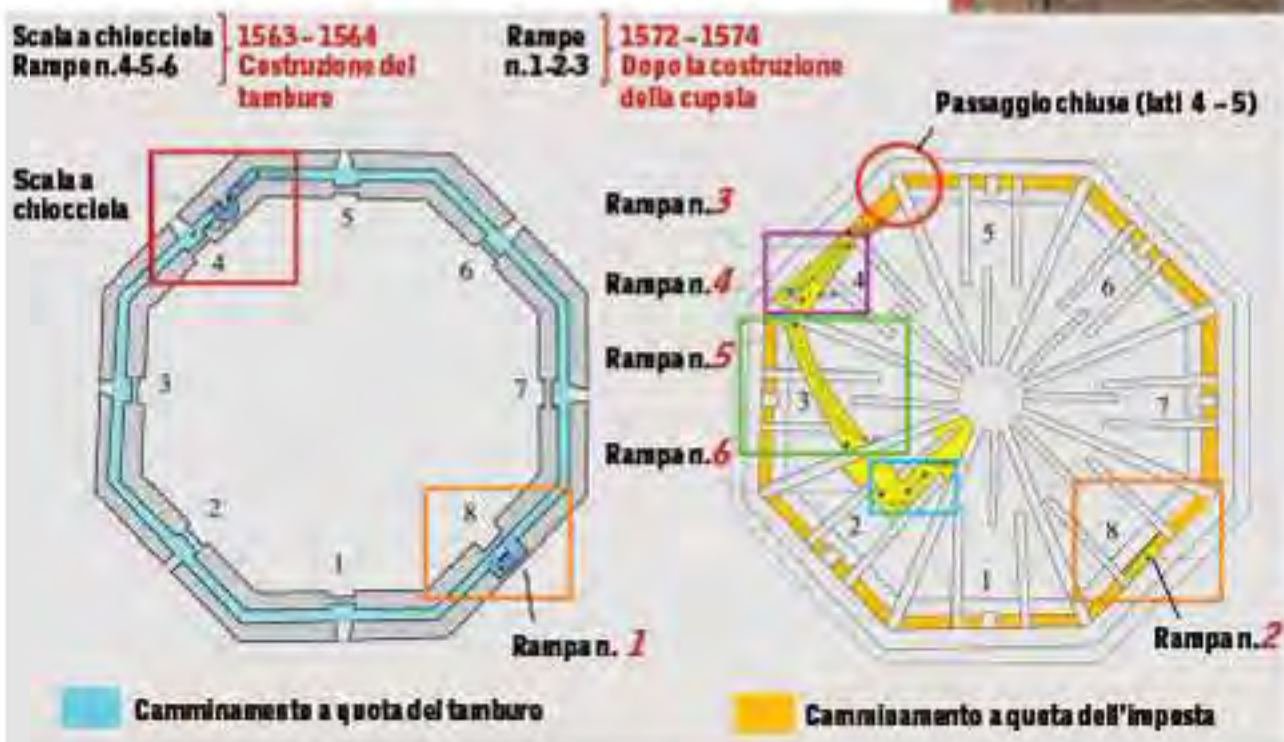


Fig. 144 - Stato attuale dei collegamenti verticali. A sinistra, lo schema planimetrico del tamburo e a destra, lo schema planimetrico della cupola

Fig. 145 - Modello tridimensionale della cupola privata del guscio esterno. Analisi strutturale dei collegamenti verticali. Si ipotizza che la rampa n. 3 sia stata costruita a seguito del tamponamento della scala a chiocciola.

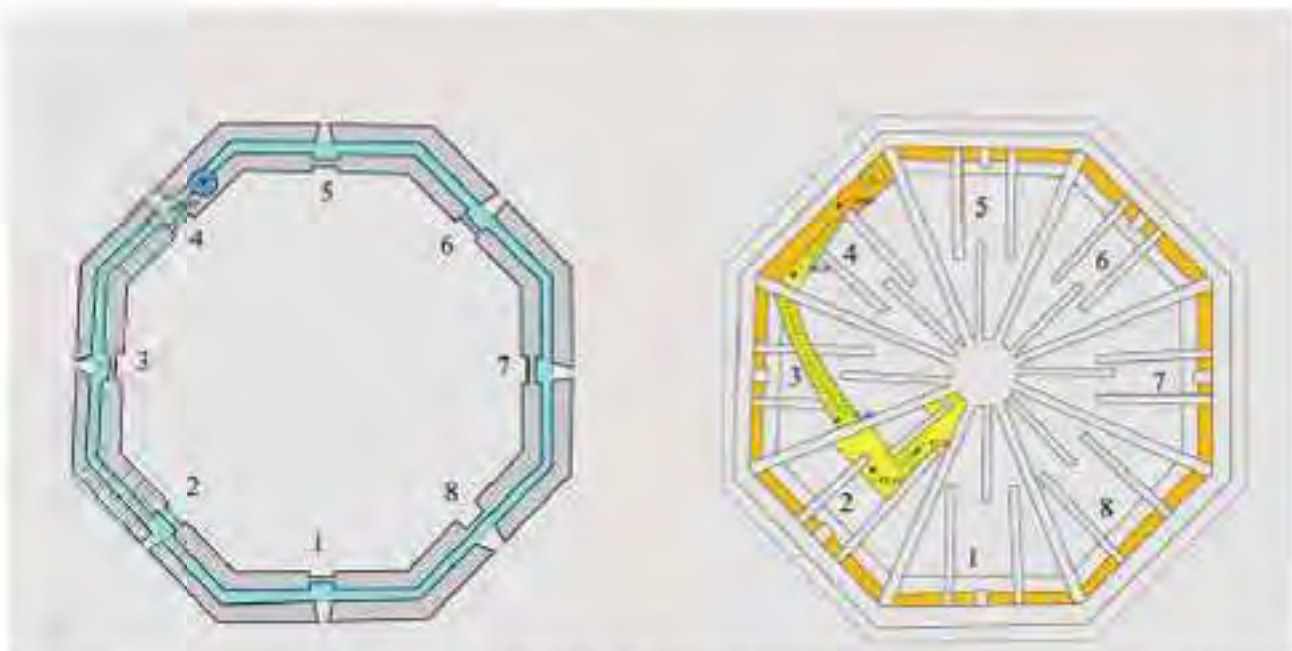


Fig. 146 - Assetto ipotetico dei collegamenti verticali. A sinistra, lo schema planimetrico del tamburo e a destra, lo schema planimetrico della cupola

disposizione di tutte le rampe a livello dell'imposta: è, infatti, necessario percorrere metà anello (Fig. 144) per arrivare alle rampe esistenti (n. 4, n. 5 e n. 6, Fig. 147). Questa ipotesi sembra avere riscontro nella relazione scritta dal Lafri nel 1620 [37], nella quale afferma che l'assetto originario della costruzione prevedeva come unico collegamento tamburo-cupola la scala a chiocciola costruita dal Vasari nel biennio 1563 - 1564 (Figg. 145, 146, 147):

[...] e così doppo cominciò a murare la sua aggiunta del finestrato dorico, e sopra vi volò le due cupole con lanterna di macigno; e non stette molto tempo che le mostrò il primo pezo nella facciata di verso ser Damiano, appunto nella chiocciola che aveva fatto Giorgio nella sua aggiunta per andare sulla cupola. Dove per rimediare a tal disordine, la riempiermo di mura, e vi messimo una catena di ferro che per accomodarli le sue chisavi, stracciorno dette cupole, e nel medesimo tempo si stracciò un architrave e un soprarco d'uno degli otto finestroni che sono nella detta aggiunta di Giorgio, e vi si fece una scala [...]



Fig. 147 - In alto, a destra, dettaglio della pianta della cupola, privata del guscio esterno, con indicazione delle rampe n. 4, n. 5 e n. 6. Sopra, a sinistra, rampa n. 4; al centro, rampa n. 5; a destra, rampa n. 6.



CAPITOLO 7

IL PROGETTO RiSEM LE TORRI DI SAN GIMIGNANO



REGIONE
TOSCANA



IL PROGETTO RISEM

Il progetto RiSEM *"Rischio Sismico negli Edifici Monumentali"*, finanziato dalla Regione Toscana e di durata biennale (01/06/2011 - 31/05/2013), ha un approccio multidisciplinare e vede coinvolti l'Amministrazione comunale di San Gimignano (COMSG), partecipante senza beneficio di contributi, e numerosi dipartimenti universitari della Toscana:

DICeA - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Firenze. Responsabile scientifico: Gianni Bartoli.

DiCR - Dipartimento di Costruzioni e Restauro, Facoltà di Architettura, Università degli Studi di Firenze. Responsabile scientifico: Luca Giorgi.

DST - Dipartimento di Scienze della Terra, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Università degli Studi di Siena. Responsabile scientifico: Dario Albarello.

DET - Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni, TECHLab, Laboratorio Tecnologie per i Beni Culturali e Ambientali, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Firenze. Responsabile scientifico: Massimiliano Pieraccini.

La ricerca è focalizzata sulla individuazione e sperimentazione di nuove tecnologie non intrusive per la valutazione del rischio sismico di edifici monumentali. In

particolare, le indagini sono condotte sulle Torri di San Gimignano (Fig. 148), sia a livello puntuale sul singolo monumento, sia allargando la scala di analisi ad un livello territoriale.



Fig. 148 - Foto aerea del centro storico di San Gimignano

Il prodotto finale atteso è la redazione di *Linee Guida per la vulnerabilità sismica degli edifici in muratura a Torre*, attraverso lo sviluppo di sette distinte fasi di lavoro (*WorkPackages, WP*) necessarie al raggiungimento di tre risultati principali (*Main Deliverables, D - Tabb. 6, 7*). Di seguito, l'elenco dei WP:

WP_1 - COORD

Guida, coordinamento, gestione del progetto e disseminazione dei risultati (coordinamento: DICeA, coinvolgimento: tutte le unità di ricerca)

WP_2 - SISM

Definizione della pericolosità sismica (coinvolgimento: DICeA, DST e COMSG).

WP_3 - RIL

Acquisizione delle caratteristiche geometriche e dell'evoluzione storica e degli interventi sul manufatto (coinvolgimento: DiCR e COMSG).

WP_4 - CARAT

Definizione delle caratteristiche meccaniche e dinamiche delle torri (coinvolgimento: DICeA, DET e DST).

WP_5 - VULN

Definizione della vulnerabilità sismica (coinvolgimento: DICeA)

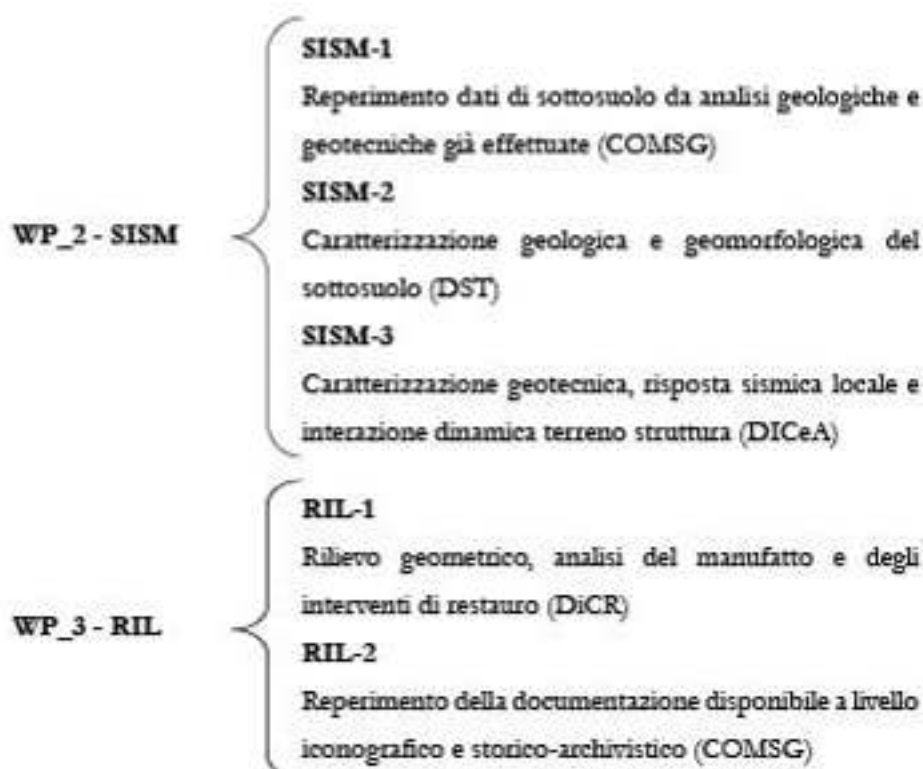
WP_6 - RIS


Definizione del rischio sismico (coinvolgimento: DICeA e COMSG)

WP_7 - ADV

Messa a punto di tecniche di indagine e di analisi innovative (coinvolgimento: DICeA e DET).

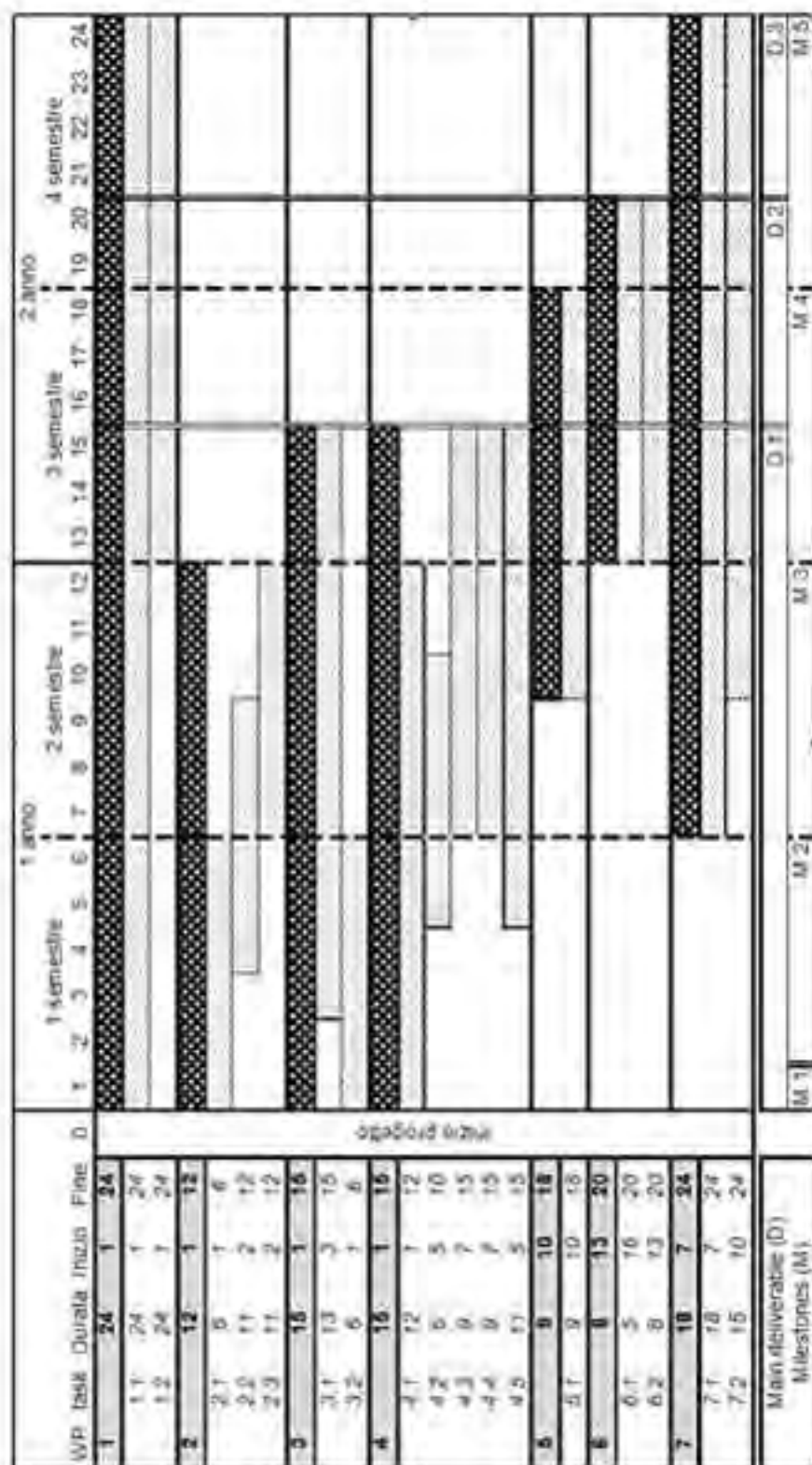
All'interno dei singoli WP si identificano le attività (*Tasks*):





WP_4 - CARAT	<ul style="list-style-type: none">CARAT-1 Analisi con tecniche GPR non a contatto (DET)CARAT-2 Definizione dei parametri meccanici (DICEA)CARAT-3 Caratterizzazione dinamica con misure con radar interferometrico (DET)CARAT-4 Misure velocimetriche di vibrazioni ambientali (DST)CARAT-5 Analisi ed interpretazione dei dati e modellazione strutturale (DICEA)
WP_5 - VULN	<ul style="list-style-type: none">VULN-1 Analisi della vulnerabilità sismica (DICEA)
WP_6 - RIS	<ul style="list-style-type: none">RIS-1 Valutazione del grado di esposizione dei manufatti (COMSG)RIS-2 Analisi di rischio (DICEA)
WP_7 - ADV	<ul style="list-style-type: none">ADV-1 Sviluppo di un radar penetrante con sintesi SAR a "grande apertura" (DET)ADV-2 Implementazione di metodi di analisi su codici OpenSource (DICEA)

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LO STUDIO DIAGNOSTICO DEI BENI CULTURALI**
DALLA SCALA EDILIZIA ALLA SCALA URBANA: IL CASO STUDIO DELLA
BASILICA DELL'UMILTÀ DI PIEDOIA E DELLE TORRI DI SAN GIMIGNANO



Tab. 6 - Diagramma di Gantt (diagramma creato dal progetto RISEM)

num. (1)	nome del prodotto della ricerca	n° del WP	acronimo del partecipante responsabile	natura (2)	livello di discriminazione (3)	data di realizzazione (4)
1.1	Publicazione dei risultati scientifici (sia tramite il coordinamento del portale collaborativo internet sia tramite la cura della pubblicazione riassuntiva dei risultati a conclusione del progetto)	1	DiCeA	R	PP	24
1.2	Organizzazione di una giornata di studi (a conclusione del progetto)	1	DiCeA	R	PP	24
2.1	Carta Geologica, Litologica e Geomorfologica in scala 1:2000	2	DST	DB	PP	12
2.2	Log litostratigrafici e sezioni geologiche	2	DST	R	PP	12
2.3	Carta delle indagini a scala 1:2000 con la distribuzione dei valori delle frequenze di vibrazione proprie dei terreni	2	DST	DB	PP	12
2.4	Carta di microzonazione sismica di secondo livello dell'area indagata con valori FA ed FV da abacchi secondo le direttive previste dalla Linea Guida per la Microzonazione Sismica	2	DST	DB	PP	12
2.5	Rapporto sulla sperimentazione geotecnica in sito e di laboratorio effettuata dal DiCeA nell'ambito della ricerca	2	DiCeA	DB	PP	12
2.6	Rapporto sulla scelta di accelerogrammi e spettri rappresentativi della sismicità di base selezionati da un archivio di registrazioni accelerometriche italiane e utilizzati nelle analisi numeriche di risposta sismica locale e di interazione dinamica terreno-struttura	2	DiCeA	DB	PP	12
2.7	Rapporto sulle analisi numeriche degli effetti di sito e dell'interazione dinamica	2	DiCeA	DB	PP	12

**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

2.8	Rapporto sulla determinazione dei fattori di amplificazione degli effetti litostratigrafici e topografici nei siti oggetto delle analisi di RSL, da utilizzare come base informativa per l'eventuale redazione di carte di Microzonazione Sismica di livello 3	2	DICeA	DB	PP	12
2.9	Dati di input per il WP_6	2	DICeA	DB	PP	12
D.1	Rapporto sulla pericolosità sismica del territorio di San Gimignano	2	DICeA	R	PU	15
3.1	Rilievo geometrico delle torri	3	DIRES	R	PP	15
3.2	Rilievo storico-critico degli interventi avvenuti in passato	3	DIRES	R	PP	15
3.3	Mappatura di (eventuali) fenomeni fessurativi in corso sulle Torri	3	DIRES	R	PP	15
3.4	Dati di input per il WP_4 e il WP_5	3	DIRES	DB	PP	15
4.1	Valutazione delle caratteristiche delle Torri di San Gimignano	4	DET	DB	PP	12
4.2	Valutazione delle caratteristiche meccaniche delle Torri di San Gimignano	4	DICeA	DB	PP	10
4.3	Determinazione del comportamento modale dei manufatti	4	DET	DB	PP	15
4.4	Modelli numerici virtuali identificati delle Torri	4	DICeA	DB	PP	15
4.5	Dati di input per il WP_5	4	DICeA	DB	PP	15
5.1	Definizione degli stati limite per le tipologie di edifici a Torre ed individuazione di indici semplificati per la valutazione della vulnerabilità sismica	5	DICeA	R	PP	18
5.2	Dati di input per il WP_6	5	DICeA	R	PP	18
6.1	Mappatura dei livelli di esposizione e del rischio sismico delle Torri di San Gimignano	6	DICeA	R	PP	20
D.2	Le Torri di San Gimignano: rilievo, caratterizzazione, analisi del rischio sismico	2-6	DICeA	R	PU	20

7.1	Realizzazione di un radar penetrante con sintesi SAR a "grande apertura" e sua sperimentazione in campo	7	DEI	P	PP	24
7.2	Definizione di modelli meccanici per la definizione del comportamento delle murature, implementati in codici di analisi OpenSource	7	DICeA	S	PU	24
D.3	Linee Guida per la vulnerabilità sismica degli edifici in muratura a Torre	1-7	DICeA	R	PU	24

Tab. 7 - Risultati attesi e Prodotti della ricerca (tabella estratta dal progetto RiSEM)

(1) Numerazione secondo la data di ultimazione.

(2) Natura dei prodotti secondo il seguente codice:

R (Rapporto), P (Prototipo), D (Dimostratore), DB (data base), S (software), A (Altro)

(3) Livello di disseminazione dei prodotti secondo il seguente codice:

PU (Pubblico), PP (ristretto agli altri Partecipanti al Progetto), RI (ristretto ad un gruppo specificato dal consorzio), CO (Confidenziale, solo per i membri del consorzio);

(4) Misurata in mesi dalla data di partenza del progetto (mese 1)

SAN GIMIGNANO

La più antica formazione del nucleo abitato di San Gimignano risale almeno al III secolo a.C. come testimoniano i numerosi ritrovamenti archeologici (soprattutto tombe) nel territorio circostante. Tuttavia, la prima attestazione documentaria relativa al villaggio, è del 929.

La prima cinta muraria risale al 998 e comprende il poggio di Montestaffoli e il poggio della Torre con il castello vescovile (Fig. 149).

Verso il 1150 San Gimignano continua ad essere un centro emergente con una politica di espansione territoriale e una significativa crescita delle attività commerciali.



Fig. 149 - San Gimignano tra la fine del XI e gli inizi del XII secolo. Ipotesi ricostruttiva (immagine p. 61 di Bagnoli A. (a cura di), La collegiata di San Gimignano. L'architettura, i cicli pittorici murali e i loro restauri, Siena, Protagon Edizioni, Fondazione Monte dei Paschi di Siena, 2009, pp. 543, ISBN 978-88-8024-173-7)

E' in questo periodo che si formano due borghi al di fuori delle mura, entrambi lungo una nuova via maestra:

- il borgo di San Matteo verso Pisa;
- il borgo di San Giovanni verso Siena.

Nel 1199, nel pieno del suo splendore economico, il paese guadagna la propria indipendenza comunale rispetto ai vescovi di Volterra. Non mancano le lotte intestine tra guelfi e ghibellini (rispettivamente capeggiati dagli Ardinghelli e Salvucci), ma nel XIII secolo San Gimignano vive il periodo di maggior splendore economico. Nasce un ceto aristocratico urbano che esprime la propria supremazia politica e sociale nella costruzione di 72 torri (Fig. 150).



Fig. 150 - San Gimignano tra la fine del XII e gli inizi del XIII secolo. Ipotesi ricostruttiva [immagine p. 97 di Bagnoli A. (a cura di), *La collegiata di San Gimignano. L'architettura, i cicli pittorici murali e i loro restauri*, Siena, Protagon Editori, Fondazione Monte dei Paschi di Siena, 2009, pp. 543, ISBN 978-88-8024-173-7]

Gli ingenti capitali accumulati vengono investiti nel corso del Duecento in importanti opere pubbliche, conferendo alla cittadina l'articolazione degli spazi urbani visibile ancora oggi.

Nel 1255 la città è presa dai guelfi di Firenze che ordinano la distruzione delle mura (Fig. 152). Soltanto nel 1261, tornata la supremazia ghibellina dopo la battaglia di Montaperti, i sangimignanesi ricostruiscono le mura comprendendo nuovamente i poggi di Montestaffoli e della Torre e suddividendo la cittadina in quattro contrade (Fig. 151):

- contrada di Piazza;
- contrada di Castello;
- contrada di San Matteo;
- contrada di San Giovanni.



Fig. 151 - San Gimignano agli inizi del XIV secolo. Ipotesi ricostruttiva [immagine p. 104 di Bassoli, A. e altri di, La collegiata di San Gimignano. L'architettura, i cicli pittorici murali e i loro restauri, Siena - Promemori Edizioni Fondazione Monte dei Paschi di Siena, 2009, pp. 543, ISBN 978-88-8024-173-7]



Fig. 152 - San Gimignano: planimetria delle fortificazioni [immagine p. 58 di Bagnoli A. (a cura di), *La collegiata di San Gimignano. L'architettura, i cicli pittorici murali e i loro restauri*, Siena, Protagon Editori, Fondazione Monte dei Paschi di Siena, 2009, pp. 5-43, ISBN 978-88-8024-173-7]

Il Trecento è un secolo di crisi e San Gimignano, travagliata dalle lotte interne, è colpita pesantemente dalla peste nera e dalla carestia del 1348. Pochi anni dopo si consegna spontaneamente a Firenze rinunciando alla propria autonomia.

Tuttavia, nonostante il declino economico e politico, il XIV e XV secolo sono importanti dal punto di vista artistico per la presenza di numerosi maestri, fiorentini e senesi, chiamati dagli ordini religiosi ad abbellire i propri possedimenti: Memmo di Filippuccio, Lippo e Federico Memmi, Taddeo di Bartolo (Fig. 153), Benozzo Gozzoli, Domenico Ghirlandaio, Sebastiano Mainardi e Piero del Pollaiuolo.

Alla fine del XIX secolo si cominciò a riscoprire la particolarità e la bellezza della cittadina, che è sottoposta integralmente a vincolo monumentale nel 1929. Nel 1990 è dichiarata dall'UNESCO patrimonio culturale dell'Umanità.

La città di San Gimignano è stata scelta come *'case study'* perché rappresenta un contesto urbano singolare nel panorama mondiale per le sue emergenze monumentali fortemente "a rischio" nel caso di eventi sismici.

Il territorio si trova in un'area di pericolosità sismica relativamente ridotta, caratterizzata da accelerazioni massime attese in 50 anni (ovvero l'accelerazione



Fig. 153 - Taddeo di Bartolo, "S. Gimignano con il modello della cittadina" (Museo Civico di San Gimignano). In basso, un particolare

caratterizzata da probabilità d'eccedenza pari al 10%) non superiori al 15% dell'accelerazione di gravità [http://esse1-gis.mi.ingv.it/s1_en.php]. Una immagine forse più immediata del livello di sismicità che caratterizza l'abitato di San Gimignano può essere ottenuta considerando la storia sismica del suo territorio [<http://emidius.mi.ingv.it/DEMI11>], dalla quale risulta che il massimo evento sismico di cui si abbia notizia (avvenuto il 26 settembre 1869) ha raggiunto effetti pari al VII grado della scala MCS. Si tratta di effetti d'intensità confrontabili con quelli osservati in corrispondenza della crisi sismica del maggio - giugno 2012 in Pianura Padana e quindi, se non disastrosi, comunque rappresentativi di un quadro di danneggiamento diffuso e particolarmente intenso, soprattutto sul patrimonio monumentale. Questo tipo di dato sottolinea l'importanza di una stima dello scuotimento atteso in occasione di futuri eventi sismici, scuotimento potenzialmente pericoloso per manufatti di importanza storica, quali le torri medioevali presenti nel centro storico dell'abitato.

IL RUOLO DELLA GEOMATICA NELLA DEFINIZIONE DEL RISCHIO SISMICO
Le Torri di San Gimignano costituiscono un patrimonio di valore riconosciuto dall'umanità e, come tale, deve essere salvaguardato e documentato nei suoi molteplici aspetti: comportamento statico e dinamico legato ai materiali e alla tecnica costruttiva, ai carichi propri e accidentali, all'esposizione ad attività antropiche e a fattori ambientali.

Gli strumenti e i metodi della Geomatica definiscono un supporto indispensabile ed efficace per raccogliere una documentazione metrica valida ed esaustiva, in una specifica collocazione temporale, dalla quale estrarre successivamente tutte le informazioni geometriche necessarie a tutte le competenze coinvolte negli studi e nelle indagini, oltre che nella progettazione e conservazione, per una proficua attività di ricerca multidisciplinare.

L'acquisizione, l'elaborazione, l'interpretazione e l'archiviazione dei dati spaziali 3D richiedono competenze specialistiche capaci di filtrare i dati grezzi rilevati sul campo e strutturarli per la gestione autonoma da parte di esperti in campi differenti.

La frequente necessità di predisporre la documentazione a scale differenti evidenzia l'importanza dell'integrazione di vari livelli di dettaglio in uno stesso progetto di documentazione (Fig. 154).

All'estremo superiore dello schema a piramide possiamo collocare i cataloghi, la forma più elementare di documentazione perché richiedono solo la



Fig. 154 - Scala/ Risoluzione/ Livello di dettaglio

“identificazione”.

Ogni bene deve essere, pertanto:

- riconosciuto;
- georiferito;
- memorizzato

Segue un'attenta e accurata indagine iconografica e storico-archivistica.

Alla base della piramide dello schema si trovano invece i modelli 3D ad alta risoluzione, nei quali il livello di dettaglio arriva a descrivere la tessitura muraria dei materiali che li costituiscono.

Nello spazio intermedio si collocano, in modo coordinato, ogni altra rappresentazione bi- o tridimensionale realizzata sulla base di dati metrici e attraverso un rilievo multi-risoluzione con tecniche di acquisizione multi-sensore.

Per la documentazione alla scala dell'edificio, quindi alla scala di una torre di San Gimignano, è stato importante rilevarne la geometria, i materiali e le tecniche costruttive, le deformazioni strutturali con l'obiettivo di definirne lo stato di salute, ovvero valutarne il comportamento strutturale, le dinamiche di eventuali dissesti, lo stato di conservazione e gli eventuali interventi di consolidamento e restauro. A questa scala di analisi l'osservazione diretta, con appunti grafici sul posto e rilievi di dettaglio, sono generalmente indispensabili.

Le torri, tuttavia, hanno richiesto anche una documentazione integrativa alla scala urbana: lo studio di ogni torre è strettamente relazionato con quello delle altre per schema tipologico, caratteri costruttivi, costitutivi e distributivi.

L'integrazione multi-scala è stata possibile grazie alla natura numerica dei dati acquisiti attraverso tecniche di rilievo metriche moderne: il modello digitale è sempre tridimensionale e da esso è sempre possibile derivare schemi strutturali e architettonici, prospetti e sezioni, curve di livello, modelli solidi.

IL RILIEVO DELLE TORRI

Delle settantadue torri e case-torri esistenti nel periodo d'oro del Comune, oggi ne restano sedici, con altre scapitozzate intravedibili nel tessuto urbano: Torri Gemelle dei Salvucci, Torre Pettini, Torre Chigi, Campanile della Collegiata, Torre della Propositura, Torre Grossa, Torre Rognosa, Torri degli Ardinghelli, Torre del Diavolo, Torre dei Becci, Torre dei Cugnanesi, Torre Coppi - Campatelli, Torre Cantagalli e Torre Moronti (Figg. 155, 156).

La più antica è la torre Rognosa, che è alta 51 metri, mentre la più alta è la Torre del Podestà, detta anche Torre Grossa, di 54 metri.

Un regolamento del 1255 vietò ai privati di erigere torri più alte della torre Rognosa (che all'epoca era la più alta), anche se le due famiglie più importanti, Ardinghelli e Salvucci, fecero costruire due torri poco più basse e di grandezza quasi uguale, per dimostrare la propria potenza.



Fig. 155 - San Gimignano, pianta di riferimento per la numerazione e la nomenclatura provvisoria delle sedici torri ancora integre



Fig. 156 - San Gimignano, vista delle torri con indicazione della nomenclatura

Il programma, a scala urbana, ha previsto:

- l'acquisizione metrica tridimensionale con laser scanner degli esterni di tredici torri (Torri Gemelle dei Salvucci, Torre Pettini, Torre Chigi, Campanile della Collegiata, Torre della Propositura, Torre Grossa, Torre Rognosa, Torri degli Ardinghelli, Torre dei Becci, Torre dei Cugnanesi, Torre Coppi - Campatelli) (Figg. 157, 158);

- la referenziazione di tutte le operazioni in un unico sistema di riferimento attraverso la rototraslazione delle scansioni in un sistema arbitrariamente scelto (Fig. 158);

- la realizzazione di modelli tridimensionali wireframe degli esterni di nove torri, con integrazione della linea di terra, della linea del tetto e dei profili sezione orizzontali intercettanti le aperture a tutti i livelli al fine di integrare il rilievo diretto degli interni (Torri Gemelle dei Salvucci, Torre Chigi, Campanile della Collegiata, Torre della Propositura, Torri degli Ardinghelli, Torre dei Becci, Torre dei Cugnanesi).

A scala dell'edificio, considerando come *'case study'* le Torri Salvucci e Ardinghelli:

- la restituzione grafica vettoriale bidimensionale;
- l'analisi delle trasformazioni costruttive;
- l'analisi della geometria per individuare il baricentro geometrico;
- la realizzazione di modelli 3D a supporto dell'analisi strutturale;
- il calcolo delle deformazioni.

[H] Elaborazioni grafiche a cura degli architetti F. Venturini e F. Zanetti, con il contributo del prof. F. Maraschi e con il coordinamento scientifico del prof. L. Giorgi dell'Università degli Studi di Firenze

Acquisizione metrica tridimensionale con laser scanner

Il lavoro on-site è stato condotto in cinque campagne di misura (Fig. 158, Tab. 3). L'acquisizione 3D degli esterni delle torri è stato sviluppato al fine di valutarne, con accuratezza adeguata ed uniforme, alcune caratteristiche formali e dimensionali di supporto al rilievo diretto degli interni e alla costruzione di una banca dati per la redazione delle tavole tematiche relative alle fasi costruttive, allo stato di conservazione e all'eventuale quadro fessurativo delle torri.

La prima campagna di rilevamento, volta all'acquisizione metrica delle Torri Gemelle dei Salvucci, si è svolta il 22 luglio 2011.

Le due torri, appartenute alla più importante famiglia guelfa della città, sono entrambe a base pressoché quadrata e con pochissime aperture; al pian terreno presentano portali strettissimi, sormontati da architrave o da arco a sesto acuto.



Fig. 158 - San Gimignano, pianta di riferimento con indicazione delle torri acquisite per ogni campagna di misura

	1° campagna	2° campagna	3° campagna	4° campagna	5° campagna
Periodo	luglio 2011	gennaio 2012	marzo 2012	aprile 2012	ottobre 2012
Strumenti	1 scanner 1 fotocamera	1 scanner 1 fotocamera	1 scanner 1 fotocamera	1 scanner 1 fotocamera	1 scanner 1 fotocamera
Persone	2	2	2	2	2
Giornate	1	1	1	1	1
Postazioni di scansione	9	5	8	5	14
Punti	95 milioni	140 milioni	208 milioni	510 milioni	566 milioni
Dimensioni files	6 GB	8 GB	9 GB	12 GB	9 GB

Tab. 8. Tabella riassuntiva delle campagne di misura on-site

La rapidità della strumentazione impiegata, il laser scanner distanziometrico a differenza di fase HDS6000 (*Leica Geosystems*), ha consentito di raccogliere in maniera automatica grandi quantità di dati in tempi di acquisizione ridotti pur producendo una descrizione completa e dettagliata dell'oggetto indagato.

Il passo di campionamento è stato impostato al momento dell'acquisizione ed è espresso solitamente con un valore angolare oppure con una distanza lineare riferita ad una superficie sferica concentrica allo strumento (*Tab. 9*).

Trattandosi della prima campagna di misura, si è ritenuto opportuno fare alcune prove di acquisizione a differente risoluzione per calibrare quella più adeguata al raggiungimento degli obiettivi prefissati tenendo presente, in particolare, che la densità dei punti varia con la distanza e con l'inclinazione della superficie da rilevare rispetto allo strumento (*Figg. 159, 160, 161, 162, 163*).

In particolare, prendendo in esame distanze superiori a 25 m vista l'altezza delle Torri, sono state valutate le caratteristiche tecniche di due livelli di risoluzione:

Alta risoluzione (HR)

Risoluzione 0.016 m - 50 000 000 punti - 200 Mb

Altissima risoluzione (FHR)

Risoluzione 0.005 m - 200 000 000 punti - 800 Mb

	Livello di risoluzione				
	Ultra alta	Altissima	Alta	Media	Anteprima
Incrementi	H = 0.009° V = 0.009°	H = 0.018° V = 0.018°	H = 0.036° V = 0.036°	H = 0.072° V = 0.072°	H = 0.228° V = 0.228°
Distanza dei punti oltre 25 m	H = 3.9 mm V = 3.9 mm	H = 7.9 mm V = 7.9 mm	H = 15.9 mm V = 15.9 mm	H = 31.4 mm V = 31.4 mm	H = 125.7 mm V = 125.7 mm
Pixel/riga	40'000	20'000	10'000	5'000	1'250
Righe	20'000	10'000	5'000	2'500	625
Grandezza del file di dati per HDS6000 (compreso)	ca. 2'400 MB	ca. 800 MB	ca. 200 MB	ca. 50 MB	ca. 3 MB
Durata della scansione	26 min 40 sec	6 min 44 sec	3 min 22 sec	1 min 40 sec	0 min 25 sec

Tab. 9 - Tabella nominale, fornita dal costruttore, del passo della maglia di punti acquisita a seconda della distanza dall'oggetto e della risoluzione impostata

Il test ha permesso di verificare l'adeguatezza dei due livelli di campionamento per l'obiettivo preposto: in particolare, laddove è possibile retrocedere rispetto al prospetto da rilevare, si può adottare una risoluzione di scansione altissima (HHR) per assicurare una maglia di punti, per le parti sommitali, compresa tra 0.02 m e 0.05 m (*Figg. 161, 162*); laddove, invece, le vie strette obbligano prese molto scorciate, è opportuno ridurre il livello di risoluzione per non generare inutilmente dimensioni di files più grandi di quelle necessarie alla descrizione del manufatto. Infatti, se da un lato i problemi legati alla distanza strumento - oggetto possono essere risolti attraverso impostazioni strumentali (quindi diminuendo lo step angolare tra uno spot laser e l'altro); dall'altro, i problemi legati alla forte inclinazione del raggio laser sulla superficie, non possono essere ovviati attraverso parametri strumentali ma fisici (e quindi modificando la posizione di presa in modo da garantire un angolo di incidenza del raggio laser sulla superficie più prossimo possibile ad un angolo retto, *Figg. 159, 160*).

Sono state eseguite 9 scansioni da postazioni differenti per avere una documentazione esaustiva di tutti i prospetti delle torri. Sulla scena sono state disposti 20 target cartacei necessari al successivo allineamento delle singole range maps in un unico sistema di riferimento. Il modello complessivo di punti, realizzato dall'allineamento delle singole range maps, presenta un livello di dettaglio sufficiente a descrivere la volumetria delle torri (*Fig. 163*): nelle parti basse si ha una maglia di punti pari a 0.005 - 0.015 m per entrambi i prospetti; nelle parti alte, invece, la densità dei punti si dirada fino a 0.015 - 0.030 m su piazza delle Erbe e 0.030 - 0.050 m su via San Matteo.

Scansione 06 (HR)

≈ 34 milioni punti

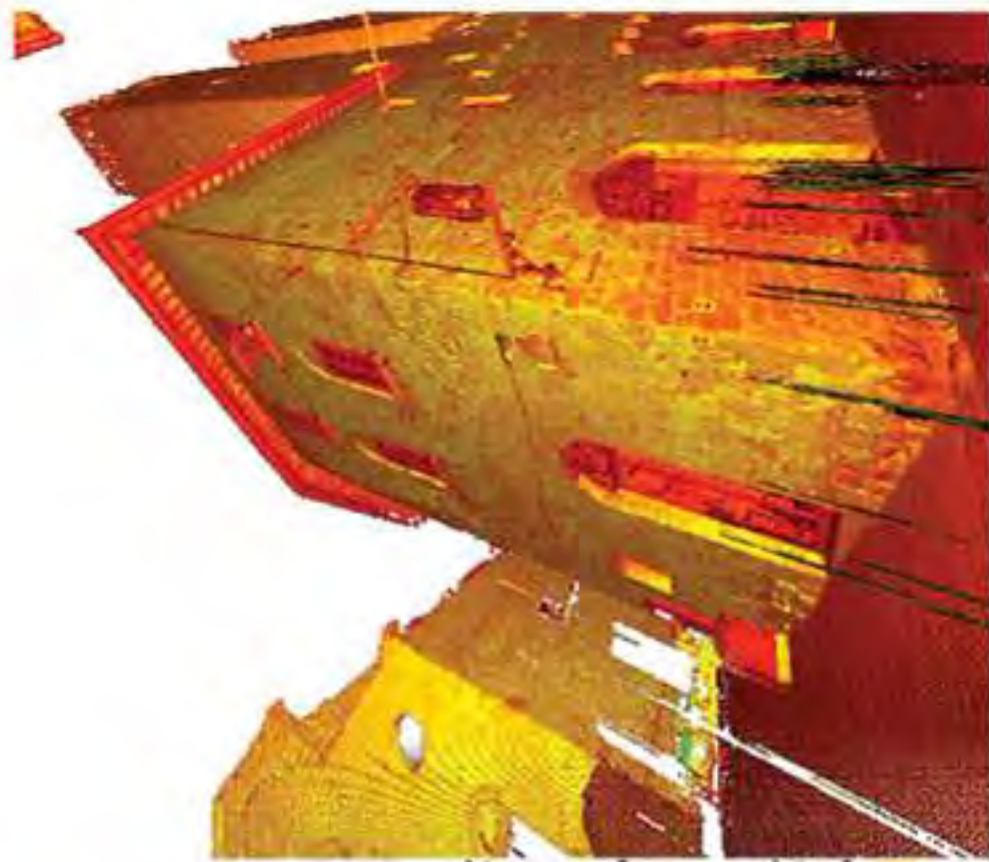


Fig. 159 - Scansione 06 (HR). Vista del modello di punti con, in alto a destra, il relativo step angolare corrispondente un livello di risoluzione alto

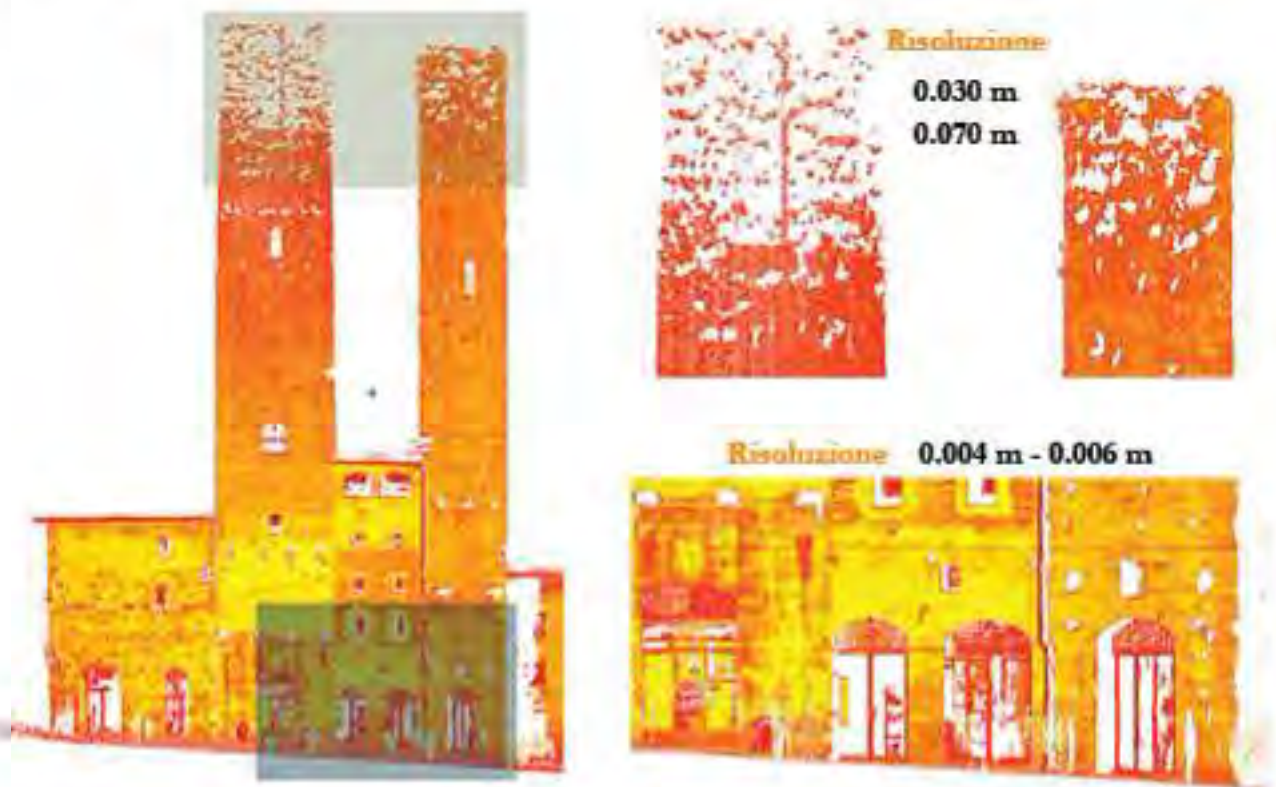


Fig. 160 - Scansione 06 (HR). In alto, vista zenitale del prospetto delle Torri Salvucci su via San Matteo con indicazione del differente passo di campionamento tra la parte bassa e la parte alta. In basso, sistema di riferimento sferico, proiettato sul piano, nel quale sono acquisiti i dati grezzi

Scansione 02 (HHR)
≈ 131 milioni punti



Fig. 161 - Scansione 02 (HHR). Vista del modello di punti cm, in alto a destra, il relativo step angolare corrispondente ad un livello di risoluzione abissiano

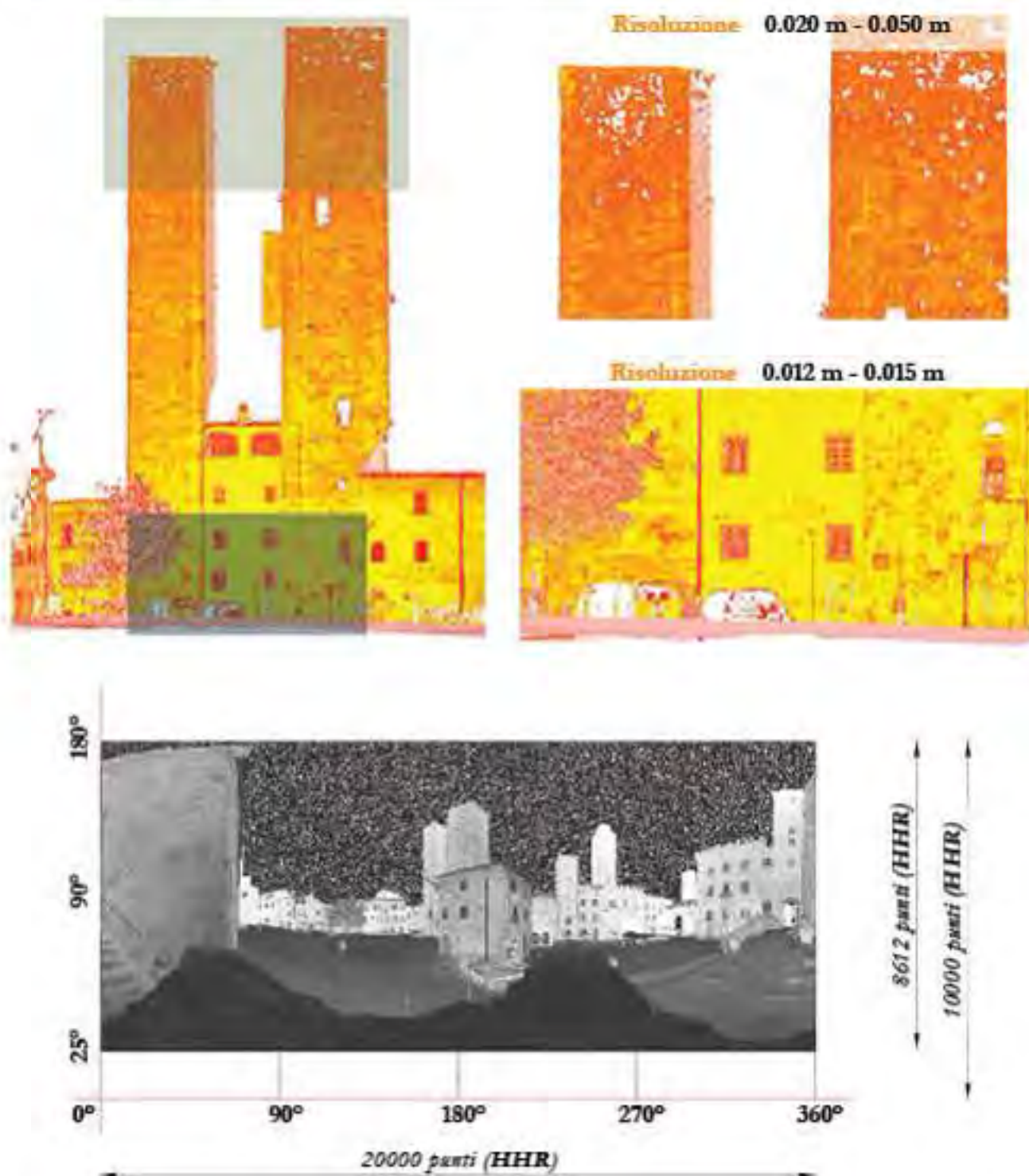


Fig. 162 - Scansione 02 (HHR). In alto, vista zenitale del prospetto delle Torri Salvucci su piazza delle Erbe con indicazione del differente passo di campionamento tra la parte bassa e la parte alta. In basso, sistema di riferimento sferico, proiettato sul piano, nel quale sono acquisiti i dati grezzi

Piazza delle Erbe



Via S. Matteo



Fig. 163 - Vista del modello complessivo di punti dato dalla registrazione di tutte le sezioni. A destra, si viene il differente passo di campionamento tra le porzioni sommitali delle torri su piazza delle Erbe e su via S. Matteo. A parità di risoluzione angolare, il progetto di via S. Matteo presenta numerose "zone d'ombra" causate dalla forte inclinazione della superficie rispetto allo strumento

Referenziazione in un unico sistema di riferimento

Le torri di San Gimignano, come già detto, sono strettamente interconnesse per schema tipologico, caratteri costruttivi, costitutivi e distributivi.

La referenziazione comune è stata realizzata rototraslando tutti i datasets, acquisiti nelle cinque campagne di misura, in un sistema di riferimento prestabilito con origine in piazza delle Erbe (Figg. 164, 165).



Fig. 164 - San Gimignano, vista zenitale del modello complessivo di punti. In arancione, le torri acquisite e in giallo, le torri da acquisire. Si noti la posizione dell'origine del sistema di riferimento in piazza delle Erbe.

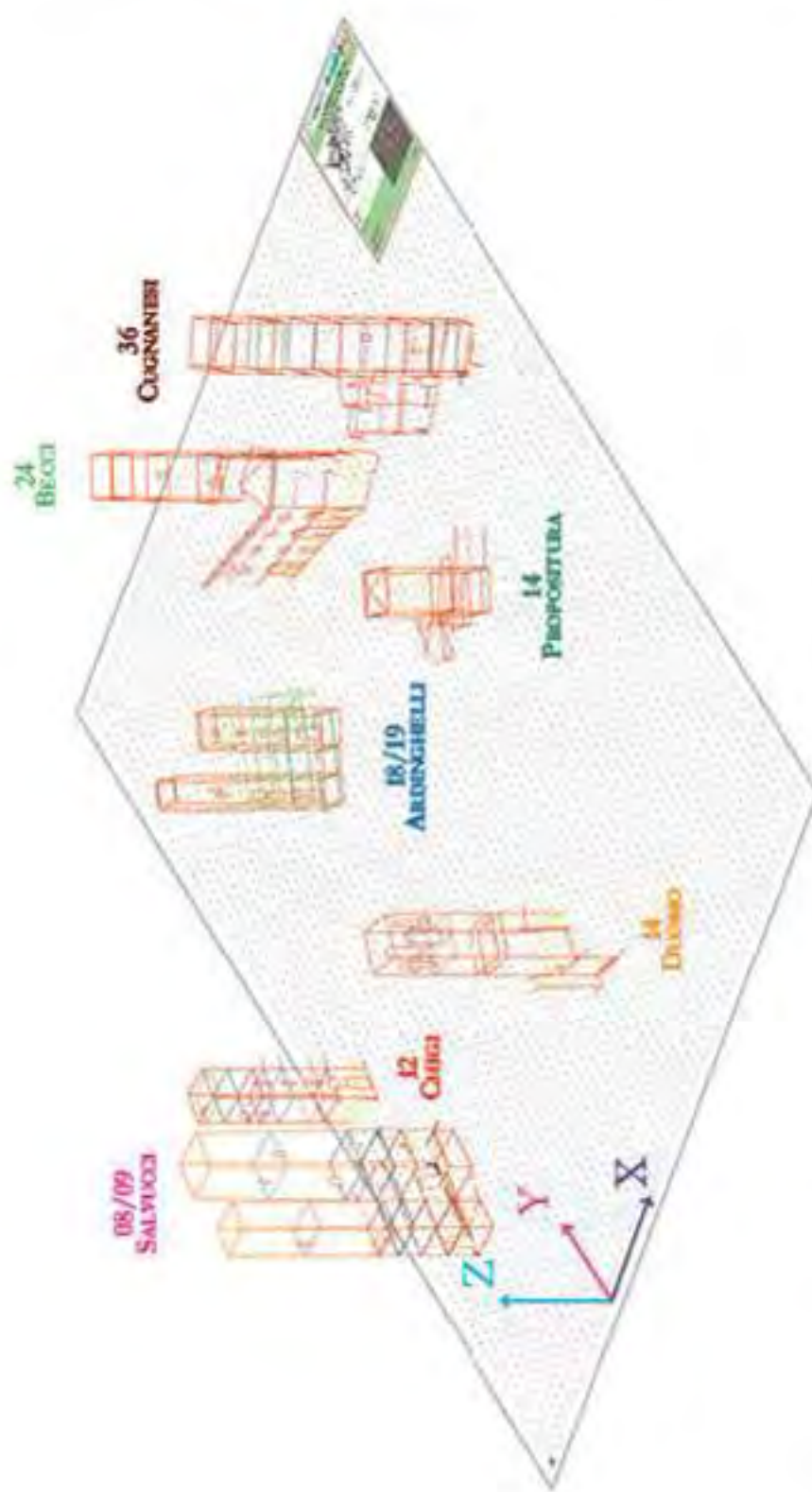


Fig. 165 - San Gimignano, vista del modello 3D wireframe degli edifici e storni dalle torri referenziate in un unico sistema di riferimento

LA RESTITUZIONE GRAFICA PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA

La restituzione metrica delle torri è stata svolta, in un primo momento, in modo indipendente e parallelo dai due gruppi di ricerca. Sono stati previsti:

- per gli interni, la redazione di elaborati bidimensionali classici (sezioni orizzontali e verticali, *Figg. 168, 169, 177, 178*);
- per gli esterni, da un lato, l'estrazione di profili sezione tridimensionali in corrispondenza di tutte le aperture esterne per consentire l'assemblaggio con i dati interni; dall'altro, la realizzazione di modelli wireframe 3D capaci di sintetizzare opportunamente l'andamento volumetrico per supportare adeguatamente gli strutturisti coinvolti (gruppo di ricerca coordinato dal prof. G. Bartoli del DiCeA dell'Università degli Studi di Firenze) nell'elaborazione dei Modelli agli Elementi Finiti (FEM, *Fig. 166, 176*).

Gli elaborati, in un momento successivo, sono stati integrati per verificarne la correttezza e costruire una base metrica di riferimento per le analisi successive (*Fig. 174*).

Le torri acquisite, con entrambe le tecniche di rilievo, sono:

- 08/09, Torri Gemelle Salvucci;
- 10, Torre Pettini;
- 12, Torre Chigi;
- 14, Campanile del Duomo;
- 15, Torre della Propositura;
- 16, Torre Grossa;
- 17, Torre della Rognosa;
- 18/19, Torri Ardinghelli;
- 24, Torre Becci;
- 36, Torre Cugnanesi;
- 37, Palazzo Coppi/Campatelli

Si riportano, a titolo esemplificativo, le restituzioni grafiche delle torri delle più importanti famiglie di San Gimignano: le guelfe Torri Gemelle Salvucci e le ghibelline Torri Ardinghelli.

Torri Gemelle Salvucci

Le torri sono separate da un corpo di fabbrica di dimensioni limitate.

La *torre nord* (Figg. 167 - 173) ha una pianta rettangolare di dimensioni pari a circa 500 cm (largh.) x 600 cm (lungh.) alla base, e circa 480 cm (largh.) x 590 cm (lungh.) alla sommità. Lo spessore delle murature perimetrali è pari a 205 cm. Nei vari livelli sono state rinvenute le mensole lapidee su cui si appoggiavano i dormienti che sostenevano i solai lignei, collegati con ogni probabilità da scale in legno a pioli.

La *torre sud* (Figg. 167 - 173) ha una pianta quadrata di circa 700 cm alla base, uno spessore murario di 235 cm, un vano interno quadrato con lato di 242 cm. Le sezioni verticali, longitudinale e trasversale, e le piante eseguite su quattordici livelli hanno messo in luce che il lato interno, caratterizzato da progressive riseghe murarie, si riduce in sommità; il lato esterno, invece, subisce una rastremazione analoga a quella della torre nord con un lato di circa 655 cm in sommità.

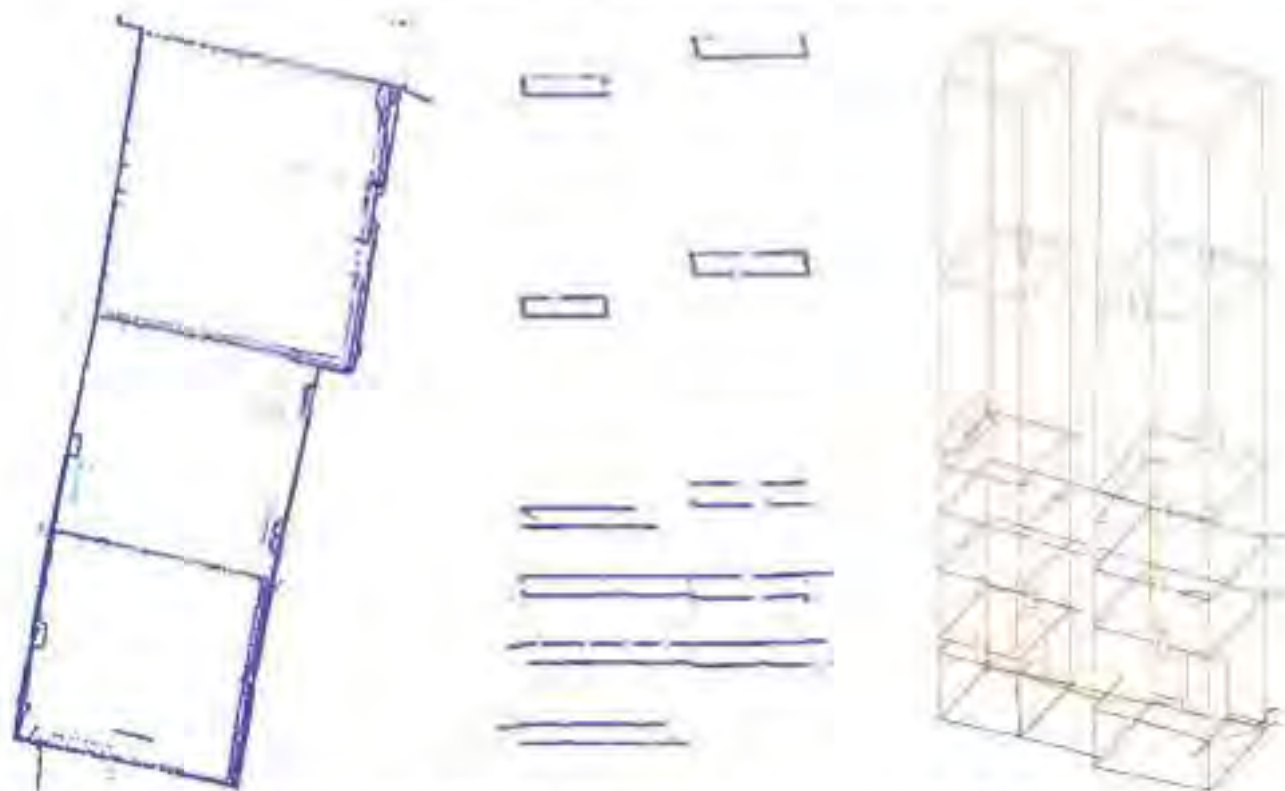


Fig. 166 - San Gimignano, Torri Salvucci. Profili sezione orizzontali, slice di punti, del modello 3D. A sinistra, vista zenitale; al centro, vista assonometrica. A destra, vista del modello wireframe 3D integrato con i profili sezione orizzontali vettorializzati e con le aperture esterne



Fig. 167 - San Gimignano, Torri Salvisci. Vista fotografica dei prospetti su piazza delle Erbe

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

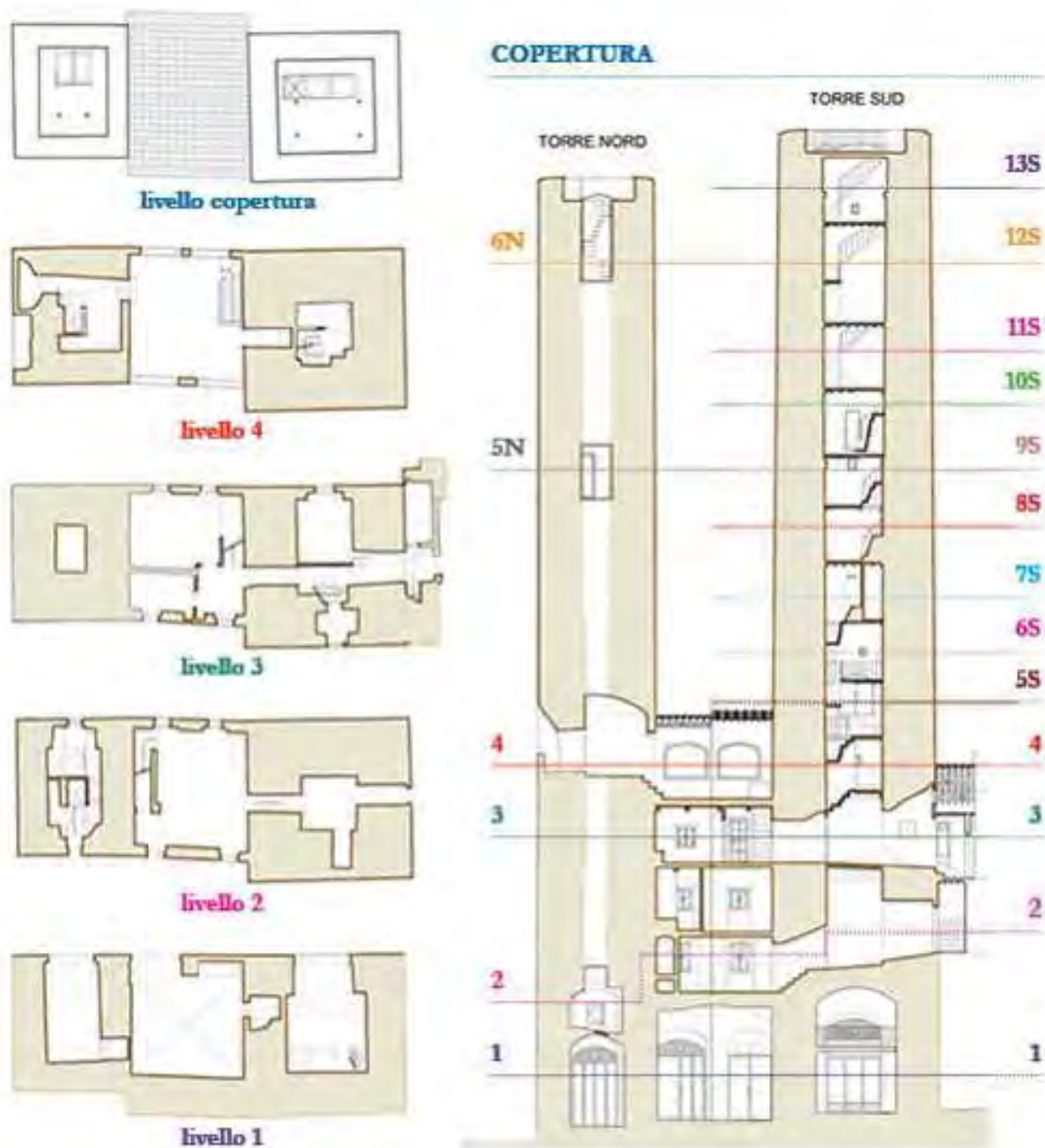


Fig. 168 - San Gimignano, Torri Salvucci. A sinistra, sezioni orizzontali a cinque livelli; a destra, sezioni verticali longitudinali delle due torri con, in proiezione, la controfacciata su via San Matteo. Originali in scala 1:50 [41]

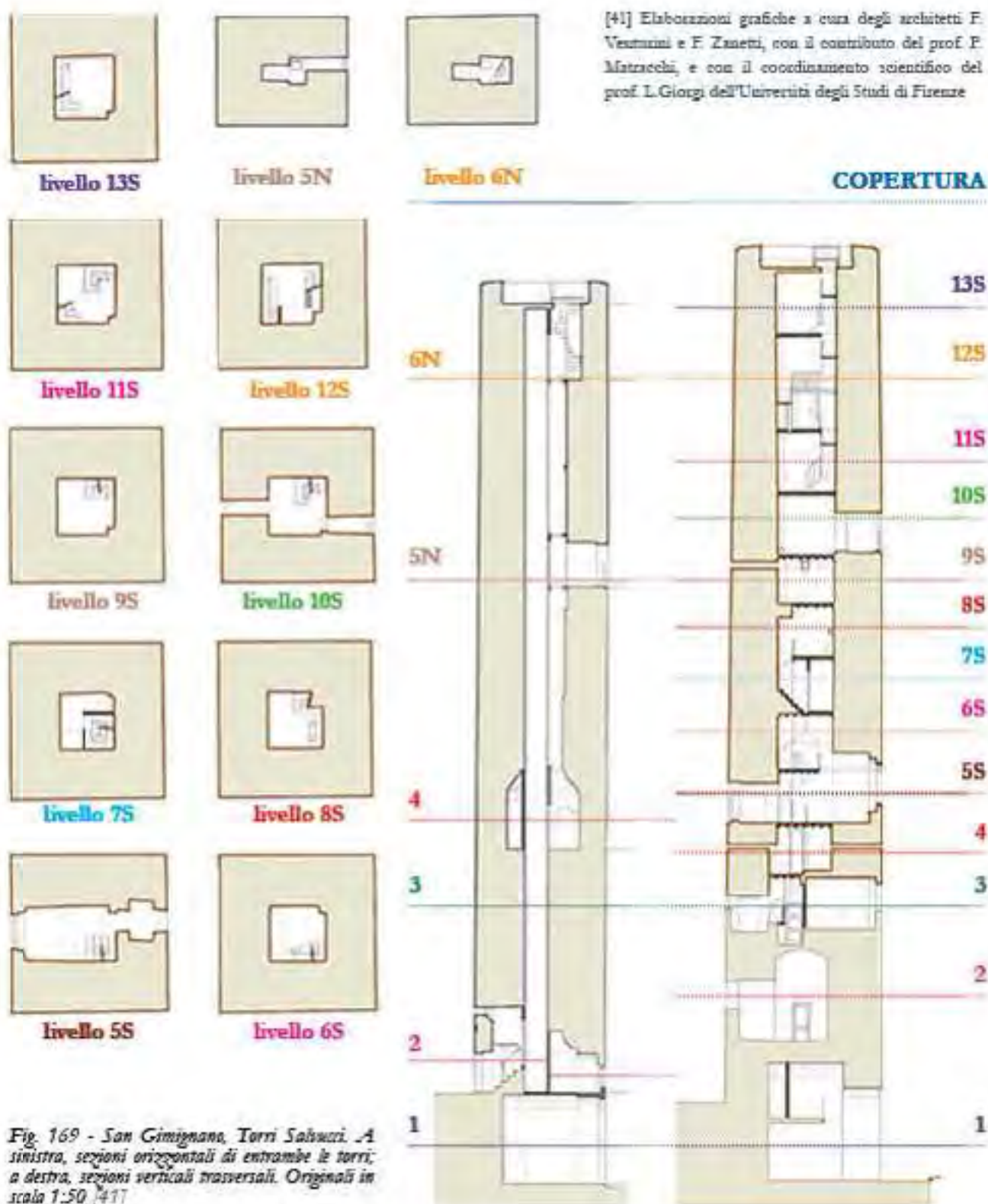
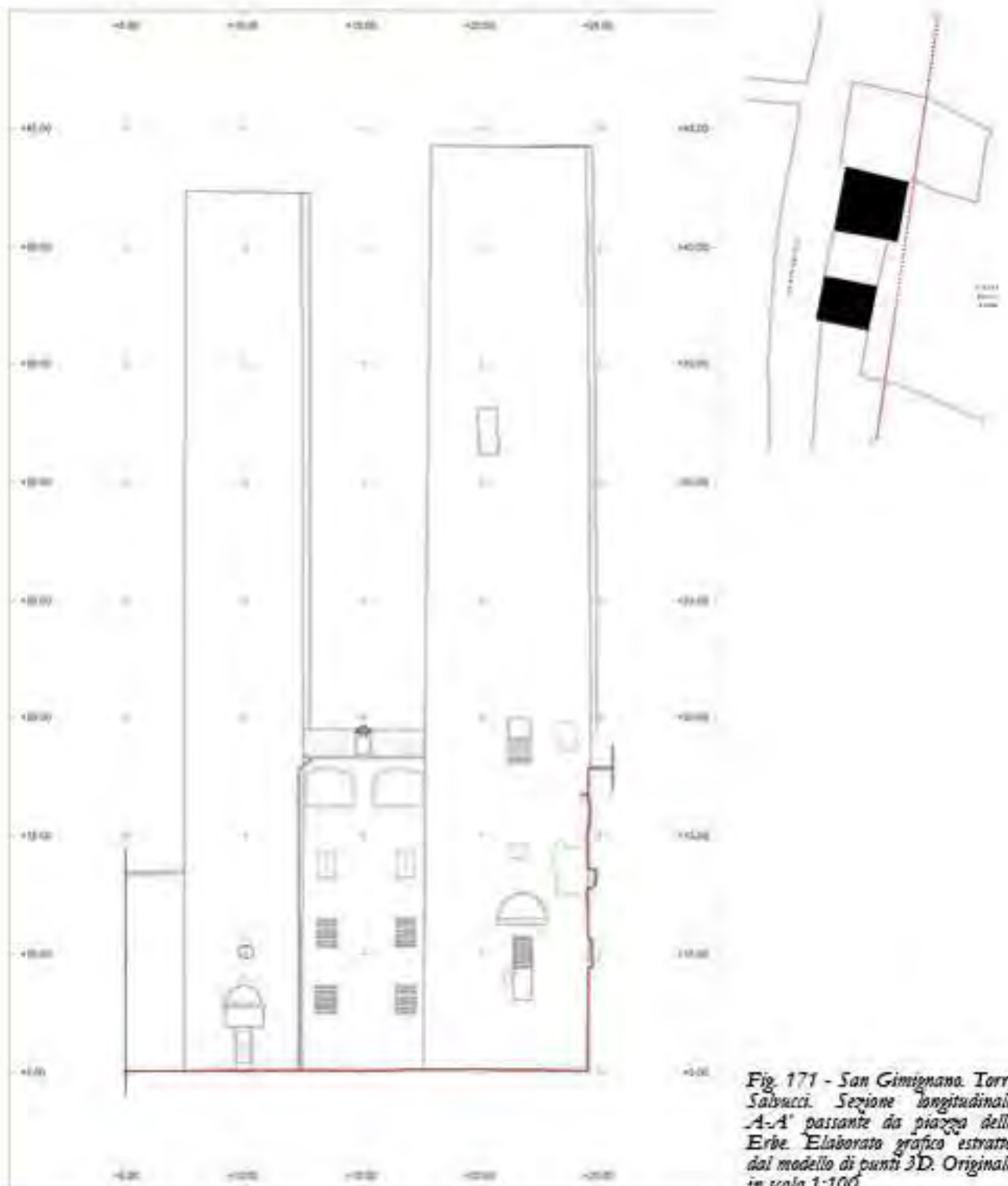


Fig. 169 - San Gimignano, Torre Salvucci. A sinistra, sezioni orizzontali di entrambe le torri; a destra, sezioni verticali trasversali. Originali in scala 1:50 [41]



Fig. 170 - San Gimignano. Planimetria generale della porzione di centro storico comprendente le Torri Salvucci con le attigue piazze della Erbe, via San Matteo e piazza Duomo. Elaborato grafico estratto dal modello di punto 3D. Originale in scala 1:100



**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

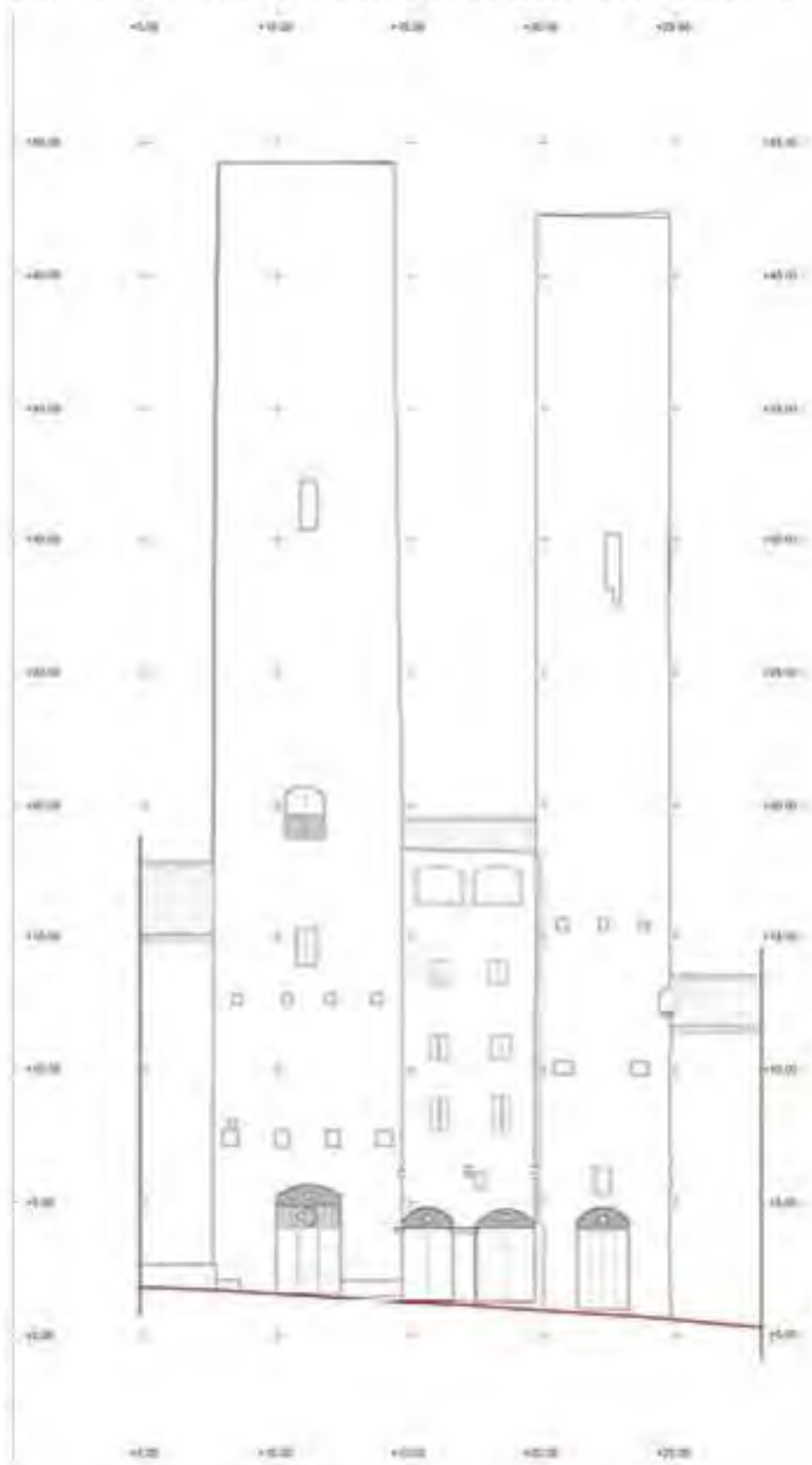
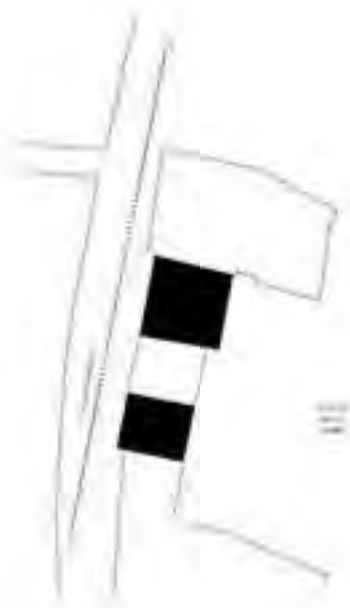


Fig. 172 - San Gimignano. Torre Salvucci. Sezione longitudinale B-B' passante da via San Matteo. Elaborato grafico estratto dal modello di punti 3D. Originale in scala 1:100

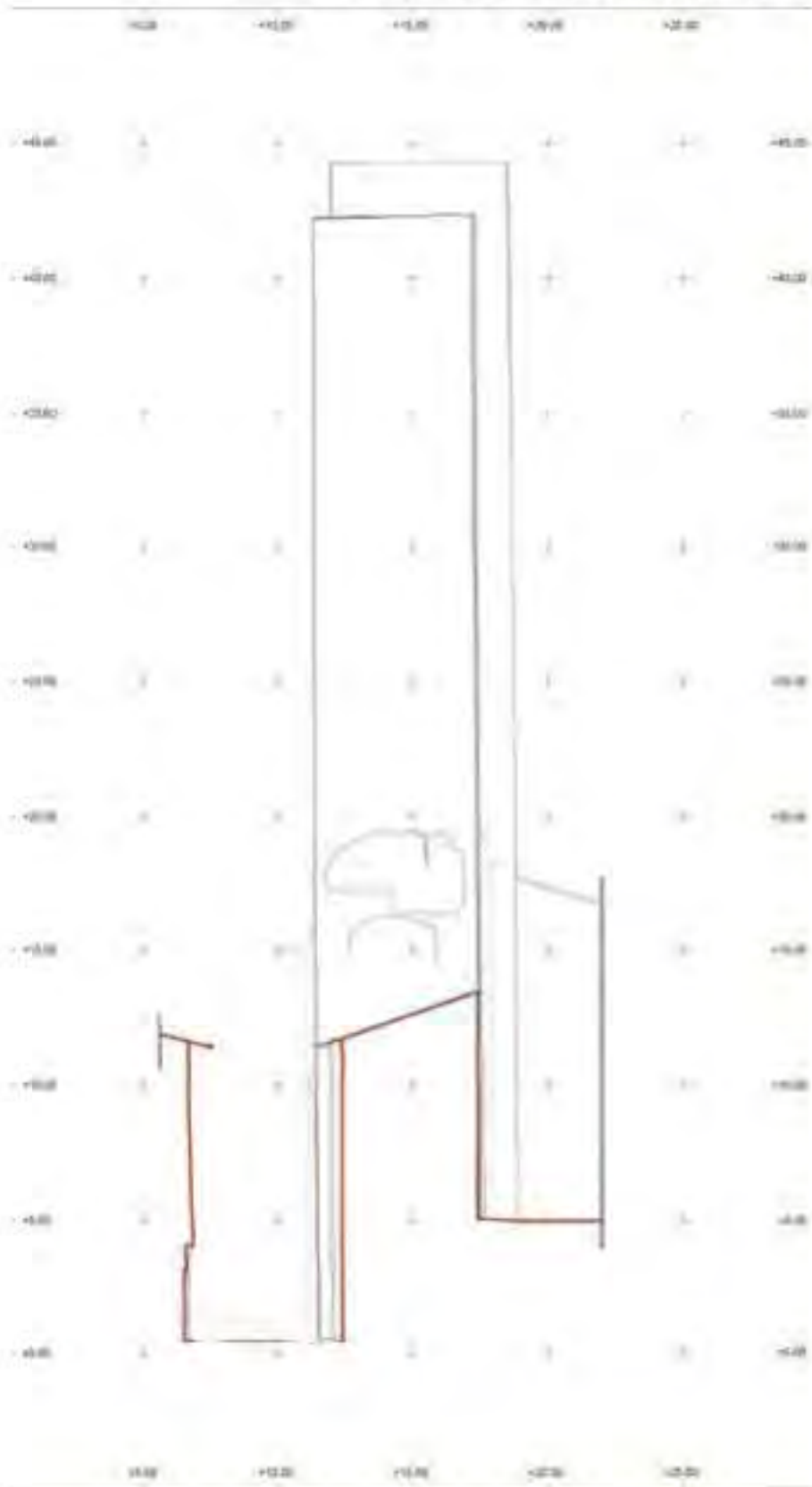


Fig. 173 - San Gimignano. Torre Salvucci. Sezione trasversale E-E'. Elaborato grafico estratto dal modello di punti 3D. Originale in scala 1:100

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

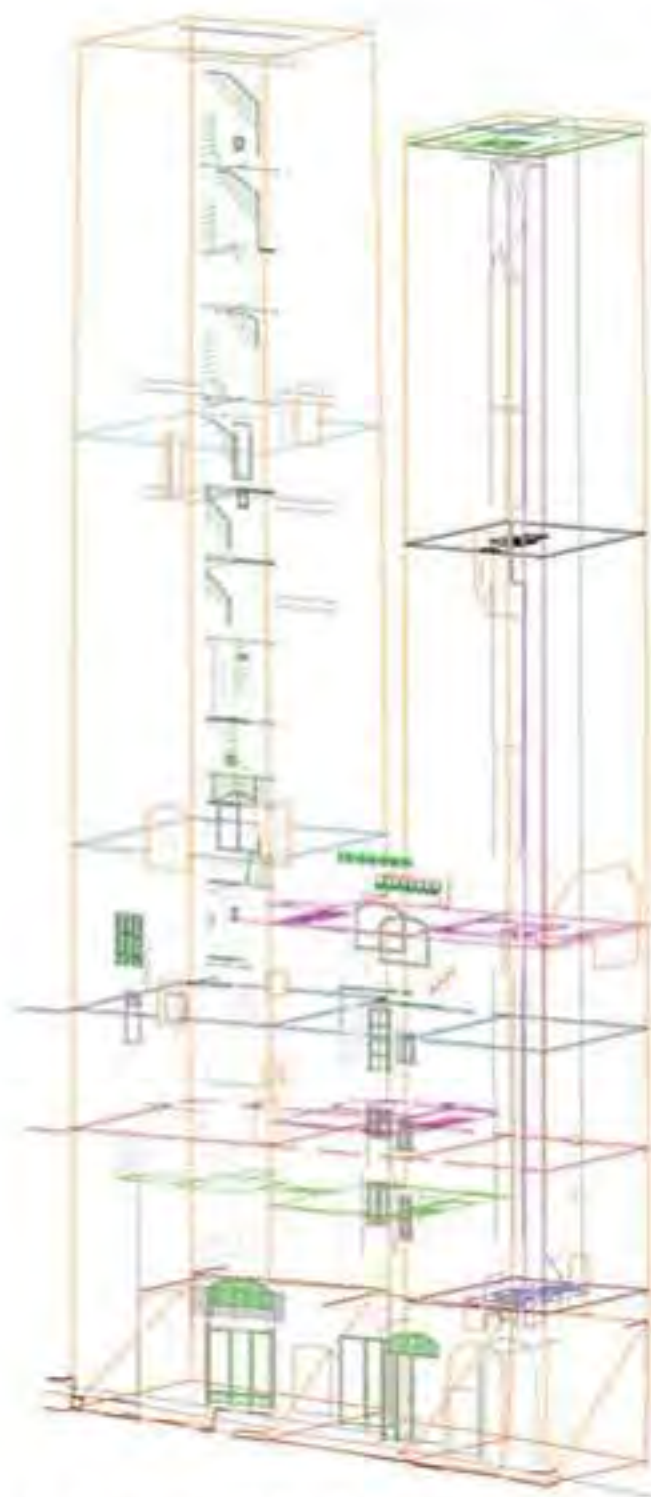


Fig. 174 - San Gimignano. Torre Sabucci. Integrazione del modello wireframe tridimensionale, realizzato a partire dalla banca dati 3D, con le sezioni orizzontali e verticali degli interni

Torri Ardinghelli

Le due torri degli Ardinghelli, in angolo su piazza della Cisterna e piazza del Duomo, risalgono al XIII secolo e appartenevano alla più importante famiglia ghibellina di San Gimignano, in lotta contro i guelfi Salvucci.

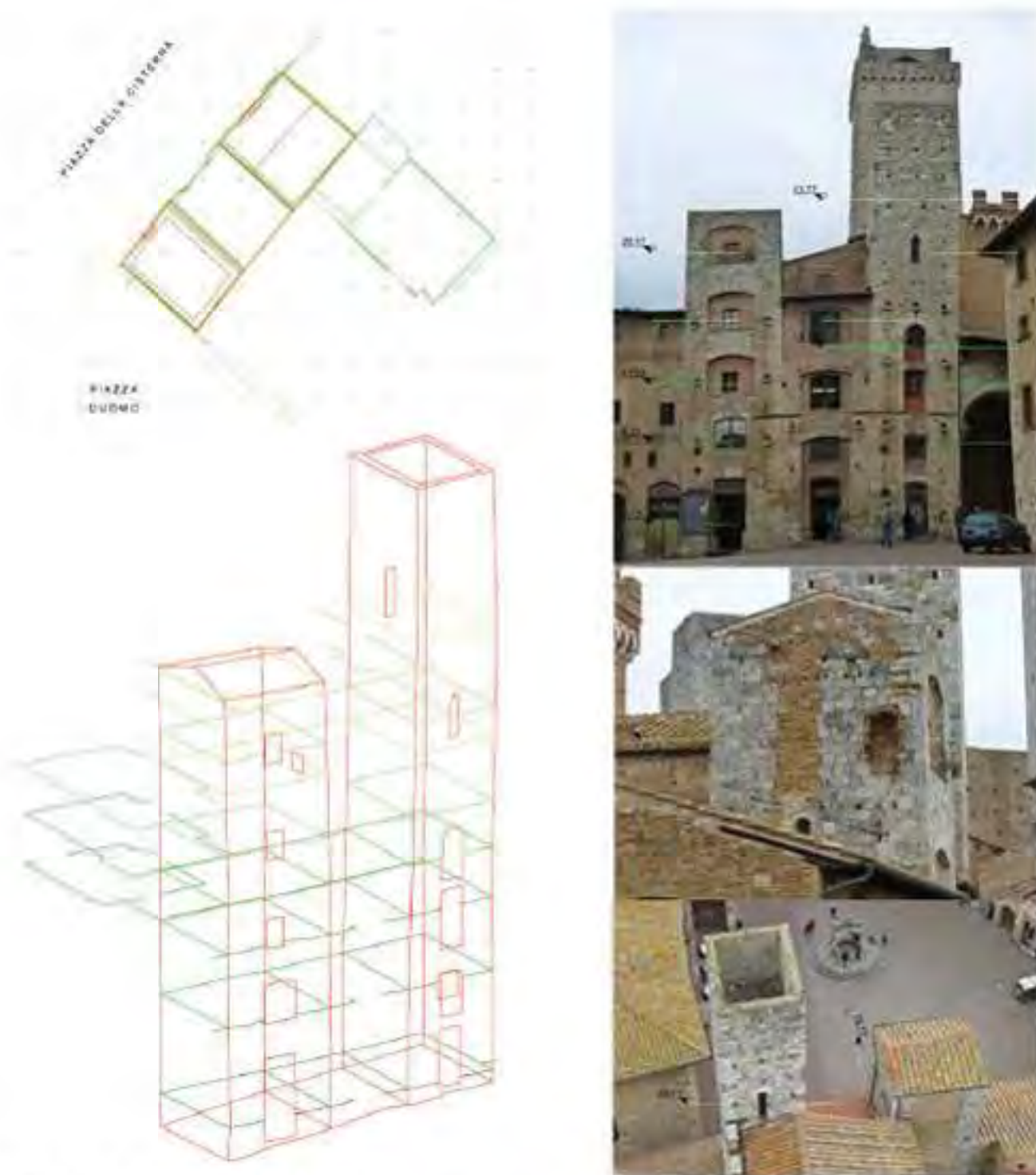
Nonostante un espresso divieto del 1255, che impediva alle famiglie di costruire torri più alte della torre del palazzo comunale, la Torre Rognosa alta 54 metri, gli Ardinghelli costruiscono due torri poco più basse di quasi uguale grandezza, per rispondere alle poco lontane torri gemelle dei Salvucci, anch'esse "fuori legge" e per dimostrare la propria potenza. Per questo furono più tardi scapitozzate ed oggi si erigono per un'altezza di circa la metà del fabbricato originale.

Le due torri, sebbene entrambe a base quadrilatera, si presentano piuttosto diverse: quella nord è più stretta e possiede un aspetto più severamente medievale caratterizzato da bozze regolari a vista, poche strette monofore e una fessitoia; quella sud, invece, ha una superficie più estesa con finestre ad arco molto ampie, oggi ridimensionate dai tamponamenti in laterizio. Entrambe sono scandite da buche pontate ad altezze regolari (Figg. 175 - 178).



Fig. 175 - San Gimignano. Torri Ardinghelli. Modello di punti 3D visualizzato in falsi colori

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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



*Fig. 176 - San Gimignano. Torri Ardinghelli.
A sinistra, modello wireframe 3D, integrato con i profili sezione orizzontali passanti dalle aperture esterne (in alto, vista zenitale; in basso, vista assonometrica). A destra, foto con indicazione della posizione delle sezioni orizzontali*

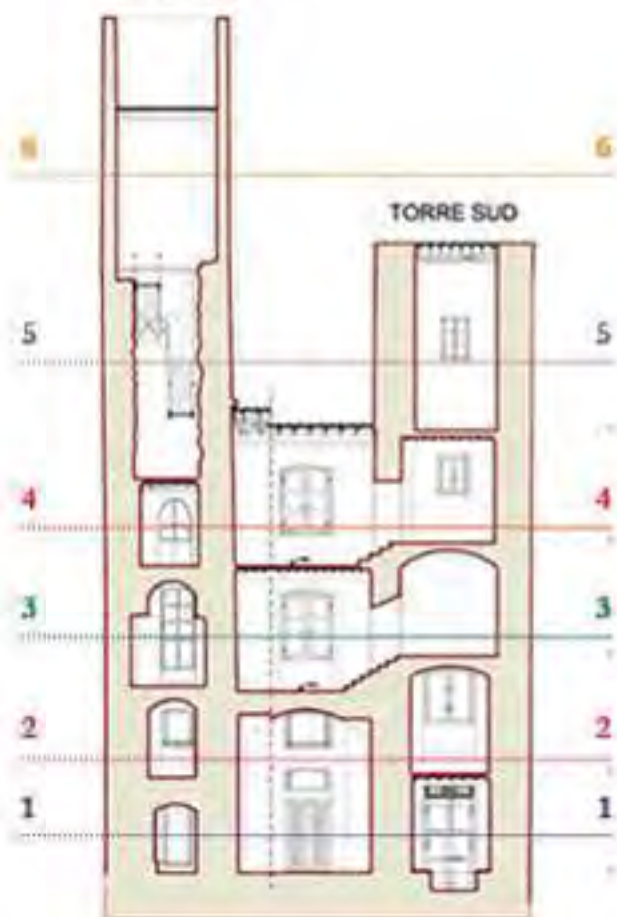


livello 6



livello 5

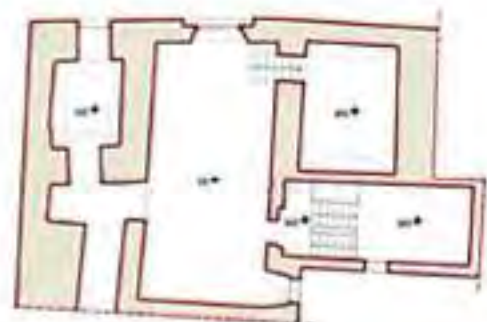
TORRE NORD



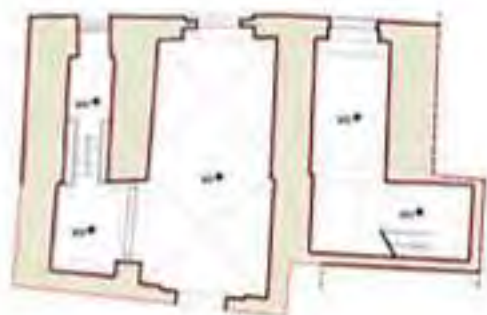
TORRE SUD



livello 4



livello 3



livello 2



livello 1

Fig. 177 - San Gimignano, Torri Ardinghelli. A sinistra, sezione verticale longitudinale; a destra, sezioni orizzontali di entrambe le torri [4].

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

[41] Elaborazioni grafiche a cura degli architetti F. Venturini e F. Zaveri, con il contributo del prof. F. Mataracci, e con il coordinamento scientifico del prof. L. Giorgi dell'Università degli Studi di Firenze

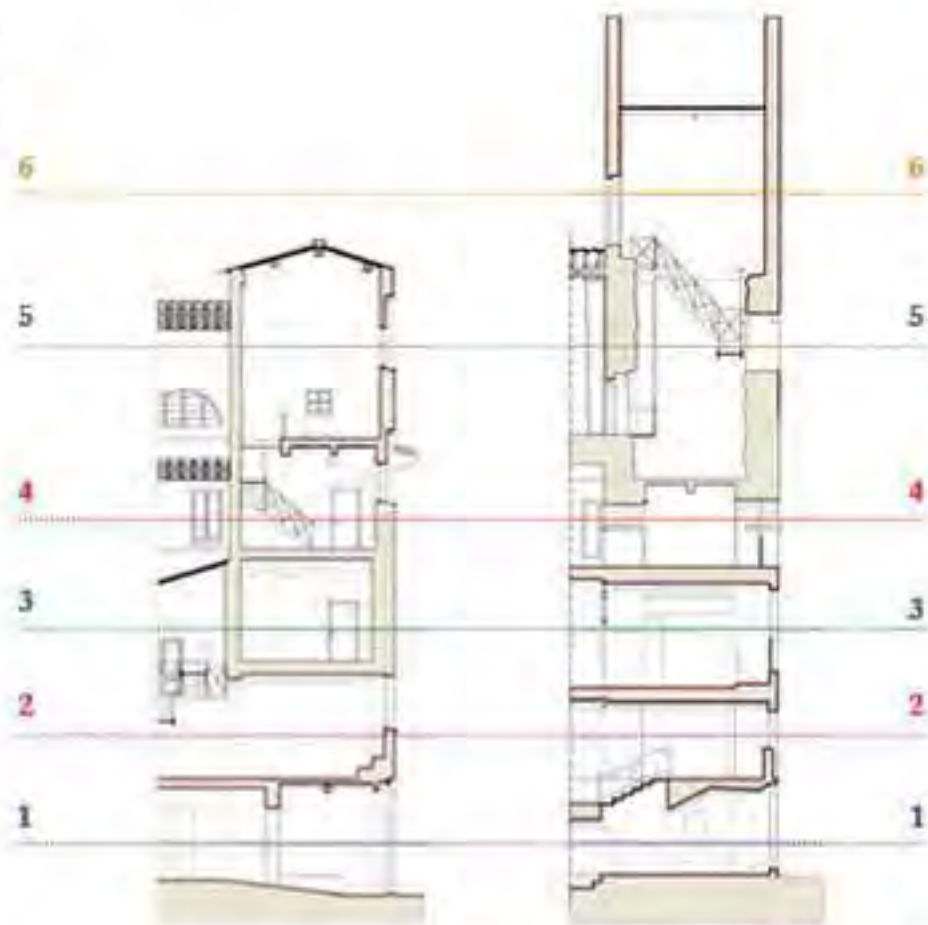


Fig. 178 - San Gimignano, Torri Ardinghelli. Sezioni verticali trasversali di entrambe le torri; a sinistra, la torre sud; a destra, la torre nord [41]

ANALISI DELLE TRASFORMAZIONI COSTRUTTIVE

Gli elaborati grafici hanno permesso di evidenziare le trasformazioni costruttive significative di entrambe le coppie di torri, quali assottigliamenti o completa demolizione delle murature perimetrali, aggiunte e sopralzi, manifeste soprattutto nelle Ardinghelli.

Le Torri Salvucci sono state oggetto di una sensibile riduzione della massa muraria a livello di via San Matteo, per ricavare gli spazi necessari alle attività commerciali, e ai livelli subito superiori per adeguarsi ad abitazione (Fig. 179).



Fig. 179 - San Gimignano, Torri Salvucci. Analisi delle trasformazioni costruttive, sezione verticale longitudinale delle torri con, in proiezione, la controfacciata su via San Matteo. In giallo le murature demolite [41]

Le Torri Ardinghelli, invece, presentano grandi trasformazioni rispetto l'antica struttura medioevale originaria (Fig. 180). Il primo intervento significativo si ha nel 1870 quando, a seguito del terremoto del 1869, le torri sono ridotte alla stessa quota. Non sappiamo quando si siano verificati i primi dissesti che hanno portato le torri all'assetto attuale di diramicamento, ma questo certo non impedì la costruzione, nel 1920 circa, di un sopralzo della torre nord (Fig. 181).

Entrambe le torri, a livello stradale, hanno compagini murarie laterali originarie dello spessore di 150 cm (la nord) e 130 cm (la sud).

Nella torre nord, al terzo livello coperto da volta a botte, sono state demolite le murature dei fianchi per ricavarne un vano di maggiore ampiezza. A partire dal quinto livello, tutto il perimetro interno della muratura è stato lacerato per realizzare i conci squadri necessari alla costruzione del sopralzo della torre.



Fig. 180 - San Gimignano, Torri Ardinghelli. A sinistra, le torri nella loro struttura originaria (De Fleury R., *La Toscane au moyen âge, lettres sur l'architecture civile et militaire en 1400*, Parigi, A. Morel, 1874). Al centro, foto del 1915-1920 con vista della torre nord prima del rialzamento [Archivio storico Alinari, Edizioni Brogi, numero identificativo BGA-F-013553-0000]. A destra, foto dello stato attuale

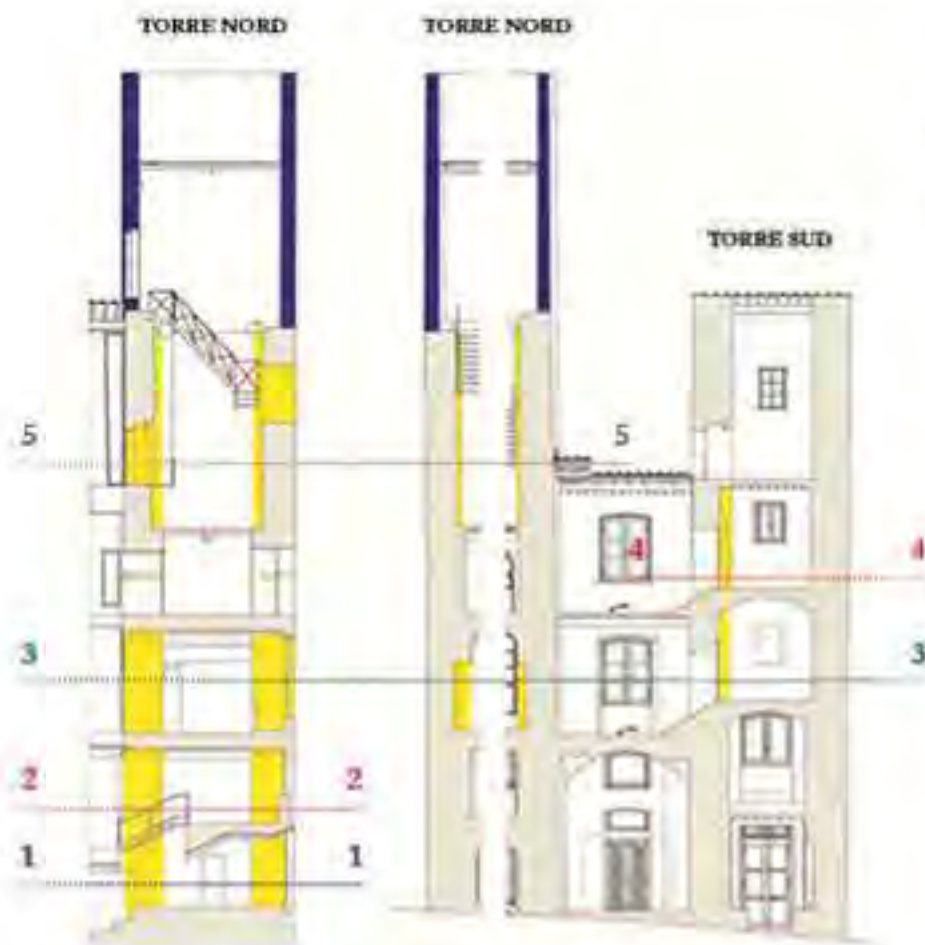


Fig. 181 - San Gimignano, Torri Ardinghelli. Analisi delle trasformazioni costruttive: a sinistra, sezione verticale trasversale della torre nord; a destra, sezione verticale longitudinale di entrambe le torri. In giallo le murature demolite, in blu le ricostruzioni [41]

Nella torre sud, i prospetti orientale e occidentale appaiono completamente trasformati: la prima ha grandi aperture realizzate, con ogni probabilità, a seguito di un restauro; la seconda presenta importanti demolizioni e, ai livelli più alti, la sostituzione con un muro in mattoni (a tre teste nel primo tratto e a due teste nel tratto più elevato).

[41] Elaborazioni grafiche a cura degli architetti F. Venturini e F. Zanetti, con il contributo del prof. P. Matracchi, e con il coordinamento scientifico del prof. L. Giugli del'Università degli Studi di Firenze

ANALISI SULLA GEOMETRIA DEL MODELLO 3D

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

L'analisi di verticalità delle coppie di torri è stata inizialmente eseguita esportando delle *slices* del modello di spessore ridotto (1 cm) e ad intervalli di quota di circa 5 m, per le Salvucci, e variabili per le Ardinghelli. La doppia simmetria della struttura ha permesso di definire il baricentro geometrico di ogni sezione nello spazio 3D (Figg. 182, 184). L'andamento dell'asse, ottenuto collegando i baricentri, ha evidenziato:

- per le **Torri Salvucci**, uno sbandamento trascurabile in direzione Nord-Sud (distanza massima inferiore ai 2 cm per la torre nord; 4 cm per la torre sud); mentre nella direzione Est è stato riscontrato, per la torre sud, un lieve scostamento dalla verticalità (distanza massima 8 cm), per la torre nord uno scostamento poco superiore a 18 cm (Fig. 183). Lo strapiombo così misurato rappresenta la distanza planimetrica tra il baricentro della prima sezione orizzontale (quota di 9 m) e la sommità delle torri (42,38 m per la nord e 44,24 m per la sud).

- per le **Torri Ardinghelli**, uno sbandamento trascurabile in direzione Est-Ovest (distanza massima inferiore ai 6 cm); mentre, nella direzione Nord-Sud, è stato riscontrato un notevole scostamento dalla verticalità per entrambe le torri, ma in verso opposto: per la torre sud uno scostamento poco superiore ai 18 cm in direzione sud; per la torre nord uno scostamento poco superiore ai 26 cm in direzione nord (Fig. 185). Lo strapiombo così misurato rappresenta la distanza planimetrica tra il baricentro della prima sezione orizzontale (quota di 3,73 m) e la sommità delle torri (30,76 m per la nord e 23,77 m per la sud escluse le falde del tetto).

La ricostruzione della curvatura dell'asse baricentrico può essere incrementata attraverso la definizione di sezioni ad un passo più ravvicinato senza complicare la procedura di analisi. In rapporto ai brevi tempi di rilievo (20% del totale) ed elaborazione (80% del totale), tale metodo di indagine e restituzione delle caratteristiche geometriche permette un'analisi accurata della quota e

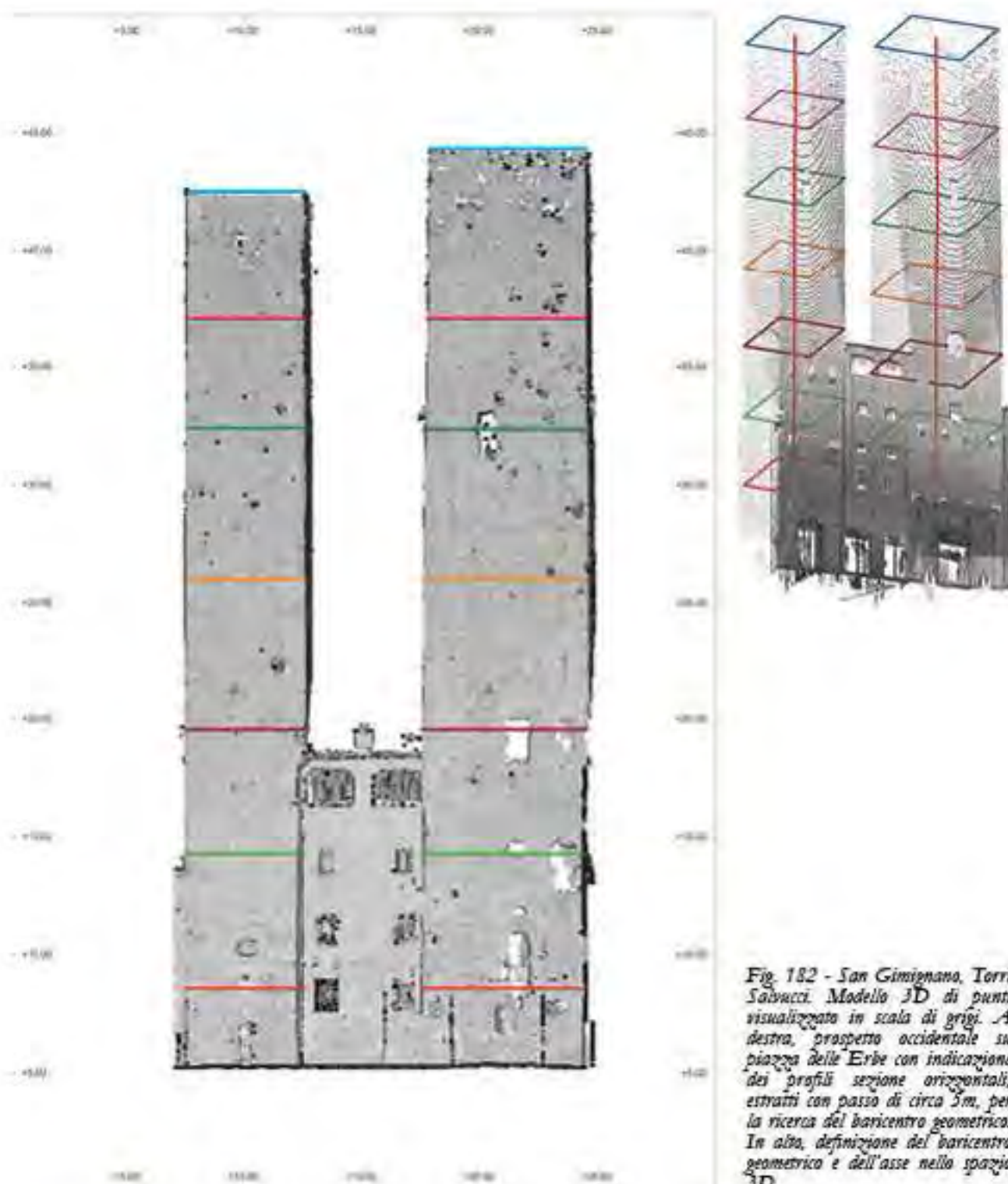


Fig. 182 - San Gimignano, Torre Salvucci. Modello 3D di punti visualizzato in scala di grigi. A destra, prospetto occidentale su piazza delle Erbe con indicazione dei profili sezione orizzontali, estratti con passo di circa 5m, per la ricerca del baricentro geometrico. In alto, definizione del baricentro geometrico e dell'asse nello spazio 3D

**I SISTEMI A SCANSIONE 3D
PER LA DOCUMENTAZIONE METRICA E LA 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

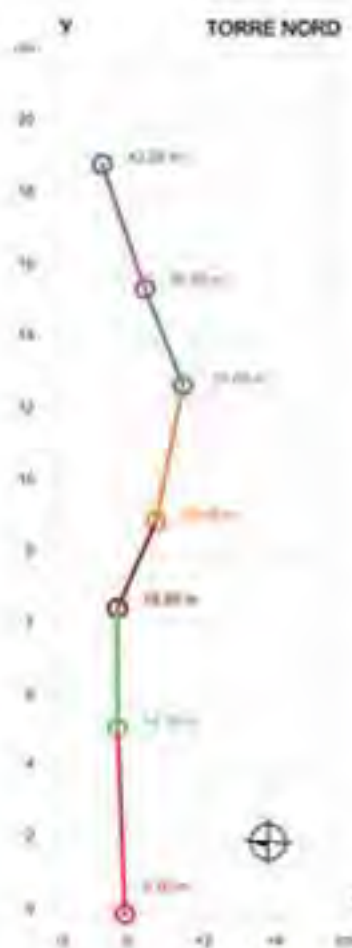
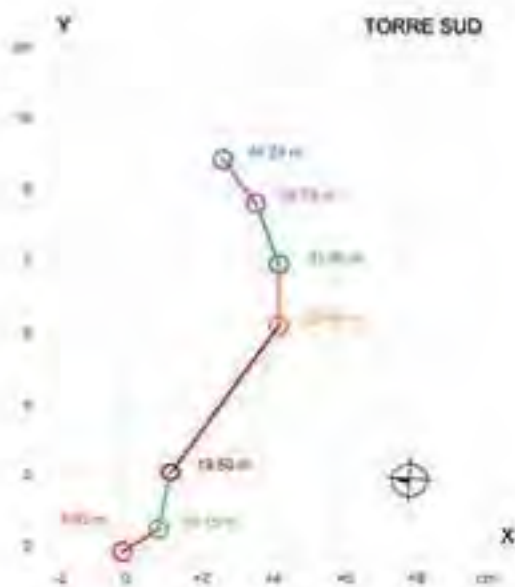


Fig. 183 - San Gimignano, Torri Salvucci. Grafico degli spostamenti, in x e y espressi in cm , del baricentro geometrico delle sezioni orizzontali estratte alle quote indicate.

Ne deriva uno sbandamento trascurabile in direzione Nord-Sud (distanza massima inferiore ai 2 cm per la torre nord; 4 cm per la torre sud); mentre nella direzione Est è stato riscontrato, per la torre sud, un lieve scostamento dalla verticalità (distanza massima 8 cm), per la torre nord uno scostamento poco superiore a 15 cm .



dell'inclinazione (accuratezza centimetrica) di strutture caratterizzate da un'altezza elevata e quindi non rilevabili con altre tecniche in modo semplice.

Le valutazioni strutturali, fatte in base ad analisi di questo tipo sul modello tridimensionale, sono numerose. Oltre all'analisi di strapiombo, che diventa interessante in strutture tipo le torri, possono essere estratte altre considerazioni. Un tale studio può risultare necessario a seguito di indicazioni degli strutturisti per indagini più approfondite (modellazione agli elementi finiti, ecc.)[42].

[42] Castignetti C., Berracchini E., Capra A., Dubbini M., Il laser scanning terrestre per l'analisi di edifici di interesse storico e artistico, *Geomatica. Le radici del futuro. Tribuna a Sergio Dagnoli e Salvatore Galati*, 2011, pp. 99-107

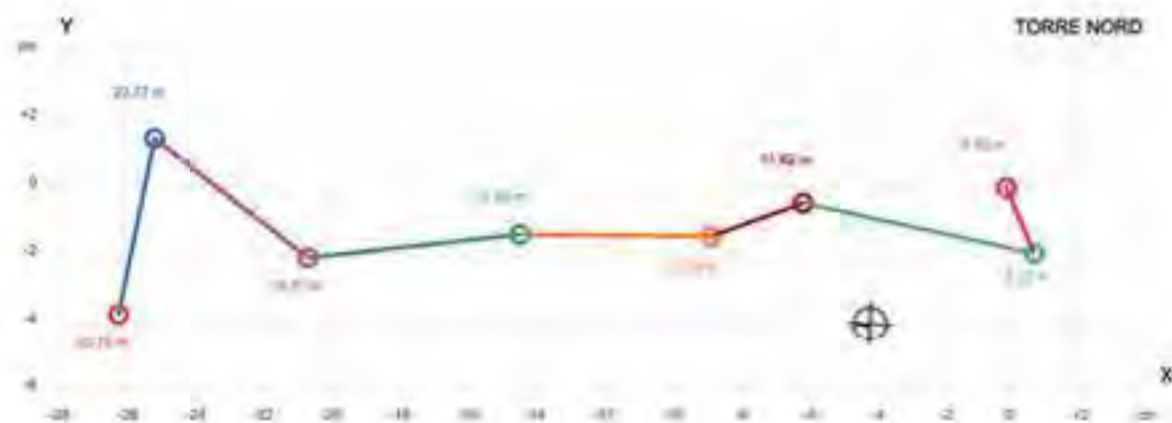
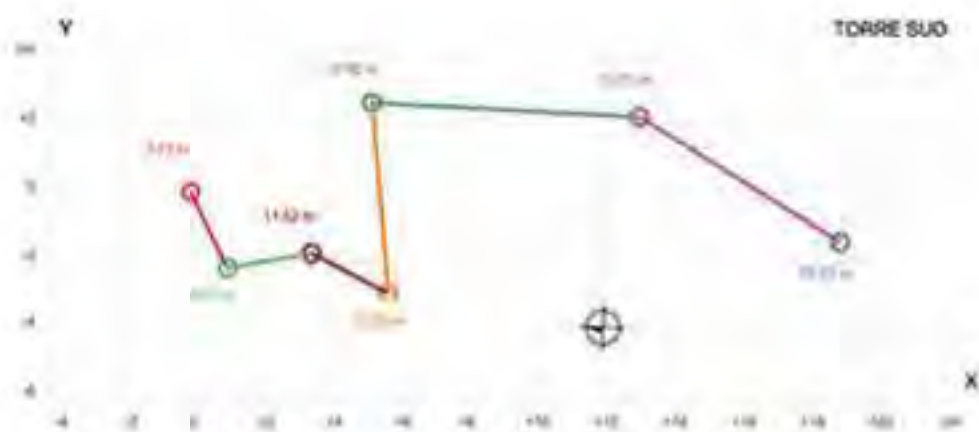


Fig. 184 - San Gimignano, Torri Ardinghelli. Modello 3D di punti visualizzato in scala di grigi. A destra, prospetto occidentale su piazza della Cisterna con indicazione dei profili sezione orizzontali, estratti con passo variabile, per la ricerca del baricentro geometrico. In alto, definizione del baricentro geometrico e dell'asse nello spazio 3D



Fig. 185 - San Gimignano, Torri Ardinghelli. Grafico degli spostamenti, in x e y espressi in cm, del baricentro geometrico delle sezioni orizzontali estratte alle quote indicate.

Ne deriva uno sbandamento trascurabile in direzione Est-Ovest (distanza massima inferiore ai 6 cm); mentre, nella direzione Nord-Sud, è stato riscontrato un notevole scostamento dalla verticalità per entrambe le torri, ma in verso opposto: per la torre sud uno scostamento poco superiore ai 18 cm in direzione sud; per la torre nord uno scostamento poco superiore ai 26 cm in direzione nord.



IL MODELLO 3D A SUPPORTO DELL'ANALISI STRUTTURALE

L'analisi strutturale delle costruzioni storiche in muratura deve, in genere, affrontare difficoltà peculiari quali, ad esempio, l'incerta caratterizzazione delle proprietà meccaniche del solido murario, le scarse conoscenze sulla configurazione originale della struttura (trasformazioni nel tempo), la presenza di fasi costruttive eterogenee o di interventi progressivi di restauro e consolidamento che possono aver modificato il comportamento strutturale originario. A queste problematiche si aggiungono quelle specifiche di una struttura a torre: il peso proprio, spesso già ai limiti, ma soprattutto la presenza di eventuali fuochi piombo. L'evento sismico, in casi come questi, rappresenta in genere lo scenario di carico più gravoso per la costruzione.

Per queste ragioni, generalmente, lo strumento di analisi che appare più indicato è l'analisi limite nella quale, puntando sull'individuazione dei più probabili meccanismi di collasso della struttura, si può prescindere dalla caratterizzazione meccanica dei materiali costituenti. Questo tipo di analisi valuta la capacità di spostamento ultimo del sistema dopo l'attivazione di un meccanismo e assegna, incrementalmente al cinematicismo, configurazioni variate in spostamenti finiti di entità crescente.

Un'alternativa all'analisi limite è rappresentata dall'analisi elastica, attraverso il metodo degli elementi finiti [43], utilizzata con maggiore confidenza in presenza di strutture flessibili e geometricamente ben modellabili, come per esempio le torri, i campanili o le altre strutture a prevalente sviluppo verticale. La modellazione elastica di queste opere, infatti, agevolata dalla regolarità strutturale, consente sia di analizzare il comportamento flessionale in presenza di azioni orizzontali che di valutare l'importanza dell'interazione terreno-struttura.

La valutazione del comportamento strutturale di una costruzione storica deve necessariamente prendere avvio dalla conoscenza della sua storia costruttiva, analizzando le trasformazioni subite nel tempo, gli eventi eccezionali che l'hanno colpita ed eventualmente danneggiata e i relativi interventi progressivi di restauro e consolidamento. Per questi motivi, parallelamente all'analisi strutturale, sono state condotte oltre al rilievo geometrico, tradizionale e laser scanning, indagini geologico-geotecniche sulle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione per stimare le condizioni di vincolo da essi fornite alla costruzione, verifiche ed indagini sulla caratterizzazione della tessitura muraria mediante l'utilizzo della tecnica radar penetrante (GPR); sisme sperimentali delle caratteristiche meccaniche, mediante carotaggio continuo con estrazione di campioni nel

[43] Il metodo degli elementi finiti (spesso citato anche nei testi italiani con la sigla FEM, acronimo dell'anglosassone *Finite Element Method*) è una tecnica di discretizzazione del modello attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da elementi finiti di forma variabile (triangoli, quadrilateri, ecc).

Per risolvere il modello agli elementi finiti si seguono due fasi fondamentali, ognuna delle quali comporta l'intervento di un'entità nella soluzione finale.

- *Discretizzazione*

Il modello fisico è ridotto in un sistema che, a loro volta, sono scomposti in elementi finiti ai quali è applicato un modello matematico capace di risolverli.

- *Discretizzazione*

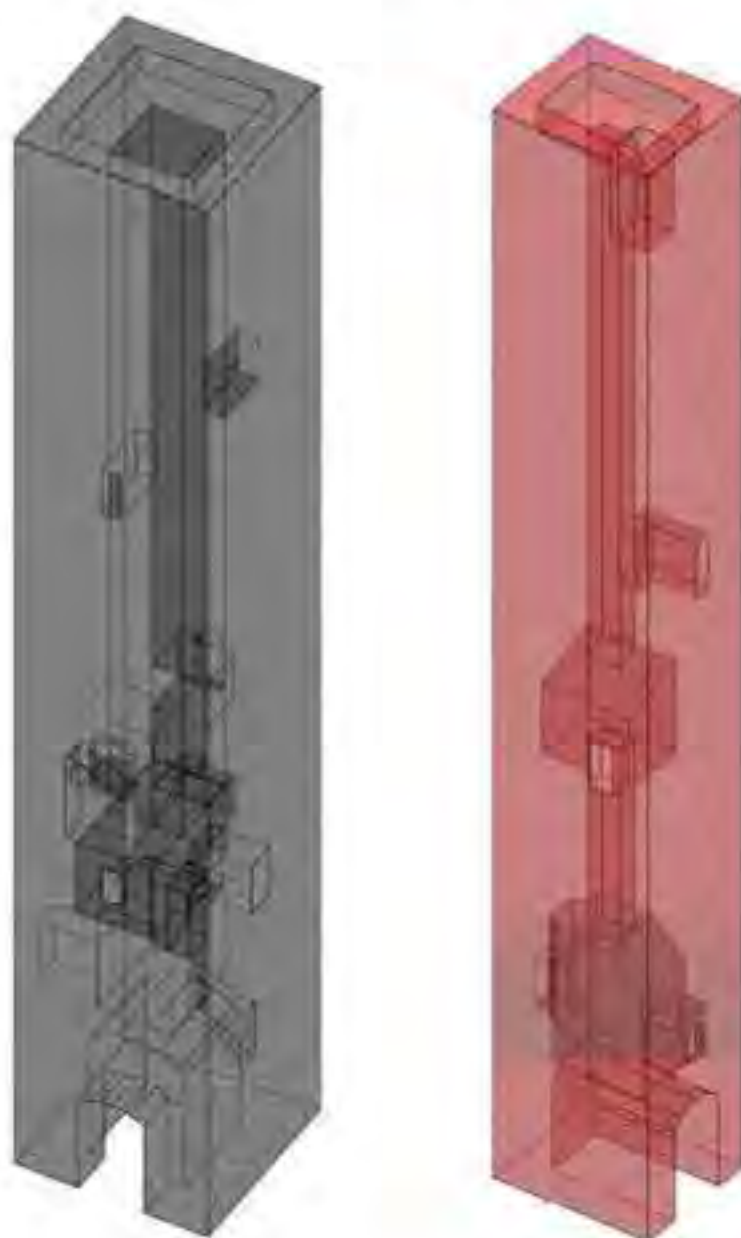
Contra nel passaggio da un modello continuizzato da un numero infinito di gradi di libertà, ad un modello discreto definito, invece, da un numero finito di gradi di libertà secondo la natura propria della mesh.

Al modello discretizzato sono poi imposte le condizioni al contorno necessarie per la completa definizione del problema: nel caso strutturale, sono condizioni al contorno i carichi applicati e i vincoli esterni di spostamento.

rispetto del monumento.

L'analisi del rischio sismico, svolta dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze sulle due torri gemelle Salvucci, ha portato all'elaborazione di un modello fisico 3D mantenendo i dettagli geometrici rilevati, visibili soprattutto nelle numerose irregolarità altimetriche (presenza di vani, cavità, restringimenti di sezione, non verticalità, ecc., Fig. 186).

Fig. 186 - San Gimignano, Torri Salvucci. Modello fisico 3D delle torri: a sinistra, la torre nord; a destra, la torre sud [44]



[44] Elaborazioni grafiche a cura dell'ing. M. Betù con il coordinamento scientifico del prof. G. Baroli dell'Università degli Studi di Firenze

Il modello numerico, elaborato con un commerciale codice di calcolo agli elementi finiti (ANSYS), è stato utilizzato in una prima analisi lineare statica per rilevare le condizioni della torre per il solo peso proprio e valutare l'incidenza del fuoco piombo rilevato sul regime tensionale (Fig. 187). Sono stati individuati i parametri di stress, gli spostamenti, i momenti, le reazioni vincolari per il contorno, nelle direzioni dei tre assi x, y, z e nei relativi piani. Certamente il parametro più significativo in una struttura a torre, caratterizzata da un elevato sviluppo in altezza, è quello di stress in direzione z, cioè le tensioni verticali in ogni punto della struttura, in particolar modo nella sezione alla base.

I risultati ottenuti, per la condizione di solo peso proprio, indicano tensioni massime di compressione pari a circa 1,6 Mpa in corrispondenza della base che decrescono, progressivamente, verso la sommità raggiungendo tensioni di trazione pari a circa 0,10 Mpa.

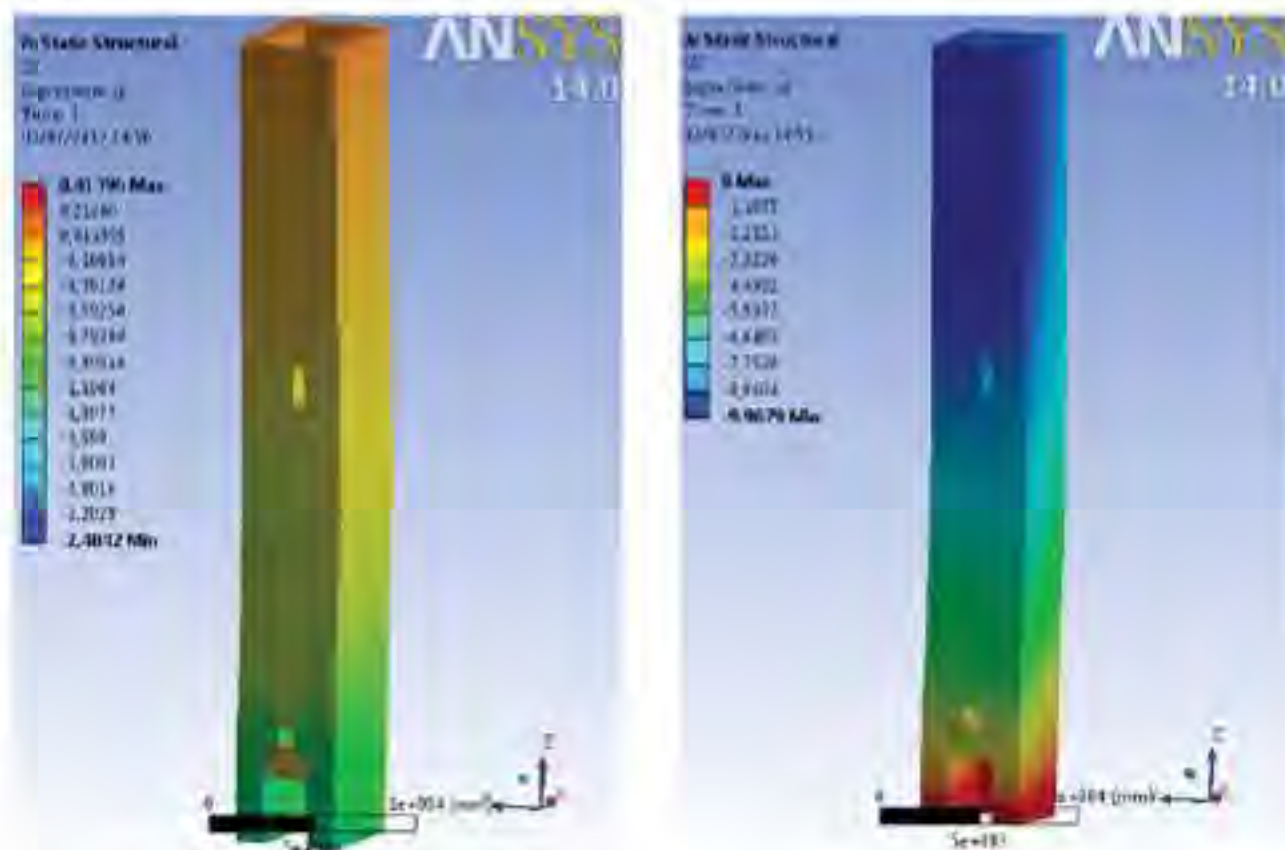
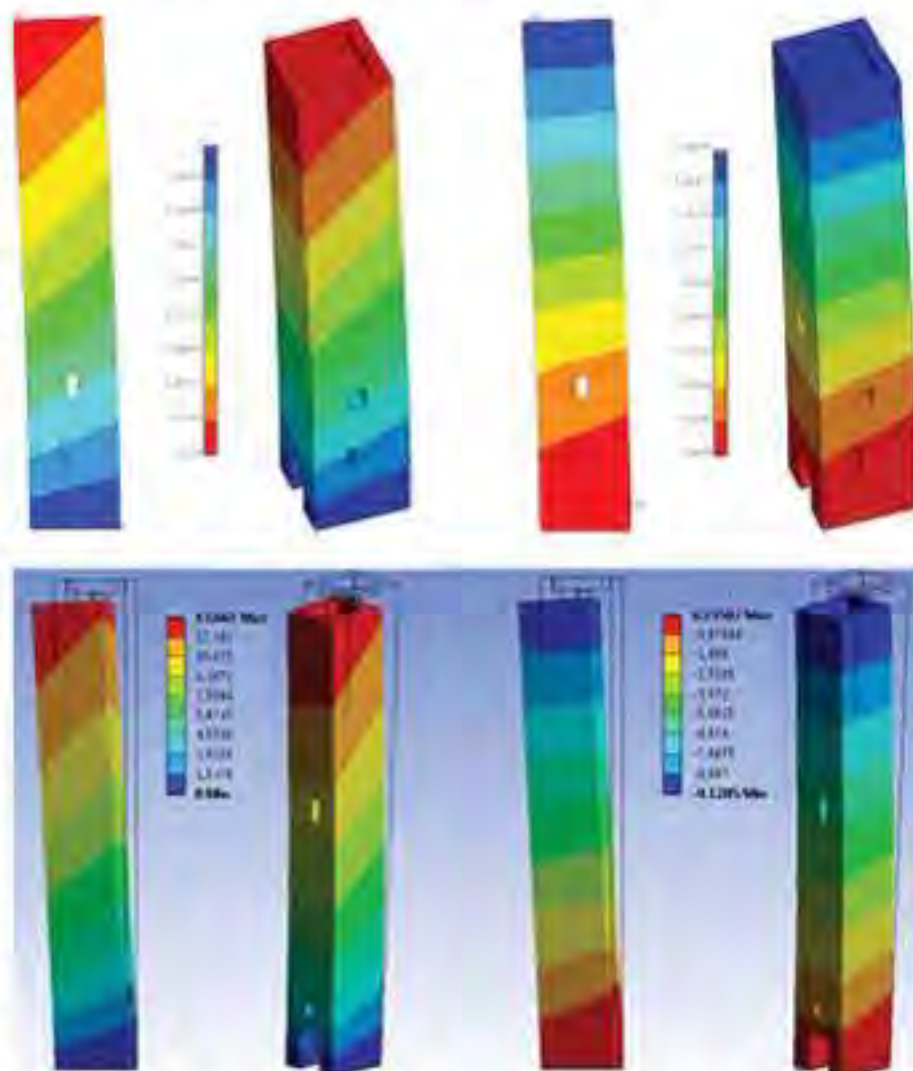


Fig. 187 - San Gimignano, Torre Salvucci nord. Modello FEM 3D: a sinistra, modello delle tensioni verticali per il peso proprio, espresso in Mpa; a destra, modello degli spostamenti verticali espressi in mm [44]. È evidente che le massime tensioni verticali si registrano alla base e decrescono, progressivamente, verso la sommità (a sinistra) così come gli spostamenti verticali maggiori si verificano prevalentemente nella parte alta della torre, in particolare sul prospetto di via San Matteo (a destra)

L'analisi è stata condotta, su entrambe le torri, calcolando il modello FEM degli spostamenti vettoriali (Fig. 188), espressi in mm, che evidenzia la lieve pendenza di entrambe le torri in direzione est, quindi su via San Matteo, a conferma delle analisi fatte sullo spostamento del baricentro in direzione est (per la nord di 18 cm e per la sud di 8 cm).

Nel caso delle Torri Salvucci sono stati elaborati modelli numerici tridimensionali di dettaglio per raggiungere un livello di approfondimento piuttosto completo ed esaustivo, nell'ottica dell'approccio di livello LV3 in accordo alle *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale* [45].

Fig. 188 - San Gimignano, Modello FEM 3D. In alto, Salvucci nord e, in basso, la sud: a sinistra, modello degli spostamenti vettoriali e a destra, modello degli spostamenti orizzontali, in direzione est-ovest, entrambi espressi in mm [44]. E' evidente che entrambe le torri presentano una lieve pendenza in direzione est, quindi su via San Matteo, che conferma le analisi fatte sullo spostamento del baricentro in direzione est (per la nord di 18 cm e per la sud di 8 cm)



Il comportamento sismico della tipologia strutturale a torre dipende da alcuni fattori specifici quali la snellezza, il grado di ancoramento delle pareti, l'eventuale presenza di strutture più basse in grado di fornire un vincolo orizzontale, la presenza nella parte sommitale di elementi architettonici snelli o vulnerabili (guglie, merlature, celle campanarie, ecc.). Per questo, generalmente, si fa riferimento al collasso per pressoflessione, ovvero considerando la torre come una mensola, sollecitata da un sistema di forze orizzontali oltre che dal proprio peso, che può andare in crisi in una generica sezione per schiacciamento nella porzione compressa, a seguito della parzializzazione della sezione di verifica dovuta alla non resistenza a trazione.

L'obiettivo del progetto RiSEM, tuttavia, è quello di individuare metodi specifici di valutazione della vulnerabilità sismica sia nella parte sperimentale che nella parte di analisi; per questo l'idea di base è quella di attestarsi sui livelli di indagine LV1 e LV2.

Laddove la risposta della struttura allo stato limite, determinata a livello LV1, risultasse significativamente inferiore a quella attesa nel sito di costruzione, sarà eseguita una valutazione più accurata, passando ai livelli LV2 ed LV3.

[45] Le *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale* forniscono indicazioni per lo studio della risposta all'azione sismica delle costruzioni appartenenti al patrimonio culturale, con riferimento alle norme *Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. Min. delle Infrastrutture del 14/01/2008 (N.T.C. 2008)* ed alla relativa *C.M. Min. delle Infrastrutture n. 617 del 02/02/2009 (C.M. 2009)*.

Tali linee guida, redatte con l'intento di delineare un percorso di conoscenza, di stima del grado di sicurezza nei confronti dell'azione sismica e di progettazione di eventuali interventi di miglioramento sismico, individuano tre livelli progressivi di approfondimento nella definizione della vulnerabilità sismica di una struttura, ciascuno dei quali risponde a necessità diverse:

- LV1, analisi qualitative con modelli meccanici semplificati per la valutazione della sicurezza a scala tecnica, con scopi di programmazione ed impegno di risorse;
- LV2, analisi su singoli macroelementi secondo il metodo dei meccanismi locali di collasso, per la valutazione della sicurezza in fase limitata del manufatto, da adottare nell'ipotesi di interventi locali;
- LV3, analisi complessive della risposta sismica del manufatto, per la valutazione della sicurezza del manufatto nel suo complesso, in presenza di interventi che incidono ed incidono sul suo funzionamento globale.



Fig. 189 - Piano di riferimento verticale (in magenta) e interpolante (in celeste)

IL LASER SCANNER PER IL CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI

Il calcolo delle deformazioni, a partire dalla banca dati 3D, è stata effettuata sulle torri Ardinghelli attraverso il confronto dei prospetti con due piani di riferimento (Fig. 189):

- uno verticale per osservare le grandi deviazioni della torre, principalmente dovute all'inclinazione;
- uno interpolante, per evidenziare le irregolarità e le deformazioni rispetto ad una situazione non alterata.

Non disponendo, come accade spesso, di rilievi precedenti caratterizzati dalla stessa precisione e densità di informazione, rispetto ai quali calcolare la deformazione come spostamento differenziale, le differenze tra i punti rilevati ed il piano di riferimento, cioè

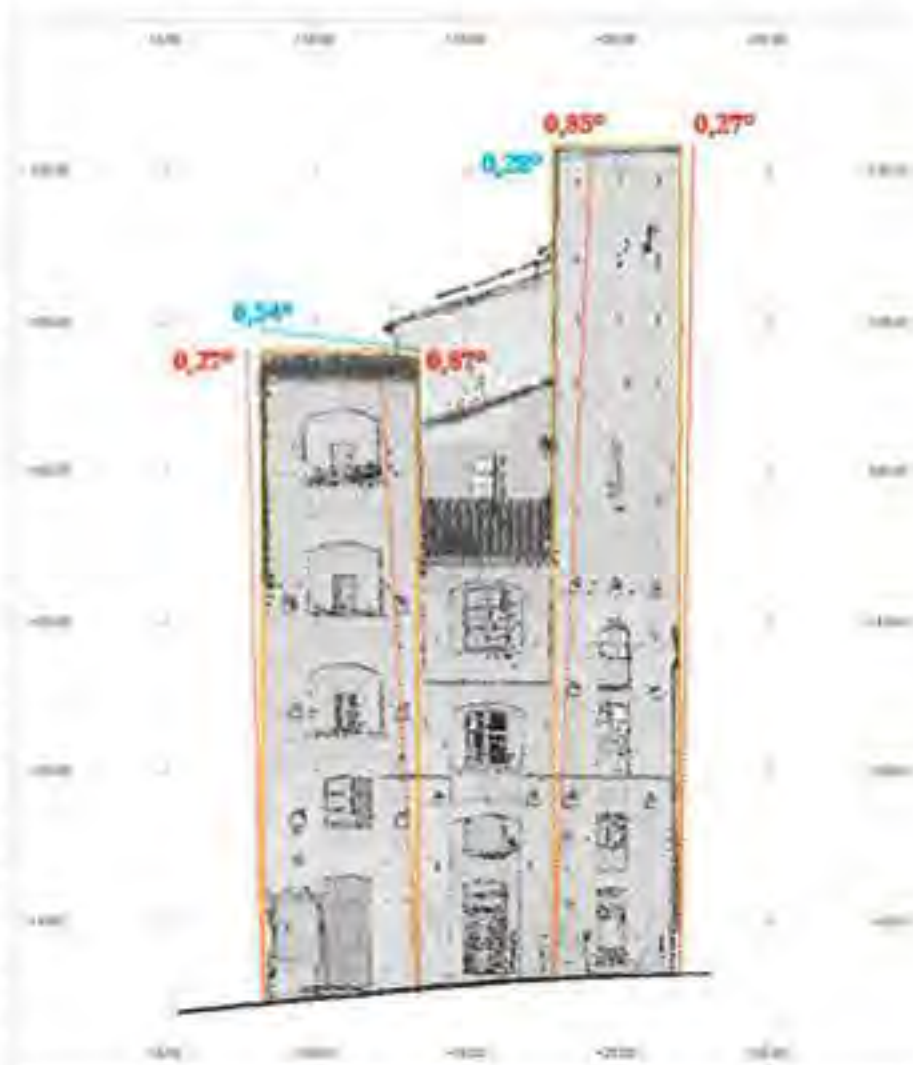


Fig. 190 - San Gimignano, Torri Ardinghelli. Analisi degli scostamenti orizzontali (in celeste) e verticali (in rosso). Le pendenze sono indicate mediante angoli qualitativamente proporzionali allo scostamento.

Lo spostamento dei baricentri produce un fuori piombo, in direzione Nord-Sud, maggiore nei prospetti interni delle torri. In particolare, si registra per la torre sud una pendenza pari a 0.87° nel fronte nord alla quale si contrappone la pendenza di 0.85° in verso opposto del fronte sud della torre nord.

le deviazioni rispetto alla regolarità, sono state intese come deformazioni, o meglio, come deformazioni complessive dalla creazione del monumento ad oggi [46].

Le variazioni effettive dei quattro prospetti di entrambe le torri (Figg. 190-194), rispetto al piano di riferimento verticale, avvalorano i risultati ottenuti dall'analisi geometrica del modello 3D: nella torre sud presenta un notevole scostamento dalla verticalità sul fronte nord (pendenza di $0,87^\circ$, strapiombo di 31 cm) e, di contro, la torre nord presenta un uguale scostamento dalla verticalità, in direzione opposta, sul fronte sud (pendenza di $0,85^\circ$, strapiombo di 41 cm, nell'ipotesi di unico tronco deformato; pendenza di $0,86^\circ$ della porzione antica e $0,83^\circ$ della porzione novecentesca nell'ipotesi di due tronchi).

[46] Dogliani F., Mazzotti P., Codice di pratica per gli interventi di miglioramento sismico nel restauro del patrimonio architettonico, Edizione Regione Marche, 2007, ISBN 88-9026-690-2



Fig. 191 - San Gimignano, Torri Ardinghelli. Pianta riepilogativa della direzione di strapiombo della struttura esterna. Le direzioni di inclinazione sono indicate mediante frecce di lunghezza qualitativamente proporzionale allo strapiombo (in raso il vettore risultante)

E' interessante notare come la sopraelevazione della torre nord, a partire dalla quota di circa 23 m, abbia un'inclinazione in verso opposto ($1,97^\circ$ verso sud) rispetto a quella della sottostante struttura medioevale ($1,15^\circ$ verso nord) sul fronte nord, mentre inclinazione dello stesso verso ($0,86^\circ$ e $0,83^\circ$ verso nord) sul fronte sud (Fig. 192).
L'analisi delle deformazioni, rispetto al piano di riferimento interpolante, ha evidenziato continui cambiamenti di regime, con alternanza di bombature e rigonfiamenti.

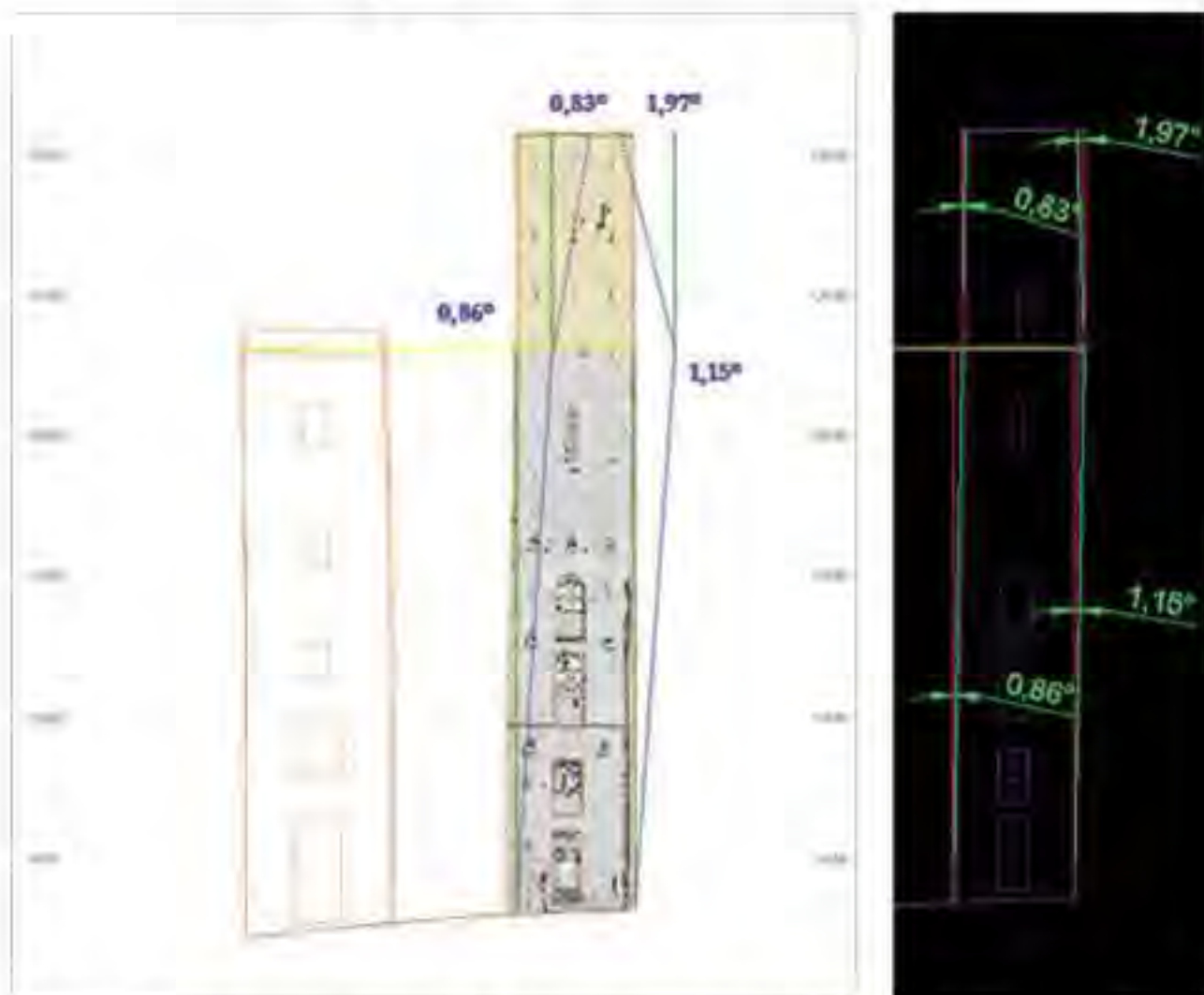


Fig. 192 - San Gimignano, Torri Ardinghelli. Analisi degli spostamenti verticali misurati sulla torre nord. La pendenza è calcolata suddividendo la torre in due tranchi: la struttura medioevale, fino alla quota di circa 23 m, misura una pendenza di $1,15^\circ$ sul lato nord e $0,86^\circ$ sul lato sud; la struttura novecentesca misura una pendenza di $1,97^\circ$ sul lato nord e $0,83^\circ$ sul lato sud. Questo calcolo appare più appropriato rispetto al precedente in quanto il sopralzo è stato eretto sulla porzione antica nonostante il suo assetto evidentemente fuori piombo

ARDINGHELLI - TORRE NORD - PIANO DI RIFERIMENTO VERTICALE

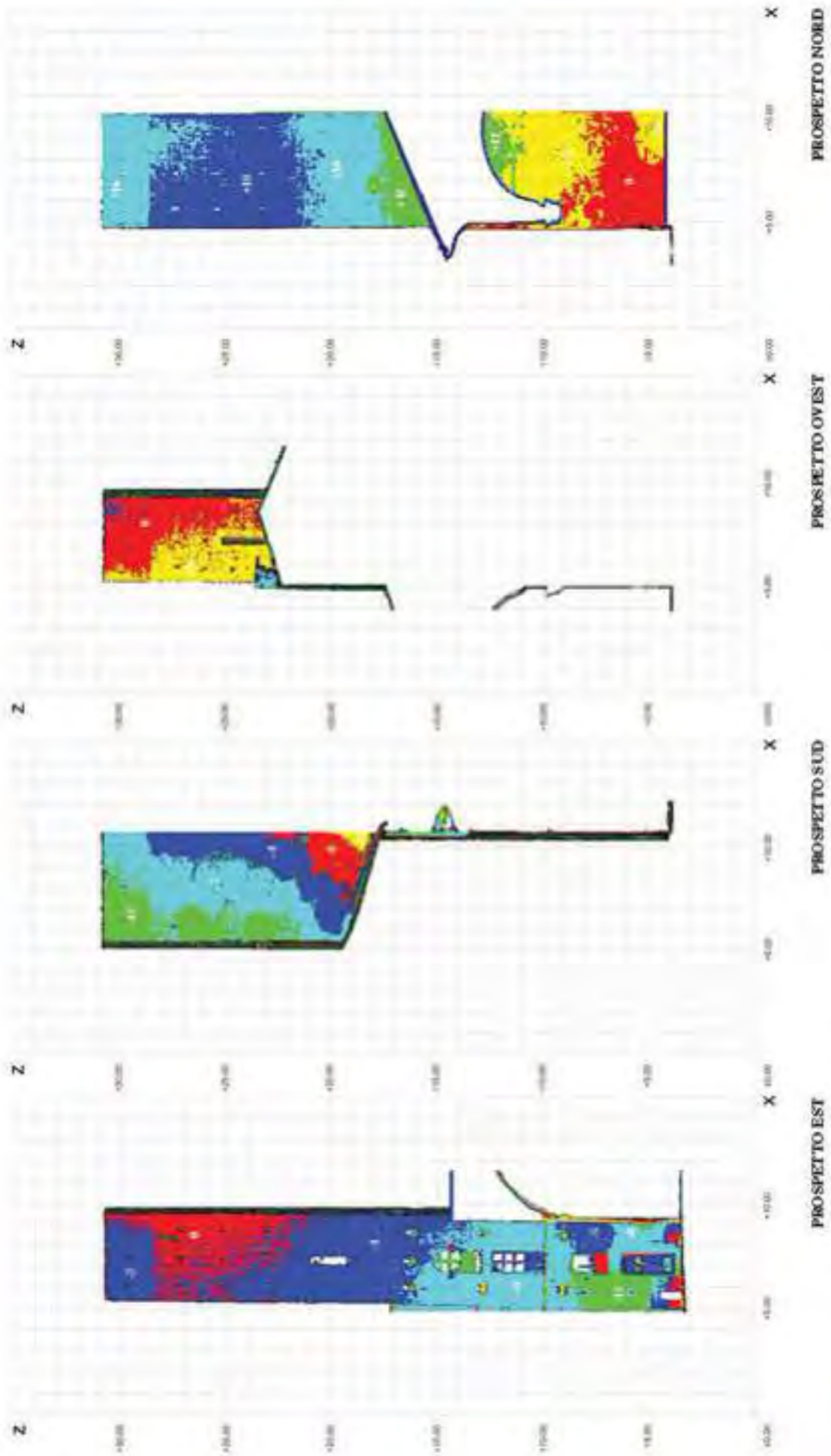


Fig. 193 - San Ginesano, Torre Ardinghelli Sud. Mappa di elevazione, rappresentata in falsi colori, degli eventuali fuori piombo dei prospetti. I falsi colori sono stati calibrati in modo da rappresentare i diversi livelli di elevazione del prospetto a partire da una quota zero (sporgenza pressoché in piombo, indicata in rosso) con un delta di 5 cm. Le deformazioni sono calcolate come distanze tra i punti dei prospetti ed il relativo piano verticale di riferimento.



ARDINGHELLI - TORRE SUD - PIANO DI RIFERIMENTO VERTICALE

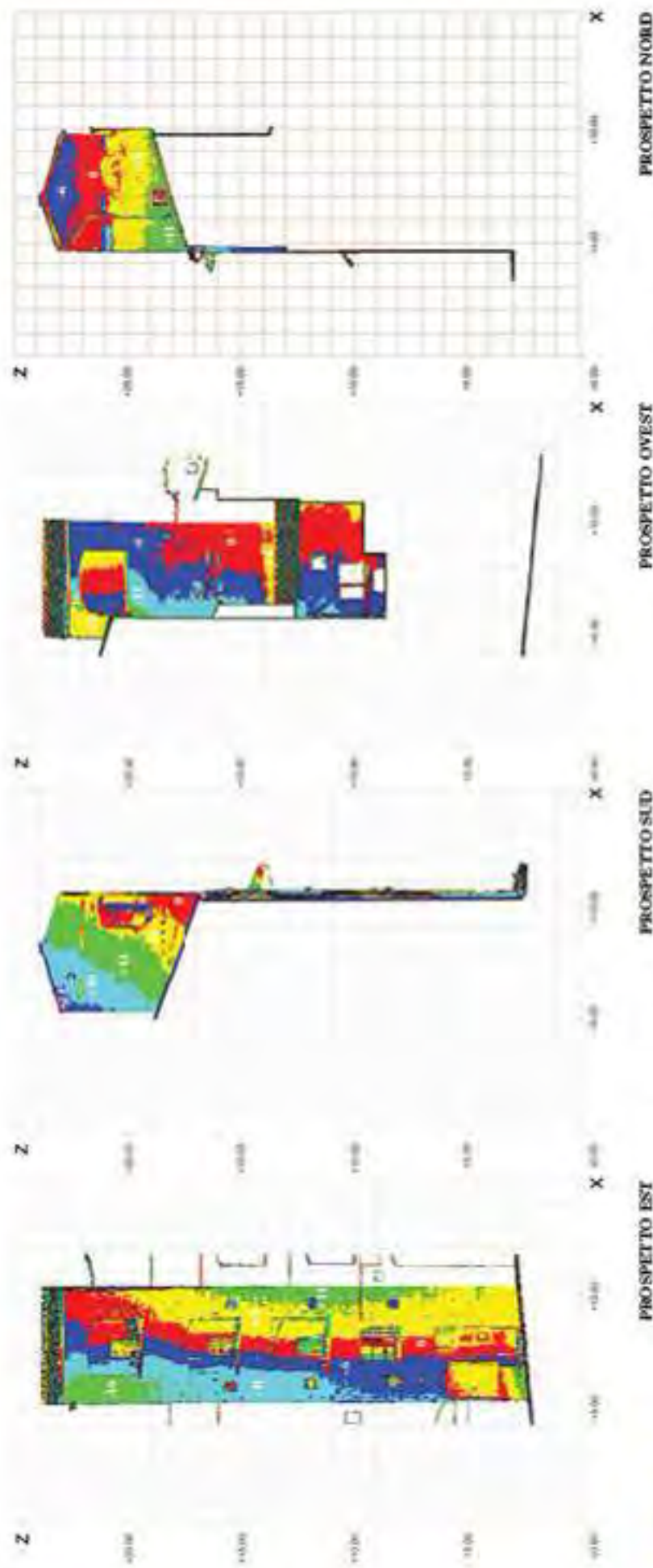


Fig. 194 - San Gimignano, Torre Ardinghelli Nord. Mappa di elevazione, rappresentata in falsi colori, degli eventuali fuori piombo dei prospetti. I falsi colori sono stati elaborati in modo da rappresentare i diversi livelli di elevazione del prospetto a partire da una quota zero (quotazione pressoché in piombo, indicata in rosso) con un delta di 5 cm. Le deformazioni sono calcolate come distanze tra i punti dei prospetti ed il relativo piano verticale di riferimento

In particolare, per la *torre nord* (Fig. 155), si osservano discostamenti dal piano di riferimento:

- dall'alto verso il basso, nei prospetti nord e sud interessati dalla maggiore inclinazione, con un rigonfiamento dell'ordine di 5 - 6 cm nella porzione limitrofa alla linea di giunzione tra la muratura antica medioevale e quella ricostruita nel secondo decennio del '900 (quota di circa 23 m, coincidente con l'altezza della torre sud);
- in direzione sud-nord, nei prospetti est e ovest, in modo tale da seguire il verso della pendenza (nord, appunto) con una distribuzione che suggerisce un assetto dovuto a fenomeni di torsione.

Allo stesso modo, ma in verso opposto, per la *torre sud* (Fig. 156), si osservano discostamenti dal piano di riferimento:

- dall'alto verso il basso, nei prospetti nord e sud interessati dalla maggiore inclinazione;
- in direzione nord-sud, nei prospetti est e ovest, in modo tale da seguire il verso della pendenza (sud, appunto) con una distribuzione che suggerisce un assetto dovuto a fenomeni di torsione.

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

Le osservazioni fornite, se inserite in un quadro di studio generale che comprende analisi che confermano uno stato di "affaticamento" di parte della muratura dovuta all'effetto del peso stesso della torre, possono risultare di estremo interesse e dovrebbero essere prese in considerazione per valutazioni in merito alla stabilità della struttura [47].

[47] Pesci A., Bonati E., Cavalli G., Cecchi E., Le informazioni estraibili dal dato laser scanner per lo studio di edifici storici. *Archaeologia*, anno 2, n. 3/2011, Roma, A&C2000 srl, 2011, ISSN 2037-2485, pp. 12-16

ARDINGHELLI - TORRE NORD - PIANO DI RIFERIMENTO INTERPOLANTE

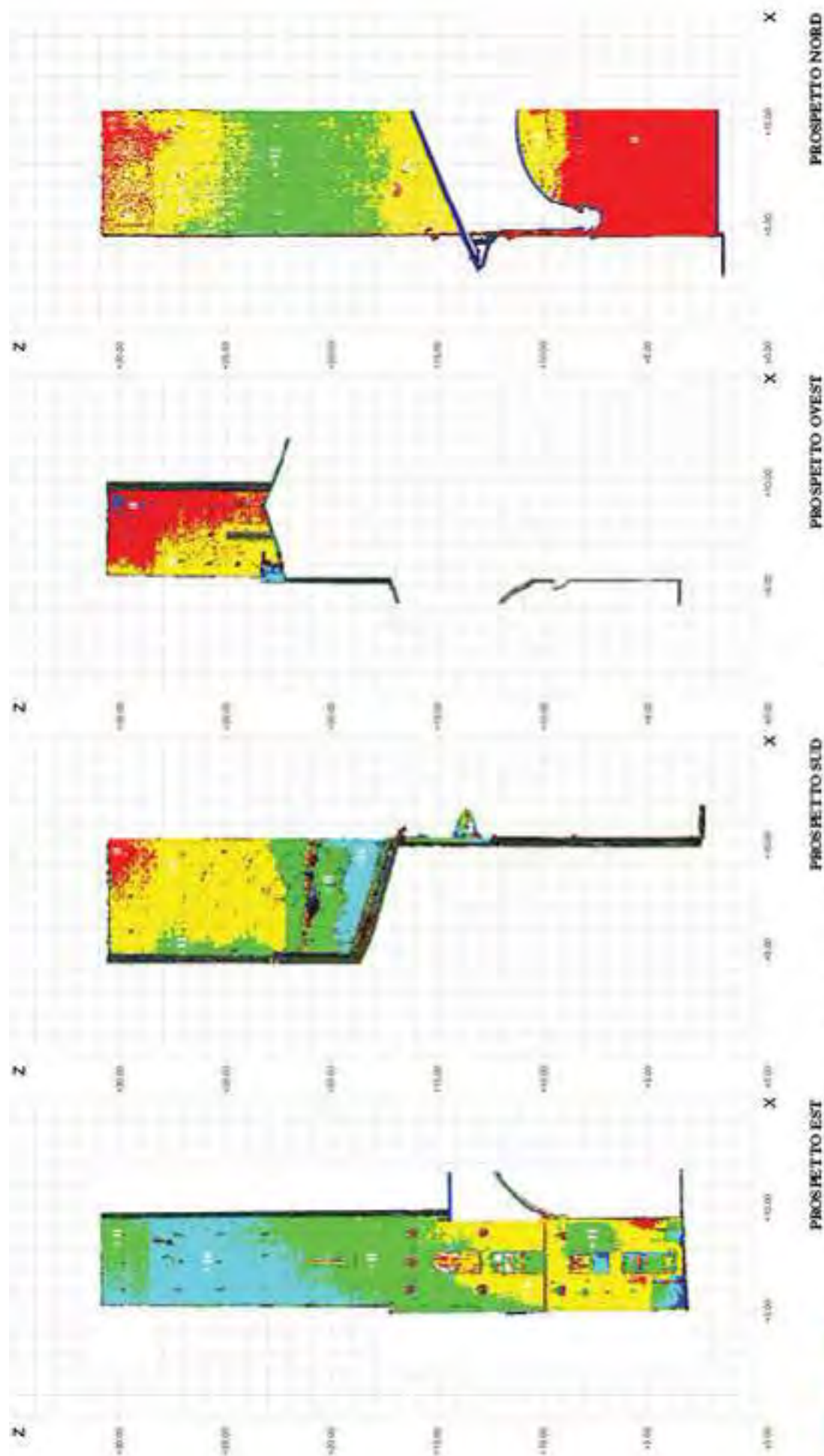


Fig. 195 - San Gimignano, Torre Ardinghelli Nord. Mappa di elevazione, rappresentata in falsi colori, degli eventuali fuori piombo dei prospetti. I falsi colori sono stati calibrati in modo da rappresentare i diversi limiti di elevazione del prospetto a partire da una quota zero (porzione aderente al piano di base, indicata in rosso) con un delta di 5 cm. Le deformazioni sono calcolate come distanze tra i punti dei prospetti ed il relativo piano interpolante di riferimento.

ARDINGHELLI - TORRE SUD - PIANO DI RIFERIMENTO INTERPOLANTE

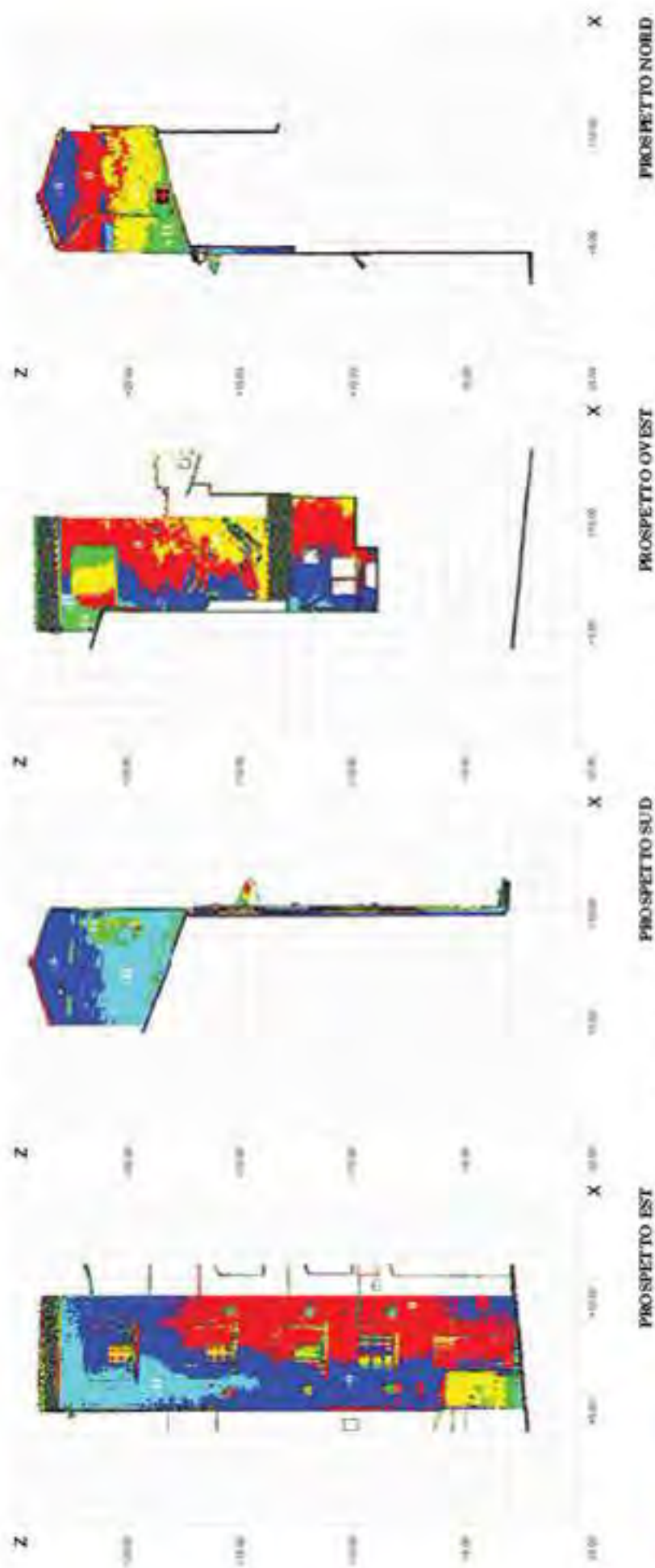
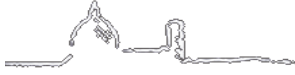


Fig. 196 - San Cavigliano, Torre Ardinghelli Sud. Mappa di elevazione, rappresentata in falsi colori, degli eventuali fuori piombo dei prospetti. I falsi colori sono stati calibrati in modo da rappresentare i diversi livelli di elevazione del prospetto a partire da una quota zero (porzione aderente al piano di base fit, indicata in rosso) con un delta di 5 cm.
Le deformazioni sono calcolate come distanze tra i punti dei prospetti ed il relativo piano interpolante di riferimento.



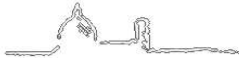
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La costruzione di un edificio non è cosa che si possa improvvisare troppo complessa è la sua struttura statica, funzionale, estetica, troppo articolati i rapporti che l'edificio intrattiene con il paesaggio circostante. Per progettare un edificio, gli architetti si servono dunque di modelli, che consentono loro di simulare la costruzione e prevederne gli effetti. [...] Il computer permette di costruire con grande facilità modelli numerici tridimensionali e di osservarli da ogni possibile punto di vista, come se si trovassero realmente tra le nostre mani. [...] Lo schermo del computer è dunque una finestra aperta sullo spazio virtuale del modello, che ci permette di osservarlo e di interagire con esso, movendolo e modificandolo [48].

In questa tesi si propone un utilizzo nuovo e innovativo della tecnica di rilievo laser scanning: l'attenzione non si pone specificatamente sugli elementi artistici e architettonici e lo scopo non è solo restituire in modalità tridimensionale un oggetto al fine di effettuare valutazioni qualitative di natura storica e culturale (approccio tradizionale). L'idea in tal senso è avvicinarsi al dato laser con occhio critico nei confronti della struttura stessa e delle geometrie più o meno complesse. L'attenzione si sposta sugli elementi costitutivi e costruttivi, su eventuali testimonianze di fessurazioni e deformazioni critiche per l'effettiva stabilità della struttura. Il modello tridimensionale anche nella fase più grezza, ovvero quando è ancora costituita da punti rilevati, può essere una valida fonte di informazioni da cui estrarre indicazioni circa i comportamenti dei singoli elementi costitutivi al

[48] Migliari R., **Geometria dei modelli, Rappresentazione grafica e informatica per l'architettura e per il design**, Roma, Edizioni Kappa, 2003



fine di evidenziare se vi sono spostamenti differenziali, deformazioni pregresse ed ipotizzare la presenza di eventuali carichi aggiuntivi che incrementano le sollecitazioni imposte. Questi risultati diventano fondamentali per valutare interventi di consolidamento e messa in sicurezza della struttura. Ciò conferma la grande utilità del laser scanner come strumento di diagnostica ai fini di un'analisi strutturale.

Di conseguenza, si afferma che il risultato dei rilievi laser scanner è un modello 3D sufficientemente completo e accurato per essere considerato come base di partenza per indagini geometriche. La trattazione fatta conferma con numerosi esempi che tali analisi hanno permesso di estrarre molte informazioni relative alla struttura e al suo stato. Ciò che deve, inoltre, essere detto e che è emerso dalle numerose esperienze citate, è che i risultati ottenuti dal rilievo laser scanner hanno messo in evidenza come non sia possibile un'interpretazione dei dati senza un confronto con la storia costruttiva della struttura [49].

[49] Castagnetti C., Bertacchini E., Capra A., Dubbini M., **Il laser scanning terrestre per l'analisi di edifici di interesse storico e artistico**, *Geomatica. Le radici del futuro. Tributo a Sergio Dequale & Riccardo Galetto*, 2011, pp. 99-107



BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

CAPITOLO 1

CONTESTO SCIENTIFICO E OPERATIVO

Ariaudo E., Bonora V., Colucci S., Nieto Ortiz M. J., Nobile A., Romanazzi M., Salvadeo V., **Rilievi metrici / Relevamientos métricos**, in: Tucci G. (a cura di), *1912-2012: la cattedrale di San Nicola di Bari a La Rioja. Studi e rilievi per il centenario. 1912-2012: la Catedral de San Nicolás de Bari de La Rioja. Estudios y relevamientos para el centenario*, EUDELAR – Universidad Nacional de la Rioja, Argentina, 2012, ISBN 978-987-1364-16-9, pp. 226-229

Ariaudo E., Bonora V., Colucci S., Nieto Ortiz M. J., Nobile A., Romanazzi M., Salvadeo V., **Rilievi tematici / Relevamientos temáticos**, in: Tucci G. (a cura di), *1912-2012: la cattedrale di San Nicola di Bari a La Rioja. Studi e rilievi per il centenario. 1912-2012: la Catedral de San Nicolás de Bari de La Rioja. Estudios y relevamientos para el centenario*, EUDELAR – Universidad Nacional de la Rioja, Argentina, 2012, ISBN 978-987-1364-16-9, pp. 230-234

Barazzetti L., Scaioni M., Remondino F., **Orientation and 3D modeling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation**, *The Photogrammetric Record*, vol. 25, n. 132, 2010, pp. 356-381

Benedetti B., Gaiani M., Remondino F., **Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei**, Edizioni della Normale, ISBN 978-88-7642-353-6

Bernardini F., Rushmeier H., Martin I. M., Mittleman J., Taubin G., **Building a Digital Model of Michelangelo's Florentine Pietà**, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, pp. 59-67

Bonora V., Nobile A., Tucci G., **Modulo D11 – Scansione laser terrestre, in: Dispense dei corsi per Operatore Geomatico**, *Corsi di specializzazione pratica GeoCampus*, Leica Geosystems, 2011, pp. 40

Camurri F., **Interventi conservativi in “Situazioni di crisi”: il centro storico di Tiro, Libano**, Tesi di Laurea in Architettura, Università degli Studi di Firenze, a. a. 2010-2011 (Relatore: Sabelli R. / Correlatori: Garzonio C. A., Mengozzi G., Tucci G.)

Carosso L., **Studio e applicazione dei sistemi ottici di rilevamento tridimensionale**, Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Sistemi Elettronici, Università degli Studi di Firenze, XX ciclo, 2008 (Tutore: Atzeni C.)

Cioci A., Spinetti A., Carosso L., Atzeni C., Cassani C., Lupus A., **Digital Three - Dimensional Modeling of Heritage by Frequency - Modulated Laser Radar: the case of Donatello's “David”**, in: *6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST) Proceedings*, The Eurographics Association, Pisa, 2005, pp. 89-96



Dylla K., Frischer B., Mueller P., Ulmer A., Haegler S., **Rome Reborn 2.0: A Case Study of Virtual City Reconstruction Using Procedural Modeling Techniques**, in: *37th Proceedings of the CAA Conference*, March 22-26, 2009, Williamsburg, Virginia, Archaeopress, Oxford 2010, pp. 62-66

Gaiani M., Benedetti B., Apollonio F. I., **Teorie per rappresentare e comunicare i siti archeologici attraverso modelli critici**, *SCIRES-IT (SCientific RESearch and Information Technology)*, CASPUR-CIBER Publishing, vol. 1, Issue 2, ISSN 2239-4303, DOI 10.2423/i22394303v1n2p33, 2011, pp. 33-70

Gruen A., Remondino F., Zhang L., **Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan**, *The Photogrammetric Record*, vol. 19, n. 107, 2004, pp. 177-199

Guggia S., **Scanner laser 3D per applicazioni biomediche**, Tesi di laurea in Ingegneria Biomedica, Università di Padova, 2010 (relatore: Pelizzo M. G. / correlatore: Bonora S.)

Guidi G., Cioci A., Spinetti A., Atzeni C., Cassani C., Lupus A., **Digital Three-dimensional modeling of Heritage by frequency-modulated laser radar: the case of Donatello's David**, in: *Electronic imaging & Visual Arts (EVA) Proceedings*, Firenze, 2004, pp. 261-266

Guidi G., Frischer B., De Simone M., Cioci A., Spinetti A., Carosso L., Micoli L. L., Russo M., Grasso T., **Virtualizing Ancient Rome: 3D Acquisition and Modeling of a Large Plaster-of-Paris Model of Imperial Rome**, in: *Videometrics VIII*, January 18-20, 2005, California, San Jose, USA SPIE, vol. 5665, pp. 119-133

Guidi G., Pieraccini M., Ciofi S., Damato V., Beraldin J. A., Atzeni C., **Tridimensional digitizing of Donatello's Maddalena**, *Ieee International Conference on Image Processing (ICIP 2001)*, Grecia, Thessaloniki, October 7-10 2001, n. 10, pp. 578-581

Furukawa Y., Ponce J., **Accurate, dense and robust multiview stereopsis**, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, vol. 32, n. 8, 2010, pp. 1362-1376

Magazzini E., **Il percorso museale di palazzo Medici - Riccardi con la Cappella di Benozzo Gozzoli. Nuove modalità espositive per la valorizzazione cromatica delle superfici**, Tesi di Laurea Magistrale in Architettura, Università degli Studi di Firenze, a.a. 2010-2011 (Relatore: Centauro G. A. / Correlatori: Grandin N. C., Nobile A., Bonora V.)

Manferdini M., Remondino F., Baldissini S., Gaiani M., Benedetti B., **3D modeling and semantic classification of archaeological finds for management and visualization in 3D archaeological databases**, in: *14th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM) Proceedings*, Limassol, Cyprus 2008, pp. 221-228

Mecca S., Dipasquale L. (a cura di), **Earthen Domes and Habitats. Villages of**

Northern Syria: An architectural tradition shared by East and West, Pisa, Edizioni ETS, 2009, ISBN 978-884672535-6

Moles A., **Teoria informazionale dello schema**, *Versus*, n. 2, 1972, pp. 29-37

Pierrot-Deseilligny M., Clery I., **APER0, An Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of Set of Images**, in: *LAPRS&SIS*, vol. 38, n. 5/W16, Trento, Italia, 2011, CD-ROM

Pierrot-Deseilligny M., De Luca L., Remondino F., **Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation**, in: *Proceeding of 23th International CIPA Symposium*, Prague, Czech Republic, 2011

Remondino F., El-Hakim S., **Image-based 3D modelling: a review**, *The Photogrammetric Record*, vol. 21, n. 107, 2006, pp. 269-291

Remondino F., El-Hakim S., Gruen A., Zhang L., **Turning images into 3D models**, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, n. 4, 2008, pp. 55-64

Remondino F., Rizzi A., Aguiaro G., Jimenez B., Menna F., Nex F., Baratti G., **Rilievi e Modellazione 3D**, in: *Atti 15^a Conferenza Nazionale ASITA*, Reggio di Colorno, 15-18 novembre 2011, ISBN 978-88-903132-6-4, pp. 1825-1836

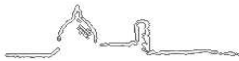
Sansoni G., Docchio F., **Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications**, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, n. 20, 2004, pp. 359-367

Scopigno R., **Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale**, in: S. Campana, R. Francovich (a cura di) *Laser Scanner e GPS: Paesaggi Archeologici e Tecnologie Digitali*, Edizioni All'Insegna del Giglio, 2005, pp. 41-68

Sylaiou S., Liarokapis F., Kotsakis K., Patias P., **Virtual museums, a survey and some issues for consideration**, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 10, Issue 4, 2009, pp. 520-528

Tucci G., Algostino F., Bucalossi L., Conti A., Nobile A., **Cultural Heritage and Sustainable Valorization in the Governorate of Tartous with Reference to the Euromed IV Project: The Contribution of Geomatics**, in: Ioannides M., Fellner D., Georgopoulos A., Hadjimitsis D.G. (eds.), *Project Paper Proceedings of EuroMed 2010, 3rd International Euro-Mediterranean Conference "Digital Heritage"*, Limassol, Cyprus, November 8-13 2010, LNCS 6436, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, ISSN 0302-9743, ISBN-13 978-3-642-16872-7, pp. 399-408

Tucci G., Bonora V., Nobile A., **Il rilievo dell'edificio nel suo stato attuale / El relevamiento del edificio al estado actual**, in: Tucci G. (a cura di), *1912-2012: la cattedrale di San Nicola di Bari a La Rioja. Studi e rilievi per il centenario. 1912-2012: la Catedral de San Nicolás de Bari de La Rioja. Estudios y relevamientos para el centenario*, EUDELAR – Universidad Nacional de la Rioja, Argentina, 2012, ISBN



978-987-1364-16-9, pp. 184-225

Tucci G., Bonora V., Nobile A., Tokmakidis K., **Geomatic methods of surveying**, in: Mecca S., Dipasquale L. (a cura di), *Earthen Domes and Habitats. Villages of Northern Syria: An architectural tradition shared by East and West*, Pisa, Edizioni ETS, 2009, ISBN 978-884672535-6, pp. 157-162

Tucci G., Bonora V., Nobile A., Tokmakidis K., **Surveying and documenting corbelled dome architectures**, in: Mecca S., Dipasquale L. (a cura di), *Earthen Domes and Habitats. Villages of Northern Syria: An architectural tradition shared by East and West*, Pisa, Edizioni ETS, 2009, ISBN 978-884672535-6, pp. 297-311

Tucci G., Cini D., Bonora V., Nobile A., **Proposta metodologica per la digitalizzazione 3D di reperti archeologici**, in: Jasink A. M., Tucci G., Bombardieri L. (a cura di), *MUSINT. Le Collezioni archeologiche egee e cipriote in Toscana: Ricerche ed esperienze di museologia interattiva*, Firenze, Firenze University Press, 2011, ISBN 978-886655083-9, pp. 65-100

Tucci G., Nobile A., Ridolfi G., Papacchini L., **La rupe tufacea di Pianiano (VT): dal rilievo integrato al progetto di consolidamento dei centri abitati instabili**, in: *Atti della XIV Conferenza Nazionale ASITA, Brescia, 9-12 novembre 2010*, 2010, ISBN 978-88-903132-5-7, pp. 1649-1654

Vosselman G., Maas H-G. (Eds), **Airborne and terrestrial laser scanning**, CRC, Boca Raton, 318, 2010, ISBN 978-1904445-87-6

Vu H. H., Keriven R., Labatut P., Pons J. P., **Towards high-resolution large-scale multiview stereo**, in: *IEEE Proceeding Conference CVPR'09*, 2009, pp. 1430-1437

UNESCO, **Photogrammetry applied to the Survey of Historic Monuments, of Sites and to Archaeology**, UNESCO editions, 1972

UNESCO, **Charter on the Preservation of the Digital Heritage**, 2003

CAPITOLO 2

SISTEMI A SCANSIONE 3D: DALL'ACQUISIZIONE ALL'ELABORAZIONE

Bonora V., Nobile A., Tucci G., **Modulo D11 – Scansione laser terrestre**, in: **Dispense dei corsi per Operatore Geomatico**, *Corsi di specializzazione pratica GeoCampus*, Leica Geosystems, 2011, pp. 40

English Heritage, **Metric Survey Specifications for English Heritage**, 2000

Eppich R., Chabbi A. (eds.), **Recording, Documentation, Information Management for the Conservation of Heritage Places - Vol. 2 Illustrated**

Examples, Los Angeles, The Getty Conservation Institute, 2007, ISBN 978-0-89236-946-1

Heine E., Van Genechten B., Lerma García J.L., Santana Quintero M., **3D RiskMapping. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning**, Übersetzt und Überarbeitet von Erwin Heine 152, Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2008, ISBN 978-84-8363-379-3

Guidi G., Remondino F., Morlando G., Del Mastio A., Uccheddu F., Pelagotti A., **Performances evaluation of a low cost active sensor for cultural heritage documentation**, in: Gruen A., Kahmen H. (eds.), *Proceedings of the 8th Conference on "Optical 3-D Measurement Techniques"*, Zurich, Switzerland, July 9-12 2007, Vol. 2, 2007, pp. 59-69

Guidi G., Russo M., Beraldin J. A., **Acquisizione 3D e modellazione poligonale**, McGraw-Hill Companies, 2010, ISBN 88-3866-531-1

Remondino F., **Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning**, *Remote Sensing*, 2011, 3(6), pp. 1104-1138

Russo M., Remondino F., Guidi G., **Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico**, *Archeologia e Calcolatori*, n. 22, 2011, pp. 169-198

Sacerdote F., Tucci G. (a cura di), **Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio**, Firenze, ALINEA, 2007, ISBN 978-88-6055-119-1, pp. 89-123

Stylianidis E., Patias P., Santana Quintero M. (eds.), **CIPA Heritage Documentation. Best Practices and Applications, Series 1, 2007 & 2009**, Greece, CIPA – The ICOMOS/ISPRS Committee for Documentation of Cultural Heritage, 2011, ISSN 1682-1777

CAPITOLI 3, 4, 5, 6
LA BASILICA DI SANTA MARIA DELL'UMILTÀ DI PISTOIA
IL RILIEVO 3D DELLA BASILICA
LA DOCUMENTAZIONE METRICA DELLA BASILICA
LA LETTURA DIAGNOSTICA DELLA BASILICA

Andreini A., Gori M., **Cappella della Madonna dell'Umiltà: trasformazioni urbane conseguenti all'edificazione della nuova chiesa**, in: Andreini A., Gori M. (a cura di), *Atti delle giornate di studio "Centenario del miracolo della Madonna dell'Umiltà a Pistoia"*, Pistoia 5-26 maggio 1992, Pistoia, Società Pistoiese di Storia Patria, 1992, pp. 41-70

Balletti C., Guerra F., Pilot L., **Integrazione di Tecnologie 3D multiscala per la conoscenza, l'interpretazione e la diffusione di un sito archeologico**, in: *Atti 10ª Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 14 - 17 Novembre 2006*, 2006, ISBN 88-900943-0-3



Bargiacchi L., **Tempio e opera della Madonna dell'Umiltà di Pistoia**, Pistoia, 1890

Bartoli G., Chiarugi A., Gusella V., **Monitoring systems on historic buildings: the Brunelleschi Dome**, *Journal of Structural Engineering - ASCE*, vol. 122(6), 1996, ISSN 0733-9445, pp. 663-673

Belluzzi A., **Giuliano da Sangallo e la chiesa della Madonna dell'Umiltà di Pistoia**, Firenze, Alinea, 1993

Belluzzi A., **Chiese a pianta centrale di Giuliano da Sangallo**, in: Garfagnini G. C. (a cura di), *Atti del convegno internazionale di studi Lorenzo il magnifico e il suo mondo*, Firenze, Giugno 1992, Firenze, 1994, pp. 385-406

Belluzzi A., **La Madonna dell'Umiltà a Pistoia**, in: Adorno B. (a cura di), *La Chiesa a pianta centrale: tempio civico del rinascimento*, Milano, Electa, 2002, pp. 107-117

Belluzzi A., **La Madonna dell'Umiltà a Pistoia**, *Il tremisse pistoiese*, anno XXXI, 1/2, Pistoia, 2006, pp. 20-25

Bitelli G.: **Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali**, in: *Atti 6ª Conferenza Nazionale ASITA, Perugia, 5 - 8 Novembre 2002*, 2002, pp. 5-8

Caroti G., De Falco A., **Geometric survey for the structural assessment of the architectural heritage: the case of the cupola of the baptistery of S. Giovanni e Reparata in Lucca**, in: *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W12*, 2003, ISSN 1682-1750, pp. 111-116

Caroti G., Pucci B., **Tecniche di rilievo per la rappresentazione di edifici storici**, *eARcom-Tecnologie per comunicare l'architettura*, Ancona, 2004, pp. 177-182

Corazzi R., Conti G., **Il segreto della cupola del Brunelleschi a Firenze**, Firenze, Pontecorboli Editore, 2011, ISBN 978-88-970801-0-7

Dami L., **Ventura Vitoni**, *Bullettino storico pistoiese*, Pistoia, Società Pistoiese di Storia Patria, anno XIV, Fasc. 1, 1914, pp. 1-40

Di Pasquale S., **La costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore**, Venezia, Biblioteca Marsilio, 2002

Ensoli L., Calonaci M., **Una cupola falsamente brunelleschiana: la Madonna dell'Umiltà di Pistoia**. Tesi di laurea in Architettura, Università degli studi di Firenze, 1986-1987 (Relatore: Di Pasquale S. / Correlatori Bati S., Tonietti U.)

Fossi M., **La basilica della Madonna dell'Umiltà di Pistoia. Lavori diretti da Bartolomeo Ammannati 1575 1585**, *Atti e Memorie dell'Accademia Toscana di Scienze e Lettere "La Colombaria"*, vol. 38, 1973, pp. 81-135

Fratini M., Pieraccini M., Betti M., Bartoli G., Atzeni C., **Assessment of**

vibration reduction on the Baptistery of San Giovanni in Florence (Italy) after vehicular traffic block, *Journal of Cultural Heritage* 2011; 12(3), pp. 323-328

Ghiretti A., **Lo studio del comportamento statico delle strutture antiche e le nuove tecnologie per il rilievo e la modellazione tridimensionale: la cupola esagonale di Santa Maria del Quartiere in Parma**, *Atti del Secondo Convegno Nazionale di Storia dell'Ingegneria*, Napoli, 2008, pp. 741-751

Guerra F., Balletti C., Adami A., **3D multiresolution representations in archaeological sites**, in: *Proceeding of the XX CIPA International Symposium "International Cooperation to save the World's Cultural Heritage"*, Turin, September 26 - October 01 2005, 2005

Ippolito L., **Aspetti costruttivi e strutturali delle cupole toscane dei secoli XV e XVI**, in: Conforti C. (a cura di), *Lo specchio del cielo. Forme, significati, tecniche e funzioni della cupola dal Pantheon al Novecento*, Milano, Electa, 1997, pp. 87-102

Lafri J., 1620, **Relazione di Jacopo Lafri Architetto Pistoiese sopra la Cupola Grande della Chiesa della Madonna dell'Umiltà della Città Antichissima di Pistoia**, Firenze, Biblioteca Nazionale Centrale, Fondo Rossi Cassigoli, ms. misc. 335

Mussolin M., **La basilica dell'Umiltà di Pistoia. Le vicende della fabbrica nei suoi cinque secoli di storia attraverso le fonti documentarie e le componenti materiali**. Assegno di ricerca universitaria, Università degli Studi di Firenze, 2008 (S.S.D. ICAR /18, Responsabile: Belluzzi A.)

Nelli G. B., **Discorsi di Architettura**, Firenze, Per gli eredi Paperini, 1753

Nobile A., **Acquisizione e trattamento dei dati per un rilievo tridimensionale di strutture architettoniche a doppia calotta: il caso della Basilica dell'Umiltà di Pistoia**. Assegno di ricerca universitaria, Università degli Studi di Firenze, 2008 (S.S.D. ICAR /06, Responsabile: Tucci G.)

Panighini F., **Il vestibolo della Basilica dell'Umiltà a Pistoia: il rilievo tridimensionale per il progetto di conservazione**. Tesi di laurea in Scienze dell'Architettura, Università degli Studi di Firenze, a.a. 2008-2009 (Relatore: Tucci G. / Correlatori: Tesi V., Bonora V.)

Panighini F., **Proposta di implementazione per il rilievo metrico nel sistema SICaR. Il caso della Basilica dell'Umiltà in Pistoia**. Tesi di Laurea Magistrale in Architettura, Università degli Studi di Firenze, a.a. 2011-2012 (Relatore: Tucci G. / Correlatori: Nobile A., Grilli R., Tesi V.)

Quinterio F., **Madonna dell'Umiltà: evoluzione del linguaggio centrico ed influenze morfologiche**, in: Bruscioni M. C. (a cura di), *Ventura Vitoni e il Rinascimento a Pistoia*, Pistoia, 1977, pp. 45-54

Riemma M., **La Basilica della Madonna dell'Umiltà di Pistoia. Dalla**



Banca dati 3D al rilievo tematico dell'aula ottagonale e della cupola per il progetto di conservazione. Tesi di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio, Politecnico di Milano, a.a. 2011-2012 (Relatori: Cruciani Fabozzi G., Tucci G. / Correlatori: Nobile A., Tesi V.)

Romby G. C., **Jacopo Lafri, architetto pistoiese del Cinquecento, Novità documentarie**, *Bullettino Storico Pistoiese*, 1989, p. 75

Romby G. C., **La Basilica della Madonna dell'Umiltà di Pistoia: tre secoli di restauro**, in: Andreini A., Gori M. (a cura di), *Atti delle giornate di studio "Centenario del miracolo della Madonna dell'Umiltà a Pistoia"*, Pistoia, 5-26 maggio 1992, Pistoia, Società Pistoiese di Storia Patria, 1992, pp. 87-110

Saint Aubin J. P., **Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura**, Bergamo, 1999
Satowski L., **Giorgio Vasari: architect end courtier**, Princeton, Princeton university press, 1993, pp. 61-66

Tomei I., **Il rilievo tridimensionale di strutture a doppia calotta: la Basilica dell'Umiltà di Pistoia.** Tesi di laurea in Scienze dell'Architettura, Università degli Studi di Firenze, a.a. 2009-2010 (Relatore: Tucci G. / Correlatori: Nobile A., Tesi V.)

Tonietti U., Ensoli L., Calonaci M., **Sulle condizioni statiche della cupola della Madonna dell'Umiltà di Pistoia: storia di una costruzione non propriamente brunelleschiana**, in: Andreini A., Gori M. (a cura di), *Atti delle giornate di studio "Centenario del miracolo della Madonna dell'Umiltà a Pistoia"*, Pistoia, 5-26 maggio 1992, Pistoia, Società Pistoiese di Storia Patria, 1992, pp. 87-110

Tucci G., Nobile A., Riemma M., **The Basilica della Madonna dell'Umiltà in Pistoia: survey, analysis and documentation**, in: *Proceedings of the XXIII CIPA International Symposium "Recording, Documentation and Information Management of Cultural Heritage, Archaeological and Architectural Heritage Conservation"*, Prague, Czech Republic, September 12-16 2011, 2011, ISBN 978-80-01-04885-6

Tucci G., Nobile A., Riemma M., Tesi V., **The Basilica della Madonna dell'Umiltà in Pistoia: 3D survey and study of geometry and structure of the dome**, in: *Proceedings of the "The Safeguard Of Cultural Heritage: a Challenge from the Past for the Europe of Tomorrow: COST Strategic Workshop"*, Florence, July 11-13 2011, Firenze, Firenze University Press, 2011, ISBN 978-88-6655-058-7, pp. 290-292

Tucci G., Riemma M., Nobile A., **Il contributo della geomatica all'avanzamento delle conoscenze sulla fabbrica dell'Umiltà a Pistoia**, in: Lepri N., Esseni S., Pagnini M. C. (a cura di), *Atti del Convegno Nazionale "Giorgio Vasari, tra capitale medicea e città del dominio, Pistoia, 14 ottobre 2011"*, Firenze, Edifir, 2012, ISBN 978-88-7970-549-3, pp. 59-68

UNESCO, **Charter on the Preservation of the Digital Heritage**, 2003

CAPITOLO 7

IL PROGETTO RISEM. LE TORRI DI SAN GIMIGNANO

Andreon F., Dallavalle G., Gasparini G., Trombetti T., **Le Torri Asinelli e Garisenda: le indagini e gli interventi di consolidamento**, *INARCOS*, vol. 4, 2011, 719, pp. 7-30

Balzani, M., Scopigno, R., Uccelli, F., **Il rilievo 3D per l'integrazione dei sistemi informativi di documentazione storica e di restauro della Cattedrale di Pisa e della Piazza dei Miracoli**, in: Genovese R. A. (a cura di), *Il Cantiere della Conoscenza - Metodologie e strumenti per la conservazione ed il restauro*, Napoli, Arte Tipografica Editrice, 2008, ISBN 978-88-89776-84-1, pp. 343-364

Bagnoli A., **La collegiata di San Gimignano. L'architettura, i cicli pittorici murali e i loro restauri**, Siena, Protagon Editori, Fondazione Monte dei Paschi di Siena, 2009, pp. 543, ISBN 978-88-8024-173-7

Bartoli G., Betti M., Tordini B., **Vulnerabilità sismica del patrimonio monumentale della Toscana: il caso della Torre Grossa di San Gimignano**, *Progettando ing® II (1)*, Edizioni Nerbini, 2007, pp. 44-56

Bartoli G., Borri C., Facchini L., Vignoli A., **Structural monitoring and dynamic identification of buildings, monuments and engineering facilities: some recent experiences**, in: *4th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN2002), Munich, Germany, 2-5 September 2002*, pp. 269-274

Bartolini G., Tronti M. (a cura di), **Sistema dei castelli e delle fortificazioni in terra di Siena. Dalla ricerca alla valorizzazione**, Firenze, All'Insegna del Giglio, 2005, ISBN 88-7814-303-0

Bertacchini E., Boni E., Capra A., Castagnetti C., Dubbini M., **Rilievo laser scanner per lo studio e l'analisi di strutture a sviluppo prevalentemente verticale: Torre Asinelli (Bologna), Torre Ghirlandina e della Sagra di Carpi (Modena)**, in: *Atti 13ª Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 1 - 4 Dicembre 2009*, 2009, ISBN 978-88-903132-2-6, pp. 375-376

Bertacchini E., Capra A., Castagnetti C., Dubbini M., **Il monitoraggio della Torre civica di Modena detta della "Ghirlandina"**, in: *Atti Convegno SIFET 2008 "La Topografia per le opere di ingegneria: Metodi, strumenti ed applicazioni"*, Sorrento, 18-20 giugno 2008, 2008, ISBN 88-901939-8-0

Bertacchini E., Capra A., Castagnetti C., Dubbini M., **Il rilievo laser scanner 3D della Torre Campanaria della Pieve di Santa Maria in Castello, detta La Sagra**, in: *Atti 12ª Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila, 21 - 24 ottobre 2008*, 2008, ISBN 978-88-903132-2-6, pp. 407-408

Boni E., **Tecniche di rilievo laser scanner per lo studio dei beni culturali: applicazione alla Torre della Sagra a Carpi (MO)**. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, a.a. 2007-2008 (Relatore: Capra A.)



Boni E., Capra A., Bertacchini E., Castagnetti C., **Laser scanner survey for 3D geometrical analysis of vertical extension structure applied to Asinelli Tower (Bologna-Italy), Ghirlandina Tower and Sagra Tower (Modena-Italy)**, in: *Proceeding of XXIV FIG International Congress 2010 "Facing the Challenges – Building the Capacity"*, Sidney, April 11-16 2010, 2010, ISBN 978-87-90907-87-7

Cadignani R. et al., **La torre Ghirlandina: un progetto per la conservazione**, Roma, Luca Sossella Editore, 2009, ISBN 978-88-8982-991-2

Cadignani R. et al., **La torre Ghirlandina: storia e restauro**, Roma, Luca Sossella Editore, 2010, ISBN 978-88-8982-991-2

Capra A., Bertacchini E., Castagnetti C., Dubbini M., Rivola R., Toschi I., **Rilievi laser scanner per l'analisi geometrica delle torri degli Asinelli e della Garisenda**, *INARCOS*, vol. 4, 2011, 719, pp. 35-42

Castagnetti C., Bertacchini E., Capra A., Dubbini M., **Il laser scanning terrestre per l'analisi di interesse storico ed artistico**, in: Manzino A., Spalla A. (a cura di), *Geomatica. Le radici del futuro (Tributo a Sergio Dequal & Riccardo Galetto)*, Cagliari, Edizioni SIFET, 2011, ISBN: 88-901939-6-4, pp. 99-107

Ceccarini I., **S. Gimignano: i fatti principali della storia urbanistica. Parte generale**, vol. I, San Gimignano, 1988

Ceccarini I., **S. Gimignano: i fatti principali della storia urbanistica. Dalla prima metà del sec. XX alle soglie del Duemila**, vol. II, San Gimignano, 1994

Civerra C., Lemme A., Cifani G., Podestà S., **Strumenti per il rilievo del danno e della vulnerabilità sismica ai Beni Culturali**, Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Soprintendenza per i Beni Architettonici, per il Paesaggio e per il Patrimonio Storico, Artistico e Etnoantropologico del Molise, 2007

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

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

Galli C., **Il rilievo critico quale contributo alla conoscenza delle fasi storico-costruttive di palazzo Accursio di Bologna (I parte)**, *INARCOS*, 2010, 711, pp. 455-461

Galli C., **Il rilievo critico quale contributo alla conoscenza delle fasi storico-costruttive di palazzo Accursio di Bologna (II parte)**, *INARCOS*, 2010, 712, pp. 537-545.

Guidoni E. (a cura di), **Toscana V. San Gimignano**, Atlante storico delle città italiane, Roma, Bonsignori Editore, 1997, ISBN 88-7597-288-5

Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del

patrimonio culturale con riferimento alle **Norme tecniche per le Costruzioni** di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008 (**NTC 2008**) ed alla relativa Circolare Ministero delle Infrastrutture n. 617 del 2 febbraio 2009 (**CM 2009**), in: *Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2009, Supplemento Ordinario n. 27*

Nobile A., **Strumenti e tecniche della geomatica per la salvaguardia dei Beni Monumentali: il caso studio delle Torri di San Gimignano**. Assegno di ricerca universitaria, Università degli Studi di Firenze, 2011 (S.S.D. ICAR /06 - ICAR /19, Responsabile: Giorgi L.)

Pesci A., Bonali E., Casula G., Boschi E., **Le informazioni estraibili dal dato laser scanner per lo studio di edifici storici**, *Archeomatica*, anno 2, n. 3/2011, Roma, A&C2000 srl, 2011, ISSN 2037-2485, pp. 12 - 16

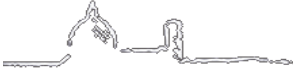
Pesci A., Bonali E., Galli C., Boschi E., **Laser scanning and the digital imaging for the investigation of an ancient building: Palazzo d'Accursio study case (Bologna, Italy)**, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 13, issue 2, Elsevier, 2012, ISSN 1296-2074, pp. 215-220, DOI: 10.1016/j.culher.2011.09.004

Pesci A., Casula G., Bonali E., Boschi E., **Un metodo per lo studio di edifici storici mediante misure laser a scansione terrestre: le Due Torri di Bologna**, *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*, n. 178, 2011, Roma, DOI:2122/6929

Pesci A., Casula G., Boschi E., **Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings**, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 12, issue 2, Elsevier, 2011, ISSN 1296-2074, pp. 117-127, DOI:10.1016/j.culher.2011.01.002

Podestà S., **Risposta sismica d'antichi edifici religiosi in muratura: sviluppo di nuovi modelli per l'analisi di vulnerabilità**, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Pavia, 2002

Santoro L., **Rischio sismico e patrimonio monumentale. Linee guida. Valutazione e riduzione del rischio sismico secondo le norme vigenti**, Palermo, Dario Flaccovio Editore, 2007, ISBN 978-88-7758-760-2



RINGRAZIAMENTI

RINGRAZIAMENTI

Grazie al prof. Carlo Atzeni che ha saputo trasformare questo percorso in un'esperienza formativa importante, produttiva ed entusiasmante

Grazie alla prof. ssa Grazia Tucci che mi ha dato l'opportunità di essere una "lasermetra", come mi ha definita uno stimato accademico fotogrammetra nonché caro amico

Grazie all'arch. Valerio Tesi per il proficuo confronto sulle migliori modalità di rappresentazione e leggibilità degli elaborati necessari al progetto di restauro e consolidamento della Basilica dell'Umiltà di Pistoia

Grazie al prof. Gianni Bartoli e all'ing. Michele Betti per il prezioso scambio del know-how sulle indagini strutturali delle Torri di San Gimignano

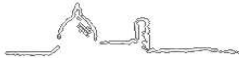
Grazie all'arch. Maria Riemma per la stimolante collaborazione nel lavoro di sperimentazione e ricerca

Grazie a Maurizio Buiani per il supporto tecnico e burocratico nelle indagini su San Gimignano

Grazie al Canonico, Don Ennio Fiorati, della Basilica di Santa Maria dell'Umiltà di Pistoia per la gentile accoglienza nel concedermi di esplorare gli spazi più segreti e inaccessibili della cupola

Grazie ai pistoiesi e ai sangimignanesi per la continua ospitalità nelle mie ripetute campagne di misura

Grazie a tutti i "miei" laureati di questi anni: Laura Bucalossi, Francesca Camurri, Katia Carlucci, Biagio Ferilli, Elena Magazzini, Evelina Matucci, Giulia Giachetti, Francesca Panighini, Angelo Paolino, Matteo Trapani, Ilaria Tomei... per le nuove sfide che mi avete proposto motivandomi ogni giorno nella ricerca di nuove soluzioni



Grazie a Francesco, per le mille e più attenzioni che mi ha sempre dedicato, per aver vissuto in piena simbiosi con me anche quando non era facile... per avermi indicato la strada nei lunghi e tortuosi pellegrinaggi mentali... grazie... semplicemente per esserci

Grazie alla mia adorata famiglia, che ha saputo sostenere le mie scelte anche quando avevamo opinioni divergenti e che è riuscita a spronarmi ricordandomi la vera meta del mio cammino

Grazie a zia Maria... per non aver mai smesso di credere in me e nella mia grinta

Grazie a Sonia, la mia migliore amica di sempre, per avere camminato anche questa volta al mio fianco

Grazie alle mie "sorelle" acquisite, Laura e Nadia, che hanno reso indimenticabile e appassionante ogni lavoro condiviso

Grazie alla piccola Gloria, per riuscire sempre a farmi sorridere con i suoi occhioni grandi, per donarmi serenità e pace, per insegnarmi in ogni momento cosa conta davvero

Un grazie speciale va a chi non sarà al mio fianco ma che ha diretto, dietro le quinte, le fila di questo importante impegno... per non dimenticare che la vita deve essere vissuta e non sopravvissuta... grazie Nì... ogni giorno senza te non è lo stesso... mi manchi infinitamente

Grazie a tutti di cuore