

**ADAM** . Architettura, Disegno, Arte e Modellazione  
Architecture, Design, Art, and Modeling

Federico II University Press



**La Camera degli Sposi del Palazzo Ducale di Mantova.  
Rilevare e rivelare l'opera di Andrea Mantegna**

Mara Gallo

### 03 . La camera degli Sposi nel Palazzo Ducale di Mantova. Rilevare e rivelare l'opera di Andrea Mantegna

a cura di | edited by Mara Gallo

**Napoli: FedOAPress, 2025**

(ADAM . Architettura, Disegno, Arte e Modellazione | Architecture, Design, Art, and Modeling; 03)

262 pp.; 21x21 cm

Accesso alla versione elettronica | Access to the electronic version

<http://www.fedoapress.unina.it>

ISBN: 978-88-6887-384-4

DOI: 10.6093/978-88-6887-384-4

**ADAM . Architettura, Disegno, Arte e Modellazione | Architecture, Design, Art, and Modeling**

**Collana editoriale | Book Series**

**fedOAPress - Federico II University Press**

Tutti i libri sono sottoposti a peer review secondo la modalità del doppio cieco | All books are peer-reviewed in a double-blind mode.

**Direttori | Directors**

Massimiliano Campi (Università degli Studi di Napoli Federico II), Antonella di Luggo (Università degli Studi di Napoli Federico II)

**Comitato Scientifico Internazionale | International Scientific Committee**

Marco Giorgio Bevilacqua (Università di Pisa), Massimiliano Campi (Università degli Studi di Napoli Federico II), Valeria Cera (Università degli Studi di Napoli Federico II), Oscar Cosido Cobos (Universidad de Oviedo), Francesco Cutugno (Università degli Studi di Napoli Federico II), Livio De Luca (CNRS Marseille - Centre National de La Recherche Scientifique), Susana Irene Diaz Rodriguez (Universidad de Oviedo), Antonella di Luggo (Università degli Studi di Napoli Federico II), Sergio Di Martino (Università degli Studi di Napoli Federico II), 高迎进 Yingjin Gao (Nankai University), Andrea Giordano (Università di Padova), Josefina Garcia Leon (Universidad Politecnica de Cartagena), Fabio Menna (Fondazione Bruno Kessler, Trento), Arnadi Murtiyoso (ETH Zurigo), Andreas Nüchter (Universität Würzburg), Antonio Origlia (Università degli Studi di Napoli Federico II), Daniela Palomba (Università degli Studi di Napoli Federico II), Sofia Pescarin (CNR ISPC - Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale), Cristiano Riminesi (CNR ISPC - Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale), Michele Russo (Università La Sapienza), Simona Scandurra (Università degli Studi di Napoli Federico II), Andrew Scott Johnston (University of Virginia), Roberta Spallone (Politecnico di Torino), Philippe Veron (École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech).

**Comitato redazionale | Editorial Committee**

Valeria Cera (coordinamento | coordination), Marika Falcone, Arianna Lo Pilato

**Immagine in copertina | Cover Image**

Mara Gallo

L'editore fedOAPress non è responsabile della gestione di eventuali rivendicazioni relative alla paternità di citazioni, immagini, tabelle, ecc. L'autore ha la piena responsabilità per i contenuti del proprio saggio | The publisher fedOAPress is not responsible for the handling of any claims regarding the authorship of quotations, images, tables, etc. The author is fully responsible for the content of her essay.

© 2025 FedOAPress - Federico II University Press

Università degli Studi di Napoli Federico II

Centro di Ateneo per le Biblioteche "Roberto Pettorino"

Piazza Bellini 59-60

80138 Napoli, Italy

<http://www.fedoapress.unina.it>

Publicato in Italia. Prima edizione: novembre 2025 | Published in Italy. First digital edition: november 2025

Gli E-Book di FedOAPress sono pubblicati con licenza Creative Commons Attribution 4.0 International |

FedOAPress E-Books are published under a Creative Commons Attribution 4.0 International licence



Federico II University Press



fedOA Press

Mara Gallo

**La Camera degli Sposi nel Palazzo Ducale di Mantova.  
Rilevare e rivelare l'opera di Andrea Mantegna**

**ADAM . Architettura, Disegno, Arte e Modellazione | Architecture, Design, Art, and Modeling**

Federico II University Press



fedOA Press



- 9      **PREFAZIONE**  
a cura di Antonella di Luggo
- 13     **INTRODUZIONE**
- 19     **CAPITOLO 1**  
La Camera degli Sposi nel Palazzo Ducale di Mantova: un metodo per la conoscenza
- 1.1     Mantova: storia, architettura e identità attraverso i secoli
- 1.2     Il Palazzo Ducale di Mantova, la reggia dei Gonzaga
- 1.3     Letture preliminari della Camera degli Sposi
- 41     **CAPITOLO 2**  
Rete topografica integrata per la conservazione del Patrimonio
- 2.1     La pianificazione del rilievo topografico
- 2.2     Sviluppo e controllo di una rete topografica per il rilievo del Palazzo Ducale
- 2.3     Creazione di una rete di dettaglio nella Camera degli Sposi
- 51     **CAPITOLO 3**  
Rilievi *reality-based* del Palazzo Ducale e della Camera degli Sposi
- 3.1     Il rilievo tridimensionale con tecnologie *range-based*
- 3.2     Filtraggio ed operazioni di *post-processing* della nuvola di punti
- 3.3     Il rilievo tridimensionale con tecnologie *image-based*
- 3.4     La calibrazione del colore tramite *color checker*
- 3.5     Confronto e integrazione delle due metodologie
- 71     **CAPITOLO 4**  
Analisi delle superfici affrescate a partire dalle ortofoto ad alta risoluzione
- 4.1     La Volta
- 4.1.1    L'oculo
- 4.1.2    Il tributo classico: simboli imperiali e mitologia
- 4.2     Le pareti

- 4.2.1 La parete nord o ‘della Corte’
  - 4.2.1.1 Le lunette della parete nord
  - 4.2.1.2 I personaggi della parete nord
  - 4.2.1.3 Il secondo settore della parete nord
  - 4.2.1.4 Il terzo settore della parete nord
- 4.2.2 La parete ovest o ‘dell’Incontro’
  - 4.2.2.1 Le lunette della parete ovest
  - 4.2.2.2 Il paesaggio della parete ovest
  - 4.2.2.3 I personaggi della parete ovest
  - 4.2.2.4 Il primo settore della parete ovest
  - 4.2.2.5 Il secondo settore della parete ovest
  - 4.2.2.6 Il terzo settore della parete ovest
  - 4.2.2.7 Dettagli artistici della parete ovest
- 4.2.3 La parete sud
- 4.2.4 La parete est

## **111      CAPITOLO 5**

Modelli 3D per la fruizione virtuale del Patrimonio Artistico

- 5.1      Dati integrati per il modello della Camera degli Sposi
- 5.2      Ottimizzazione del modello per la fruizione virtuale
- 5.3      *Texture* e personalizzazione per la realtà virtuale

## **121      CAPITOLO 6**

Sistemi voltati e lunette: indagine tra morfologia, struttura e ricostruzione 3D

- 6.1      Analisi morfologica, dinamiche strutturali e classificazioni
- 6.2      Analisi geometrica e ricostruzione 3D della volta
- 6.3      La volta polilunettata

## **129      CAPITOLO 7**

Illusionismo prospettico: dal realismo pittorico alle ipotesi ricostruttive

- 7.1      Le prospettive architettoniche tra illusione e realtà
- 7.2      L’illusionismo prospettico di Mantegna
- 7.3      L’indagine tra rappresentazione pittorica e realtà materiale

- 7.4 Applicazione e verifica dell'idea configurativa
- 7.5 Verifica e modellazione delle ipotesi ricostruttive della balaustra

## 145 **CAPITOLO 8**

Fruizione virtuale per la valorizzazione della Camera degli Sposi

- 8.1 La virtualizzazione del Patrimonio Storico
- 8.2 Un approccio immersivo per la valorizzazione
  - 8.2.1 Scelta strategica di *software* e dispositivi per applicazioni VR accessibili
- 8.3 Analisi delle scene e delle modalità di interazione
  - 8.3.1 L'esplorazione del modello 3D
  - 8.3.2 Esplorazione iconografica in realtà virtuale
  - 8.3.3 Ricostruzione 3D del loggiato e analisi degli affreschi

## 167 **CONCLUSIONE**

## 169 **INTRODUZIONE ALL'APPENDICE**

## 171 **APPENDICE A**

Metodologie e strumenti per la conservazione e la valorizzazione

- A.1 La documentazione del Patrimonio e i sistemi di rilievo *reality-based*
- A.2 Principali tecniche *reality-based*
  - A.2.1 I sistemi *range-based*
  - A.2.2 I sistemi *image-based*
- A.3 Processi di acquisizione *reality-based*: confronto e integrazione

## 185 **APPENDICE B**

L'inquadramento topografico

- B.1 Geomatica e rappresentazione del patrimonio
- B.2 Scelta del sistema di riferimento per la misurazione accurata
- B.3 Creazione di una rete topografica di base

<b>195</b>	<b>APPENDICE C</b>
	La modellazione 3D
	C.1      Categorie, tecniche e metodi della modellazione tridimensionale
	C.1.1    Categorie della modellazione 3D
	C.1.2    Tecniche della modellazione 3D
	C.1.3    Principali metodi di modellazione 3D
	C.2      Modello 3D a partire dal rilievo digitale
	C.3      Modello 3D per la fruizione virtuale
	C.3.1    Semplificazione del modello per la fruizione virtuale
<b>211</b>	<b>APPENDICE D</b>
	Tecnologie virtuali per il Patrimonio Costruito
	D.1      Comunicazione e <i>visual design</i> per l'architettura
	D.2      L' <i>Extended Reality</i> e l'interazione uomo-tecnologia
	D.2.1    La realtà aumentata (AR)
	D.2.2    La realtà virtuale (VR)
	D.3      Applicazioni VR nei beni culturali
<b>225</b>	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b>

## **PREFAZIONE**

a cura di Antonella di Luggo

Negli ultimi anni i sistemi di documentazione digitale hanno assunto un ruolo di primo piano nell'ambito delle attività finalizzate alla conoscenza, alla documentazione e alla comunicazione del patrimonio culturale, in virtù delle potenzialità insite nelle stesse tecnologie, che consentono di acquisire in tempi ridottissimi una grande quantità di dati e soprattutto di utilizzarli per accrescere il dato informativo nell'ambito di piattaforme per la fruizione virtuale o aumentata.

Tali processi si inscrivono all'interno delle discipline del Rilievo e della Rappresentazione, quando le operazioni, nelle varie fasi di elaborazione, sono caratterizzate da un approccio critico e di lettura interpretativa del dato, anche nello spazio digitale.

È questo il caso della ricerca condotta da Mara Gallo e raccolta in questo volume che documenta le diverse attività finalizzate alla conoscenza ampliata di un'opera di straordinario interesse, un capolavoro assoluto del Rinascimento italiano, quale è la Camera degli Sposi nel Palazzo Ducale di Mantova.

Ed è nelle modalità con cui l'autrice ha sviluppato la ricerca che si conferma lo statuto disciplinare del Rilievo quale operazione colta, fondata su un attento lavoro di analisi, di studio e di comprensione del significato dell'opera, dove i sistemi di acquisizione avanzata e gli strumenti di modellazione tridimensionale, sono stati utilizzati nell'ottica di produrre nuova conoscenza, predisponendo modelli digitali esplorabili nell'ambito di un processo che consente, non soltanto la visualizzazione dell'opera, ma anche la sua fruizione virtuale o aumentata.

## PREFAZIONE

Quest'ultima viene esplicitata attraverso una lettura in profondità, muovendosi la ricerca di Mara Gallo dal generale al particolare, fino all'analisi dei più minuti aspetti iconografici e dell'apparato decorativo e alla ricostruzione degli spazi illusori.

I numerosi studi pregressi condotti sull'argomento, riportati nell'ampia bibliografia a conclusione del testo, sono stati per l'autrice una base conoscitiva fondamentale per cogliere e restituire in modo appropriato lo straordinario valore e le specificità dell'opera, nell'ottica di predisporre un lavoro capace di coniugare ricerca storica, artistica, architettonica con quanto ottenibile con l'applicazione di tecnologie di ultima generazione. La documentazione raccolta nella fase iniziale è stata implementata nello spazio digitale del modello 3D, realizzato a partire dai dati acquisiti tramite *laser scanner* e fotogrammetria ad altissima risoluzione, consentendo, negli esiti, una fruizione aumentata, con la visualizzazione di dettagli non percepibili nella visita *in loco* e arricchendo il dato visivo con tutte le informazioni contenute nel modello informativo.

Il volume si suddivide in otto capitoli che enucleano in modo puntuale le diverse fasi della ricerca e si conclude con un'appendice sulle tecnologie di rilievo, sui sistemi di modellazione 3D e sulle tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale. Al di là dell'articolazione in capitoli che presentano in modo chiaro l'*iter* della ricerca, nel corpo del volume possono implicitamente individuarsi tre parti principali, di cui la prima è relativa al contesto, all'inquadramento storico della Camera degli Sposi, alla descrizione delle fasi e dei metodi utilizzati per il rilievo, nonché alla descrizione puntuale dello spazio e delle superfici affrescate. La parte centrale è invece relativa alla gestione e alla elaborazione dei dati acquisiti attraverso ricostruzioni e modellazioni 3D. L'ultima fase - che ha un carattere chiaramente sperimentale - è dedicata alla comunicazione e alla fruizione virtuale e aumentata dello spazio indagato.

Questa ultima costituisce il cuore della ricerca, dove Mara Gallo, attraverso l'integrazione di dati di diversa natura (metrici, materici, storici, descrittivi), nonché attraverso la modellazione, la gestione dei

modelli e la ricostruzione virtuale delle spazialità dipinte del Mantegna, costruisce un sistema informativo che dà luogo a una conoscenza multidimensionale del bene, dove le tecnologie utilizzate sono state sapientemente intese come strumenti grazie ai quali sviluppare nuovi contenuti digitali, che costituiscono il valore scientifico della ricerca che qui viene presentata.

In tale ambito di riflessioni, la Rappresentazione si conferma, anche nel *medium* digitale, non quale operazione fine a sé stessa per la semplice trascrizione del dato, ma quale strumento critico e interpretativo, atto a produrre conoscenza.

Ciò che qualifica ancor più il volume è il rigore metodologico con cui vengono affrontate e descritte le varie fasi del lavoro, avvalendosi il testo scritto di eleganti elaborazioni grafiche redatte dalla stessa autrice, che esplicitano ulteriormente i processi eseguiti.

In tale ambito, il modello digitale assume il ruolo di luogo unitario in grado di aprirsi a molteplici percorsi narrativi, includendo in questi anche le ricostruzioni virtuali, grazie alla possibilità di implementare, all'interno del dato metrico e geometrico, l'universo discorsivo degli studi pregressi sul tema e che, attraverso la rappresentazione, si offre nelle sue diverse declinazioni.

Questo lavoro è un'ulteriore conferma che la sinergia tra i sistemi di acquisizione digitale, la modellazione 3D avanzata e le tecnologie immersive costituisce un paradigma abilitante in grado di promuovere, attraverso nuovi linguaggi visivi, esperienze culturali che possono offrirsi a una utenza diversificata, dando vita ad una modalità di conoscenza che si apre a un universo potenzialmente illimitato di connessioni ipertestuali, dove esplorare anche i mondi immaginari che le illusioni prospettiche suggeriscono.



## INTRODUZIONE

### I. Contesto e prospettive

La rappresentazione dell'architettura ha sempre costituito uno strumento essenziale per la conoscenza e la trasmissione del Patrimonio Costruito.

Fin dall'antichità, il disegno architettonico ha accompagnato la progettazione, la costruzione e la documentazione degli edifici, evolvendosi di pari passo con le trasformazioni culturali e con l'evoluzione degli strumenti tecnici. La rappresentazione è, infatti, il luogo in cui si rende visibile la relazione tra pensiero e costruzione, tra dimensione materiale e dimensione ideale.

Nel corso dei secoli, la funzione della rappresentazione è mutata: da strumento di controllo costruttivo e di comunicazione progettuale, è diventata anche mezzo di indagine storica e critica, soprattutto per il patrimonio esistente. A partire dal XIX secolo, con la nascita delle discipline del Rilievo e della Storia dell'Architettura, la documentazione grafica ha assunto un ruolo centrale nei processi di conoscenza, di conservazione e di valorizzazione dei beni architettonici. Negli ultimi decenni, l'avvento delle tecnologie digitali ha prodotto una trasformazione radicale: le tecniche di rilievo avanzato e la modellazione tridimensionale consentono oggi di generare rappresentazioni che vanno ben oltre la semplice registrazione geometrica. L'acquisizione tramite strumenti *reality-based* (*laser scanner*, fotogrammetria digitale,

## INTRODUZIONE

sensoristica integrata) permette di costruire modelli tridimensionali ad alta fedeltà, che restituiscono la complessità materica, iconografica e cromatica dell'opera.

Questi modelli diventano supporti per la ricerca, la progettazione di interventi conservativi e la comunicazione pubblica, grazie alla possibilità di integrarli in sistemi informativi, piattaforme di realtà virtuale e ambienti immersivi. Parallelamente, il linguaggio della rappresentazione si è ampliato: non più solo disegno bidimensionale, ma ecosistemi digitali complessi, capaci di mettere in relazione dati eterogenei - metrici, storici, materici, iconografici - e di restituirli in modalità interattive.

Questo mutamento ha aperto nuove prospettive per la conoscenza e la valorizzazione del Patrimonio Culturale, modificando profondamente i processi disciplinari e i ruoli degli attori coinvolti.

### **II. Finalità della ricerca e approccio metodologico**

In questo contesto, la presente ricerca si colloca all'interno del disciplinare del Rilievo e della Rappresentazione dell'Architettura, con l'obiettivo di sperimentare un *workflow* integrato per la costruzione di modelli tridimensionali interattivi, destinati alla fruizione immersiva in ambienti di realtà virtuale. La ricerca intende esplorare la relazione tra strumenti di rilievo digitale, modelli tridimensionali e strategie di comunicazione immersiva, assumendo la rappresentazione non come fine, ma come mezzo operativo per produrre conoscenza.

L'impostazione metodologica si articola su due livelli principali:  
- Livello teorico e metodologico: chiarisce i presupposti disciplinari, i riferimenti teorici e i principi tecnici alla base delle scelte operative.

In particolare, vengono affrontati i temi legati all'integrazione di diverse tecniche di rilievo (*range-based* e *image-based*), alla costruzione di reti topografiche di riferimento, ai metodi di modellazione tridimensionale e all'uso delle tecnologie immersive per la valorizzazione.

- Livello applicativo e sperimentale: riguarda la verifica sul campo delle

metodologie attraverso un caso studio di eccezionale valore storico-artistico, la Camera degli Sposi nel Palazzo Ducale di Mantova.

Qui vengono messe alla prova le procedure operative in un contesto reale, complesso e stratificato, nel quale la compresenza di architettura, decorazione pittorica e apparato simbolico costituisce un banco di prova ideale.

Un elemento centrale è l'integrazione critica delle tecniche di rilievo *reality-based*: la fotogrammetria e il *laser scanner* non sono utilizzati in modo automatico, ma sottoposti a una selezione e organizzazione multilivello dei dati, volta a isolare le informazioni effettivamente significative per l'analisi e la fruizione. Questa impostazione permette di costruire un modello digitale non meramente 'replicativo', ma interpretativo, capace di restituire la complessità dell'opera e di supportare analisi e ricostruzioni.

### **III. Ambito di indagine: la Camera degli Sposi**

La scelta della Camera degli Sposi del Palazzo Ducale di Mantova come caso studio nasce dalla volontà di misurare le potenzialità delle metodologie digitali su un'opera emblematica del Rinascimento italiano. Si tratta di un ambiente celebre e al tempo stesso complesso: una stanza di dimensioni relativamente contenute, ma interamente decorata da Andrea Mantegna con un apparato pittorico che trasforma lo spazio architettonico in una scena illusiva e teatrale. Le superfici dipinte - pareti e volta - costituiscono un eccezionale esempio di illusionismo prospettico, con una molteplicità di dettagli figurativi, simbolici e architettonici. L'ambiente è inoltre situato all'interno di un sistema architettonico articolato, quello del Castello di San Giorgio, inserito a sua volta nel vasto complesso del Palazzo Ducale. Questo contesto ha reso necessario impostare un lavoro di documentazione articolato, che ha previsto:

- la definizione di reti topografiche integrate, per garantire la precisione e la coerenza geometrica tra ambienti interni ed esterni;

## INTRODUZIONE

- l'acquisizione di dati tridimensionali ad alta risoluzione tramite *laser scanner* e fotogrammetria digitale, con particolare attenzione alla resa cromatica e alla calibrazione dei colori per la documentazione delle superfici affrescate;
- la successiva modellazione tridimensionale dei dati raccolti, con fasi di semplificazione e ottimizzazione volte a rendere il modello fruibile in ambienti virtuali;
- la progettazione di esperienze immersive che consentano di esplorare la Camera degli Sposi e il suo apparato pittorico superando le limitazioni spaziali e temporali della visita fisica.

Questa sperimentazione ha permesso di mettere in luce i vantaggi e le criticità dei processi digitali quando vengono applicati a contesti storici di particolare delicatezza e complessità.

### IV. Struttura del volume

Il volume è organizzato secondo una logica che distingue in modo chiaro la parte applicativa e sperimentale, che costituisce il corpo centrale del testo, e la parte teorico-metodologica, collocata in appendice.

- Nei capitoli principali vengono presentati il contesto storico e architettonico della Camera degli Sposi, le strategie di rilievo e documentazione adottate, la modellazione tridimensionale e le modalità di fruizione immersiva sviluppate. L'obiettivo è raccontare la ricerca come processo operativo, coerente e verificabile.

- Nelle Appendici A–D sono raccolti i contenuti teorici e metodologici che costituiscono la base strumentale della ricerca: tecniche di rilievo, sistemi topografici, approcci alla modellazione 3D e potenzialità delle tecnologie immersive. Questi materiali, pur non essendo il fulcro del volume, sono indispensabili per comprendere le scelte e le procedure operative adottate. La decisione di collocare questi contenuti in appendice risponde alla volontà di rendere la lettura più lineare e focalizzata sull'indagine applicativa, senza rinunciare a fornire un quadro completo e strutturato per chi voglia approfondire gli aspetti tecnici e disciplinari.

## **V. Conclusioni introduttive**

La ricerca qui presentata intende contribuire alla riflessione sul ruolo della rappresentazione digitale come strumento di conoscenza e valorizzazione del Patrimonio Architettonico.

Attraverso l'integrazione tra rilievo avanzato, modellazione tridimensionale e tecnologie immersive, si propone un percorso operativo che mira a coniugare rigore scientifico e innovazione tecnologica, offrendo al tempo stesso nuove prospettive di fruizione e interpretazione. La Camera degli Sposi è assunta non solo come caso studio, ma come luogo di confronto disciplinare: tra spazio reale e spazio rappresentato, tra materia e immagine, tra conoscenza scientifica e comunicazione pubblica.

In questo senso, la ricerca aspira a collocarsi in una linea di studi che, pur radicata nella tradizione del rilievo e della rappresentazione, guarda con consapevolezza critica alle potenzialità offerte dagli strumenti digitali contemporanei.



## CAPITOLO 1

La Camera degli Sposi nel Palazzo Ducale di Mantova: un metodo per la conoscenza

La scelta della Camera degli Sposi, situata all'interno del Castello di San Giorgio nel complesso del Palazzo Ducale di Mantova, risponde all'esigenza di individuare un caso studio capace di mettere alla prova metodologie di rilievo e rappresentazione in un contesto architettonico e decorativo di straordinaria complessità. Questo ambiente, celebre per l'intervento pittorico di Andrea Mantegna<sup>1</sup>, realizzato tra il 1465 e il 1474 (fig. 1.1), costituisce uno degli esempi più alti dell'illusionismo prospettico rinascimentale e rappresenta un nodo fondamentale per la comprensione dei rapporti tra spazio reale e spazio figurato nel Quattrocento italiano. La Camera si distingue per la perfetta integrazione tra architettura e pittura: l'apparato decorativo trasforma le pareti e la volta in una scena illusionistica unitaria, nella quale elementi figurativi, architettonici e simbolici concorrono a costruire una narrazione dinastica e celebrativa. La qualità pittorica delle superfici, la raffinatezza delle soluzioni prospettiche e la densità iconografica ne fanno un caso di studio privilegiato, in grado di sollecitare approcci analitici differenti e complementari. La compresenza di molteplici livelli di lettura - storico-artistico, architettonico, decorativo, tecnico - ha richiesto un'impostazione metodologica capace di articolare la fase di rilievo e documentazione in modo multilivello, integrando dati storici, metrici e materici. A ciò si aggiunge la collocazione della Camera all'interno di un sistema edilizio articolato e stratificato, risultato di una lunga e complessa evoluzione costruttiva che coinvolge l'intero complesso del Palazzo Ducale (figg. 1.2, 1.3).

CAPITOLO 1

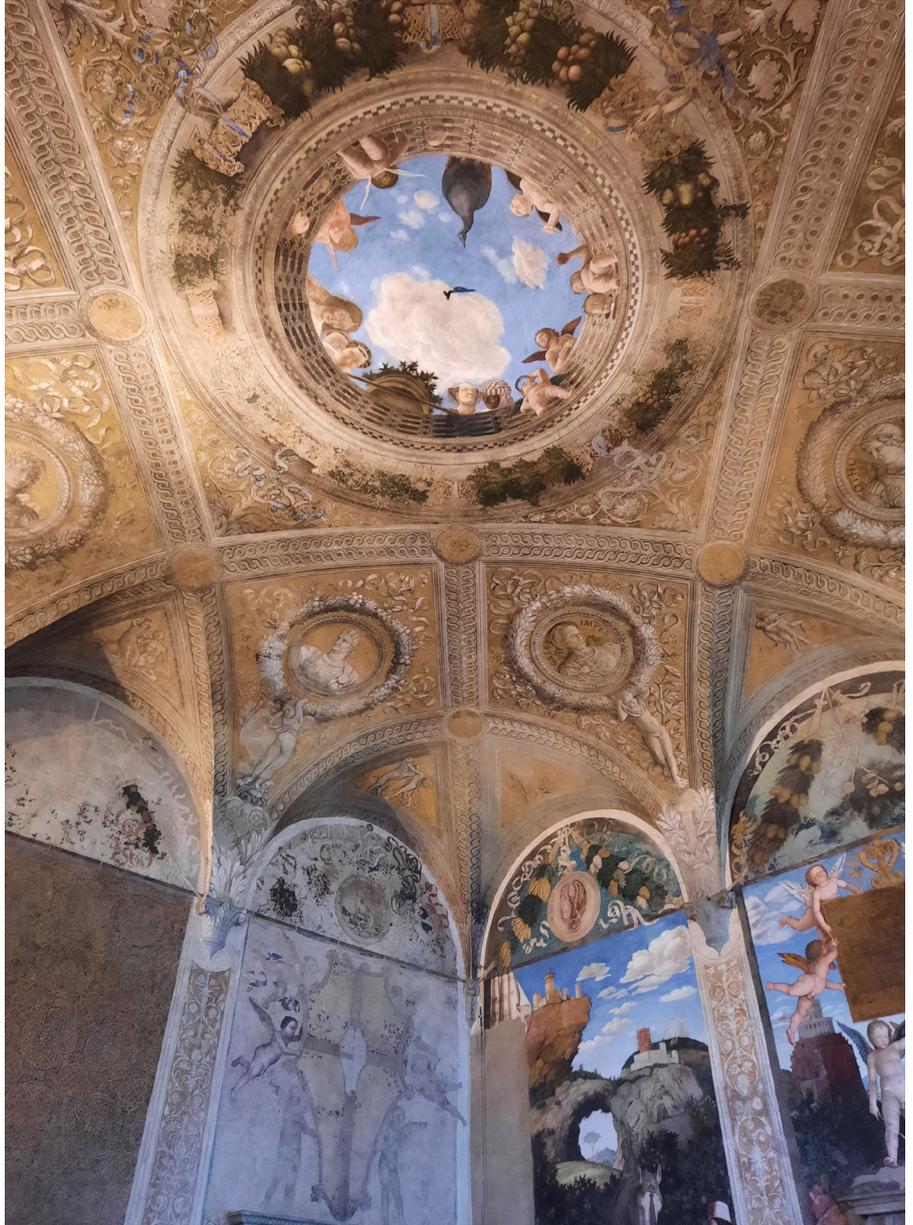


Fig. 1.1 - Ambiente centrale della Camera degli Sposi con vista sulla volta e sulle pareti ovest e sud.

In questa prospettiva, la Camera degli Sposi rappresenta un banco di sperimentazione particolarmente significativo per verificare l'efficacia delle procedure integrate di rilievo digitale, modellazione tridimensionale e restituzione immersiva. L'impiego di tecnologie di realtà virtuale assume un ruolo centrale: la costruzione di ambienti digitali interattivi consente di superare i limiti della fruizione fisica dello spazio, offrendo nuove modalità di accesso, esplorazione e comprensione dell'opera. La VR diventa così uno strumento operativo per mettere in relazione la dimensione scientifica della documentazione con quella comunicativa e divulgativa, senza ridurne la complessità. Considerata la vasta mole di studi dedicati alla Camera degli Sposi, la prima fase del lavoro è stata dedicata alla raccolta e organizzazione della documentazione storica e iconografica disponibile, al fine di costruire una base conoscitiva solida e mirata.

Questa attività ha consentito di inquadrare con precisione il bene, sia sotto il profilo storico-artistico sia in relazione alla sua collocazione architettonica all'interno del Palazzo Ducale, ponendo le premesse per una corretta pianificazione delle operazioni successive.



*Fig. 1.2 - Complesso del Palazzo Ducale di Mantova nel contesto urbano. Immagine elaborata sulla base delle foto satellitari di Google Earth.*

## CAPITOLO 1

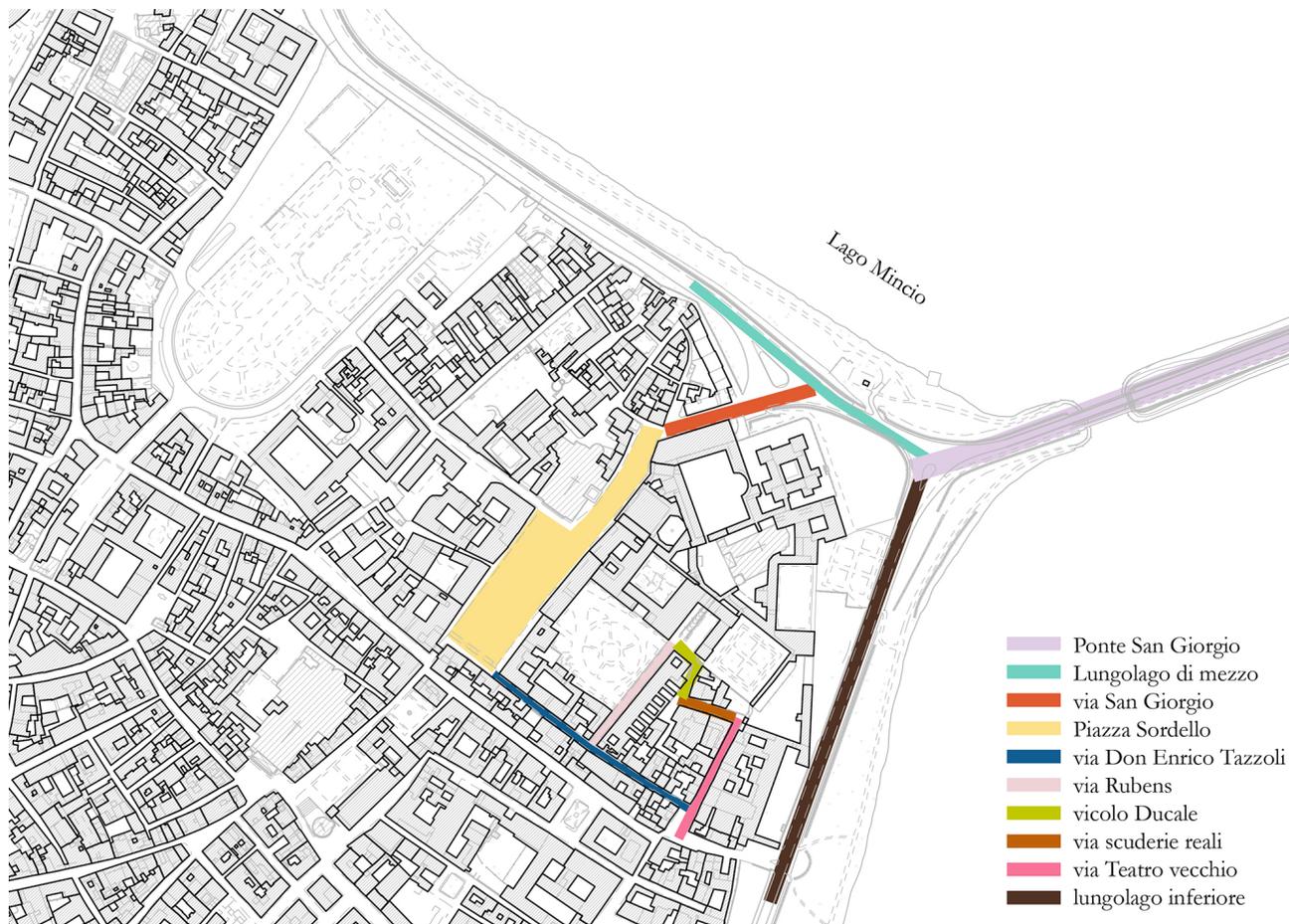


Fig. 1.3 - Individuazione delle vie che costeggiano il Palazzo Ducale.

Le attività operative sono iniziate con una campagna topografica di inquadramento, finalizzata a determinare con precisione la posizione geografica e spaziale degli elementi significativi del complesso.

Sono stati impiegati sistemi di riferimento globali e metodologie di rilievo integrate, al fine di garantire la coerenza geometrica tra l'interno della Camera, il Castello di San Giorgio e il tessuto urbano circostante. A partire da questa base topografica, è stata condotta un'ampia fase di

acquisizione tridimensionale mediante strumenti con sensori ottici passivi e attivi, secondo protocolli operativi consolidati (Cfr. Appendice A).

I dati metrici e colorimetrici raccolti sono stati elaborati attraverso processi di filtraggio e pulizia, per isolare le informazioni rilevanti e predisporre un modello tridimensionale ad alta fedeltà, georiferito e coerente con il sistema di riferimento globale. Tale modello ha costituito la base per le successive operazioni di ottimizzazione e di integrazione nei sistemi di fruizione immersiva, aprendo la strada allo sviluppo delle fasi analitiche e ricostruttive illustrate nei capitoli seguenti.

### 1.1 Mantova: storia, architettura e identità attraverso i secoli

Ai fini della comprensione dell'oggetto di studio, è parso opportuno un approfondimento esteso al contesto in cui si colloca, e dunque al Palazzo Ducale, con particolare riferimento alle sue trasformazioni rilette nell'ambito dell'evoluzione stessa della città di Mantova.

Mantova, situata sulle rive del fiume Mincio, sorge in una zona paludosa che è stata progressivamente bonificata nel corso dei secoli. Le sue origini risalgono ad epoche remote, probabilmente a quella etrusca<sup>2</sup>. L'evoluzione della città non è stata semplicemente plasmata dalla sua posizione geografica, ma anche da una fervente storia politica e dai mecenati che l'hanno sostenuta nel corso dei secoli. Mantova, infatti, ha conosciuto il dominio di diverse civiltà, ognuna delle quali ha lasciato un'impronta indelebile nella sua identità. Dalle influenze dei Galli ai fasti Romani, Mantova ha assimilato e reinterpretato le diverse influenze culturali che si sono succedute nel corso del tempo. In particolare, con la caduta dell'Impero Romano, la città medievale ha vissuto periodi di tumulto con le invasioni dei Goti, dei Bizantini, dei Longobardi e dei Franchi, distinguendosi come uno dei domini feudali della potente famiglia dei Canossa<sup>3</sup>. Successivamente, la città ha ottenuto lo *status* di libero comune, difendendosi strenuamente dalle forze imperiali e vivendo un periodo di espansione e sviluppo architettonico senza precedenti. Durante il periodo delle lotte tra le fazioni dei Guelfi e dei



Fig. 1.4 - [Bertazzolo, 1626]



Fig. 1.5 - [Bertelli, 1629]



Fig. 1.6 - [Leopold, 1630]

## CAPITOLO 1



Fig. 1.7 - [Marini, 1880]



Fig. 1.8 - [Raineri, 1831]



Fig. 1.9 - [Vallardi, 1848]

Ghibellini, Mantova è stata conquistata da Pinamonte Bonacolsi<sup>4</sup>, il quale ha favorito una fervente attività artistica, fino al 1323, anno in cui prende avvio la lunga e celebre dinastia dei Gonzaga<sup>5</sup>. Sotto il governo di questo casato, Mantova ha conosciuto un'epoca di straordinario splendore e un fervore artistico senza pari. I Gonzaga infatti, hanno trasformato la città, con la costruzione di sontuosi palazzi, chiese e teatri<sup>6</sup>. Il XVII e XVIII secolo hanno visto Mantova sotto il dominio della famiglia austriaca degli Asburgo<sup>7</sup>, vivendo un periodo caratterizzato da trasformazioni urbane che hanno dato alla città un nuovo volto, con la costruzione di nuove strade e piazze [Annibaletti, 2009].

Con l'unificazione dell'Italia nel XIX secolo, Mantova ha vissuto un'epoca di cambiamenti industriali e trasformazioni sociali. La città è stata testimone di un significativo sviluppo urbano affrontando le sfide della modernizzazione. Durante la Seconda Guerra Mondiale, è stata duramente colpita dai bombardamenti, con gravi danni al Patrimonio Architettonico. Oggi, Mantova presenta un ricco campionario di architetture come testimonianza della lunga e complessa evoluzione della città attraverso i secoli<sup>8</sup> (figg. 1.4 - 1.9).

### 1.2 Il Palazzo Ducale di Mantova, la reggia dei Gonzaga

Mantova ha svolto un ruolo di primo piano nel panorama culturale e politico dell'Italia rinascimentale. Ne è testimonianza il Palazzo Ducale, espressione della grandezza della famiglia Gonzaga, che ha governato la città per secoli.

Nello specifico, il Palazzo, situato nella parte nord-orientale della città, tra Piazza Sordello e le rive del Lago Inferiore (figg. 1.10, 1.11), rappresenta un complesso architettonico di grande rilievo per la sua storia e per le opere d'arte che in esso si conservano.

È un simbolo dell'eccellenza artistica e culturale del Rinascimento italiano e costituisce una testimonianza preziosa della ricca eredità storica di Mantova. Il palazzo è costituito da un insieme di edifici, cortili e giardini che, nel corso del tempo, sono stati messi in relazione

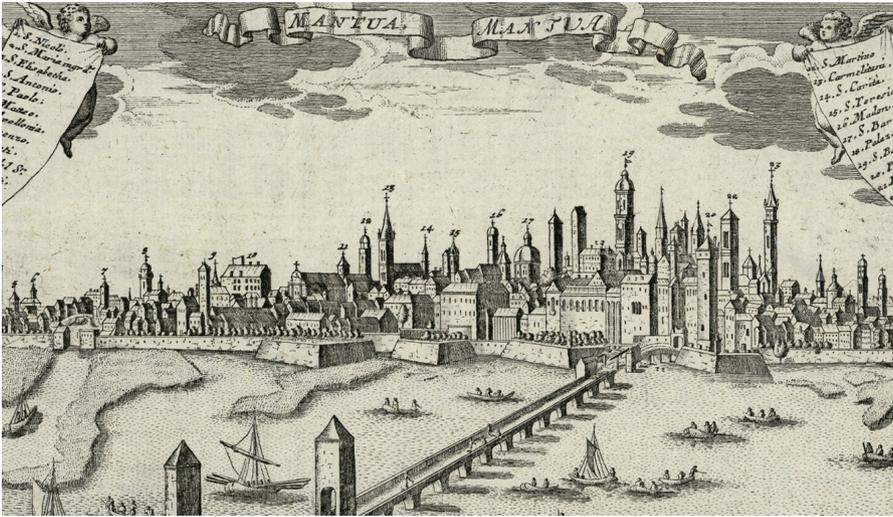


Fig. 1.10 - Veduta di Mantova da Ponte San Giorgio. [Leopold, 1630]

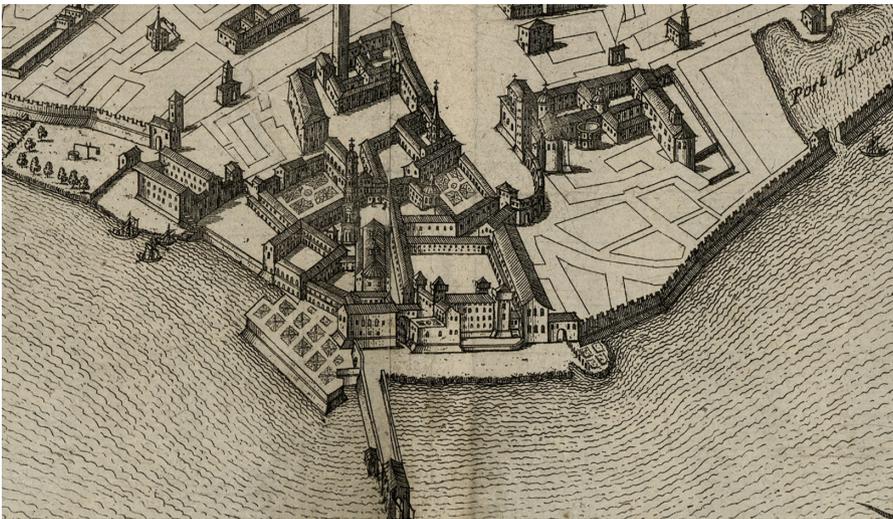


Fig. 1.11 - Vista assonometrica della regia città di Mantova. [Mortier, 1704]

CAPITOLO 1

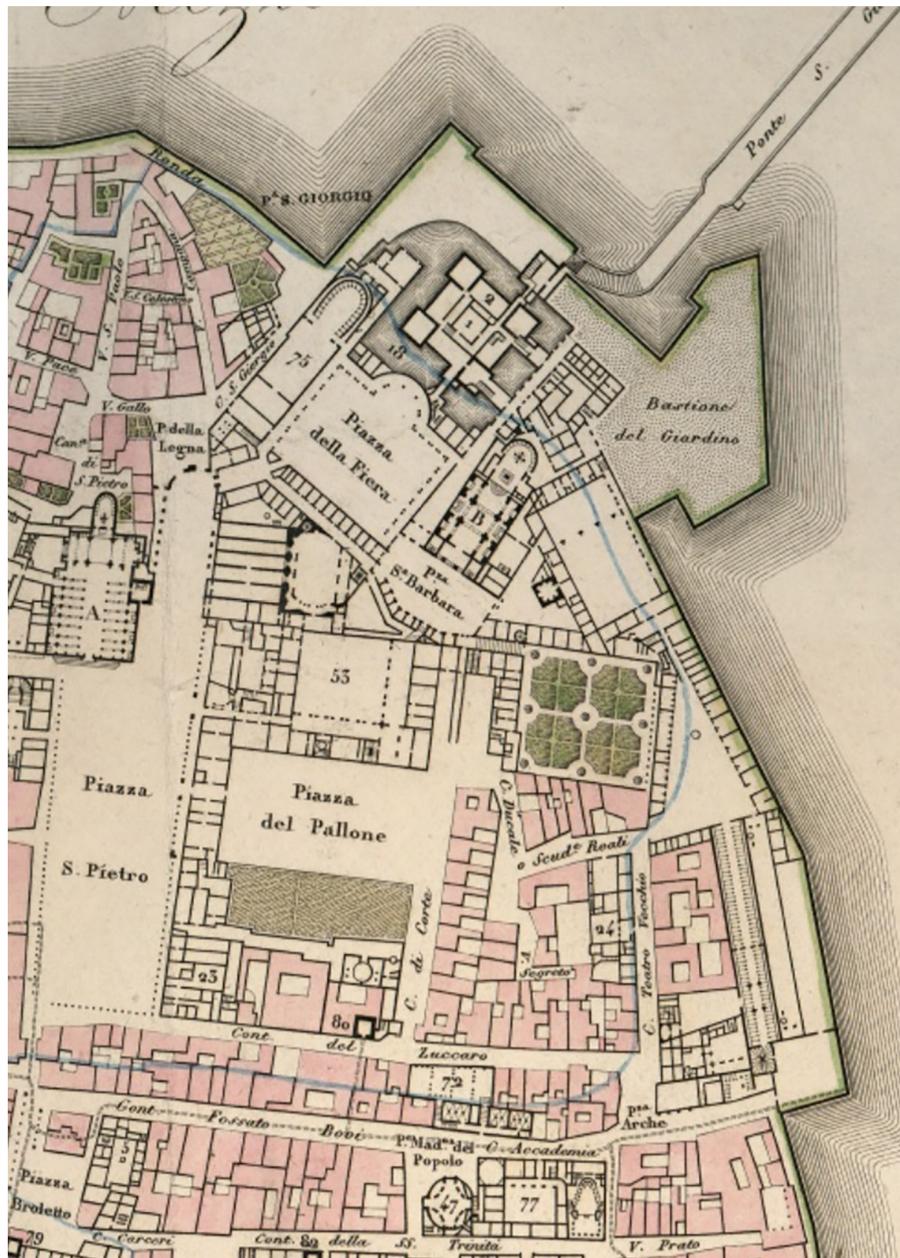


Fig. 1.12 - Pianta del Palazzo Ducale  
[Raineri, 1831].

formando un unico complesso, con una superficie di circa 35.000 metri quadrati (fig. 1.12).

La costruzione del Palazzo Ducale ha avuto luogo tra la fine del XIII e l'inizio del XVII secolo con la signoria dei Gonzaga di cui è stata la principale residenza dal 1328 al 1707.

Dopo il passaggio di Mantova al dominio austriaco e francese<sup>9</sup>, alcune aree del palazzo sono state adattate e destinate a funzioni rappresentative. Nei secoli successivi, il Palazzo Ducale ha subito un lungo periodo di declino, interrotto solo agli inizi del XX secolo grazie ai lavori di restauro e alla sua destinazione come sede museale [L'Occaso, 2009]. Il primo complesso ad essere edificato, denominato nel suo insieme 'Corte vecchia', comprende gli edifici più antichi che si affacciano su Piazza Sordello, in particolare il Palazzo del Capitano e la contigua *Magna Domus*. Queste strutture, probabilmente fondate dalla famiglia Bonacolsi che ha dominato Mantova dal 1272 al 1328, furono poi ampliate con l'arrivo dei Gonzaga nel 1328<sup>10</sup>.

Tra il 1395 e il 1406 per volere di Francesco I Gonzaga e su progetto dell'architetto Bartolino da Novara<sup>11</sup> fu costruito uno dei punti focali del Palazzo Ducale ovvero Castel San Giorgio [Poltronieri, 1989].



Fig. 1.13 - Palazzo Ducale e Castel San Giorgio visto dall'imbocco del ponte San Giorgio.

## CAPITOLO 1

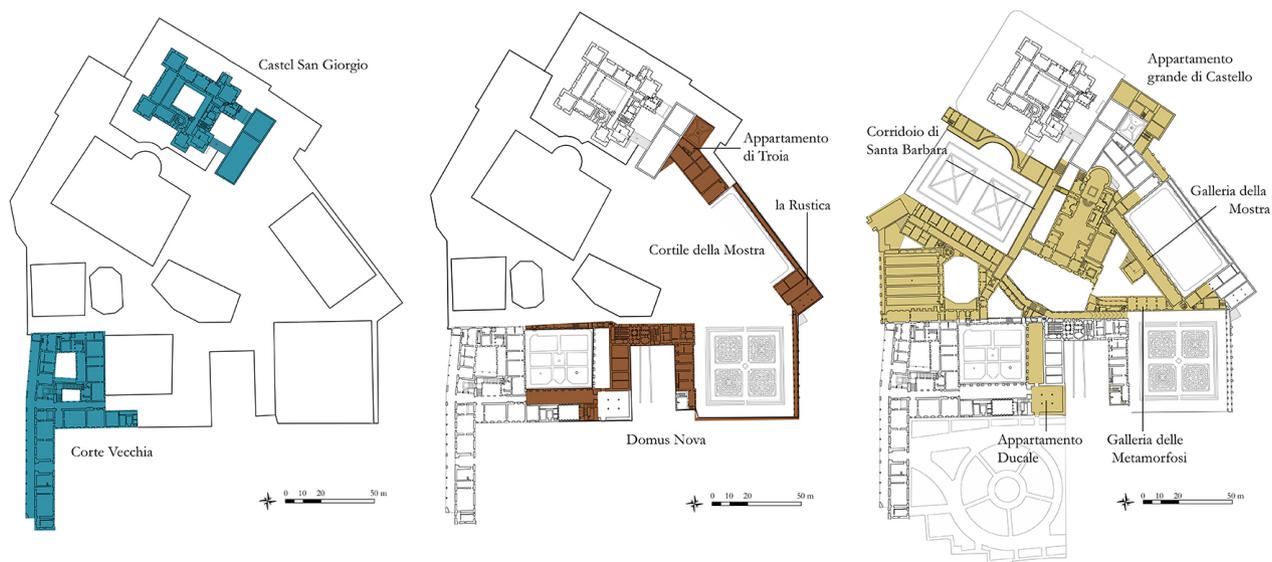
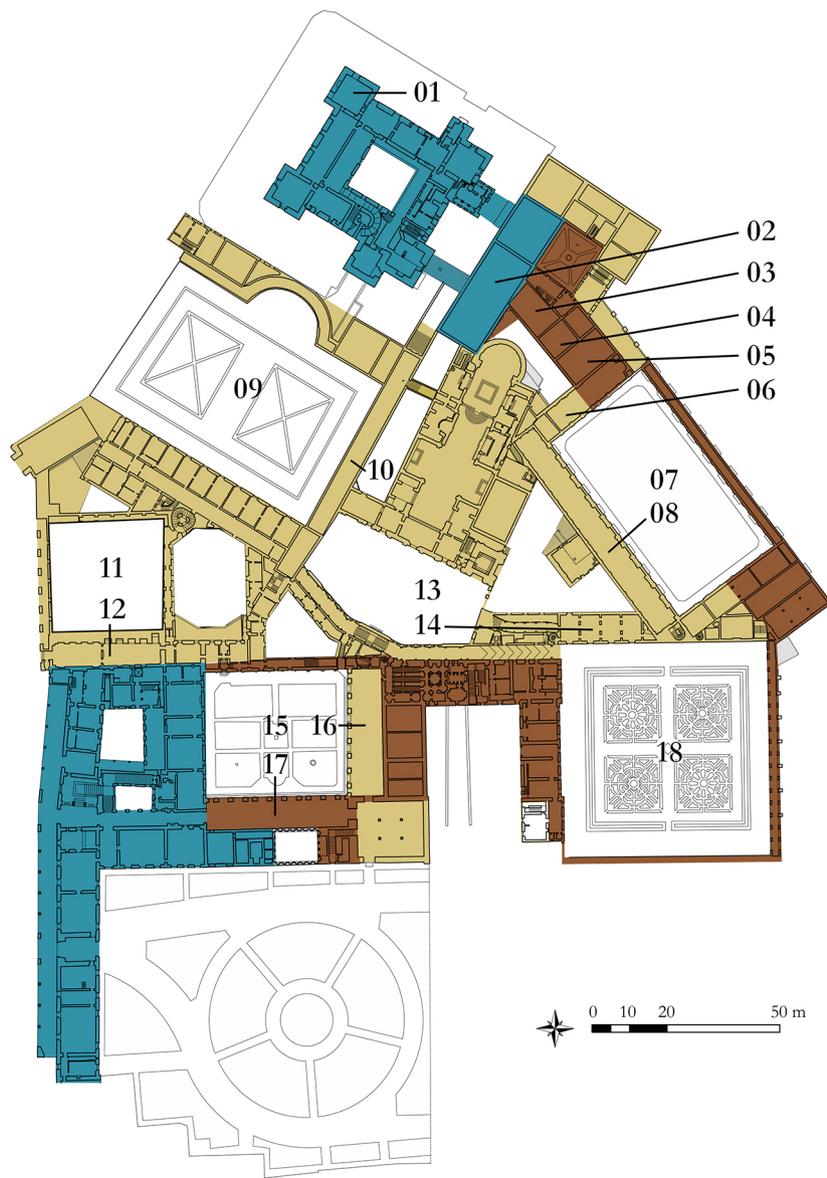


Fig. 1.14 - Principali fasi dello sviluppo del Palazzo Ducale di Mantova sulla base della pianta del 1877.

Il Castello è una imponente fortezza del Quattrocento, a pianta quadrata, con quattro torri angolari sporgenti e circondato da un profondo fossato [Carpeggiani, Tellini Perina, 1987] che si distingue per avere alcune delle più avanzate tecniche di difesa esterna<sup>12</sup>, tra cui merli, beccatelli<sup>13</sup> e caditoie (fig. 1.13).

All'interno del Castello, e in particolare al primo piano della torre nord-est della fortezza è collocata la Camera degli Sposi. È il marchese Ludovico II Gonzaga a commissionare l'opera facendosi rappresentare insieme alla sua famiglia e ad importanti personaggi dell'epoca sulle pareti della camera [www.mantovastoria.it] (fig. 1.14). Alla fine del XV secolo, verso il Lago Inferiore, in opposizione con gli edifici più antichi della Corte Vecchia, fu edificato il complesso della Corte Nuova. La *Domus Nova*, costruita nei pressi del castello, fu completata e modificata nel XVI secolo dal duca Vincenzo I<sup>14</sup> e tra il 1536 e il 1539, il duca Federico II<sup>15</sup> fece costruire, su progetto



*Fig. 1.15 - Suddivisione degli ambienti principali del palazzo Ducale di Mantova sulla base della pianta del 1877.*

- 01) Camera degli Sposi
- 02) sala di Manto
- 03) Camera dei Cavalli
- 04) Camera delle Teste
- 05) Sala di Troia
- 06) Galleria dei marmi
- 07) Cortile della Mostra
- 08) Galleria della mostra
- 09) Piazza Castello
- 10) Corridoio di Santa Barbara
- 11) Giardino pensile
- 12) Sala dei Fiumi
- 13) Piazza S.Barbara
- 14) Galleria delle Metamorfofi
- 15) Cortile d'Onore
- 16) Galleria degli Specchi
- 17) Galleria Nuova
- 18) Giardino dei Semplici

## CAPITOLO 1

di Giulio Romano, l'appartamento di Troia<sup>16</sup>, quale nuova residenza ufficiale del duca.

A poca distanza fu edificato nel 1539 la Rustica; un piccolo edificio concepito come residenza estiva che nel corso di poche decadi fu inglobato nelle costruzioni che formano il vasto cortile della Mostra [Pagliara, 1989]. Sotto il dominio del duca Guglielmo<sup>17</sup>, furono unificati gli edifici costruiti fino a quel momento.



*Fig. 1.16 - Ludovico Gonzaga e Barbara di Brandeburgo in posizione centrale nella parete nord della Camera degli Sposi. Foto di M. Gallo*

Fu aggiunta un'ampia ala con il giardino Pensile alla Corte Vecchia e un vasto appartamento privato noto come l'appartamento di Guglielmo. Per collegare la Corte Vecchia al Castello e all'ampio appartamento rappresentativo della Corte Nuova, che comprende in parte l'appartamento di Troia, fu costruito il corridoio di Santa Barbara, successivamente utilizzato anche come galleria d'arte. Questo corridoio consentì anche un collegamento interno con la Chiesa di Santa Barbara, progettata da Giovanni Battista Bertani<sup>18</sup>. A questi interventi si aggiungono la Galleria della Mostra e la Galleria delle Metamorfosi [L'Occaso, 2009].

Un'ala della *Domus Nova*, il Logion serrato, divenne il nucleo principale dell'appartamento Ducale, dove i Gonzaga conservavano i dipinti più importanti della loro collezione<sup>19</sup>. Nella stessa zona del palazzo, il duca Ferdinando<sup>20</sup> fece costruire l'appartamento del Paradiso e la Scala Santa, ispirata alla Scala Santa del Laterano a Roma (figg. 1.14, 1.15).

### 1.3 Letture preliminari della Camera degli Sposi

La Camera degli Sposi, un tempo nota come *Camera Picta* o Camera Dipinta, rappresenta il capolavoro più celebre di Andrea Mantegna, che lavorò come pittore presso la corte di Mantova dal 1460.

Questo ambiente aveva una doppia funzione: da un lato, serviva come sala delle udienze in cui il marchese Ludovico II Gonzaga svolgeva le sue funzioni pubbliche e politico-amministrative; dall'altro, fungeva da camera di rappresentanza, dedicata alle riunioni familiari. La denominazione dell'ambiente fu assunta solo nel XVII secolo per la presenza di Ludovico Gonzaga e di sua moglie ritratti in una posizione di rilievo rispetto alle altre figure (fig. 1.16). La vasta bibliografia dedicata a questa opera testimonia la sua rilevanza, tuttavia le circostanze esatte della commissione degli affreschi che adornano la sala e la data precisa della loro realizzazione non sono ancora del tutto stabilite. Alcuni studi ritengono che l'occasione fosse l'elezione di Francesco Gonzaga al soglio cardinalizio nel 1462, quando era ancora molto giovane.

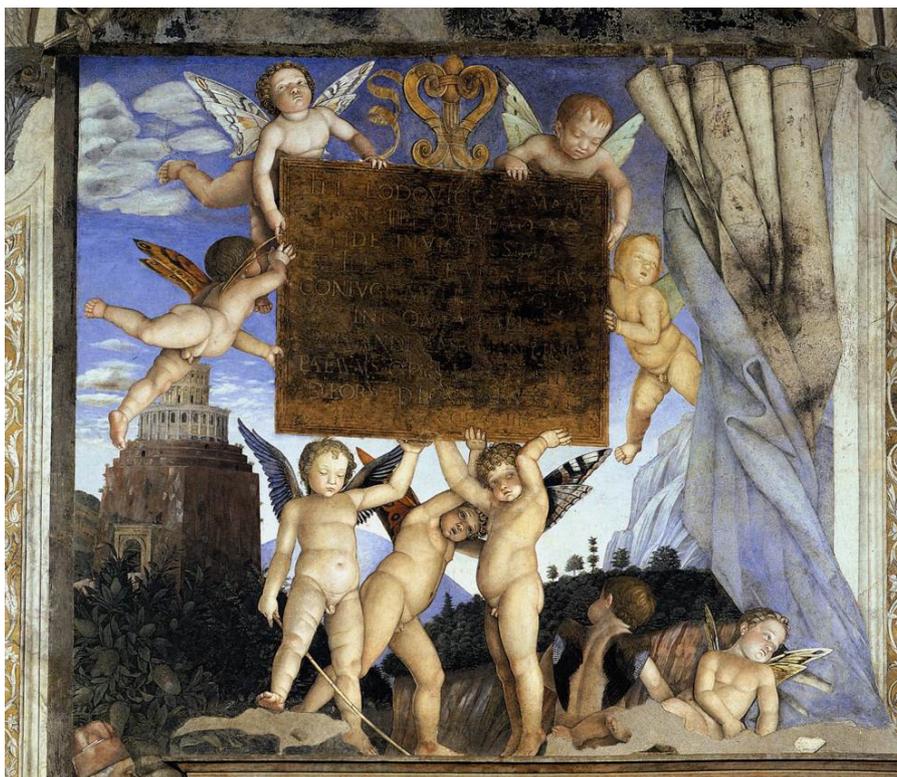


Fig. 1.17 - La data '16 giugno 1465' dipinta a finto graffio da Mantegna nello sguancio della finestra a nord è considerata la data di inizio dei lavori della camera.

## CAPITOLO 1

Diversamente, nello sguancio di una finestra, in un finto paramento marmoreo, è nascosta la data 16 giugno 1465 (fig. 1.17), da sempre interpretata come data di inizio dei lavori, mentre nella targa dedicatoria retta dai putti della parete ovest si leggono il nome dell'artista e la data 1474 (fig. 1.18), identificata come quella della fine dei lavori. Tuttavia, la presenza di alcuni elementi pittorici ha portato alcuni studiosi a suggerire una datazione leggermente successiva di inizio, intorno al 1472, quando Francesco ricevette il titolo di Abate commendatario di Sant'Andrea [Nifosi, 2022].

La Camera degli Sposi è un ambiente a pianta quadrata con dimensioni relativamente contenute, circa 8 metri per lato. Si trova nel torrione nord-est del Palazzo Ducale di Mantova ed è coperta da una volta a padiglione ribassata polilunettata, decorata con peducci (Cfr. Cap. 6).

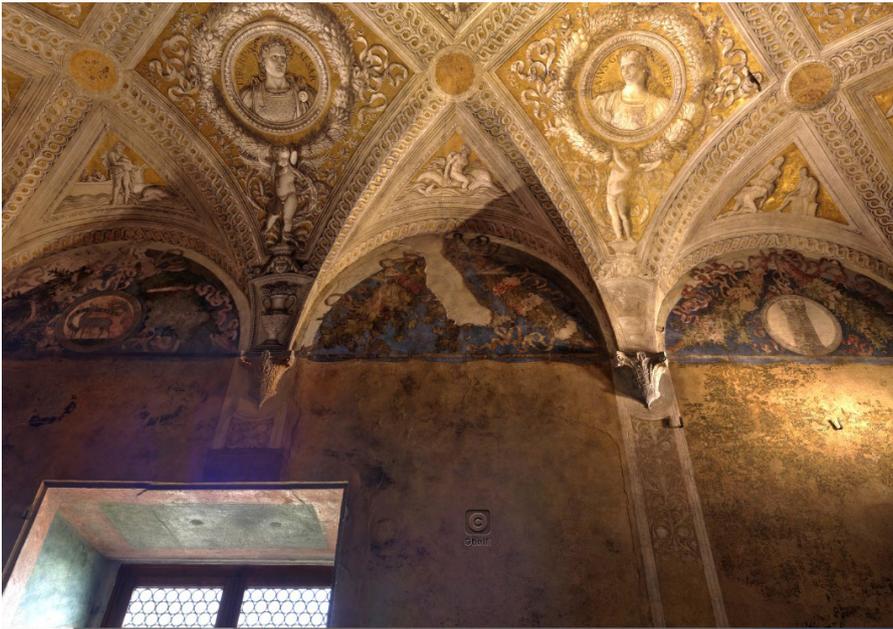


*Fig. 1.18 - La targa dedicatoria retta dai putti presente sulla parete ovest presenta una scritta con l'anno '1474', identificato come fine dei lavori.*

Questo ambiente rappresenta il cuore simbolico del complessivo rinnovamento che ha coinvolto il Castello nell'ultimo terzo del XV secolo. Le spesse pareti in laterizio e la volta sono stati completamente reinterpretati da Andrea Mantegna attraverso la realizzazione di un raffinato apparato decorativo, creando l'illusione di un loggiato aperto intervenendo sulle pareti e la volta del soffitto, creando un'illusione di spazio dilatato oltre i confini fisici della stanza (fig. 1.19).

Attraverso un sapiente gioco prospettico, lo spazio si presenta come dominato da un elegante loggiato, che trasforma le quattro pareti in una stupefacente architettura dipinta.

Questa illusione è ottenuta suddividendo ogni parete in tre campate, secondo una precisa sequenza di elementi architettonici. I tendaggi invece svolgono la duplice funzione di proteggere da sguardi indiscreti ciò che non deve essere rivelato, come avviene nelle pareti est e sud (fig. 1.20), e allo stesso tempo svelare con eleganza e magnificenza la storia del casato dei Gonzaga (Cfr. Cap. 4).



*Fig. 1.19 - Foto effettuata la sera con la luce artificiale per enfatizzare i costoloni, le losanghe, i pennacchi ed i peducci in rilievo con finti capitelli che corrispondono a finti pilastri dipinti sulle pareti.*

## CAPITOLO 1



Fig. 1.20 - Apparato decorativo delle pareti ovest e nord volto all'illusione di una ambiente aperto oltre i confini della stanza e tendaggio chiuso sulle pareti sud e est [[www.artesvelata.it](http://www.artesvelata.it)].

Questi tendaggi, oltre a conferire un senso di mistero e riservatezza ad alcune parti della rappresentazione, contribuiscono a creare un'atmosfera di solennità. Essi, infatti, celano con grazia e delicatezza alcune parti dell'affresco, suscitando la curiosità e l'interesse dello spettatore, mentre in altre zone, si aprono come eleganti sipari, rivelando una vibrante celebrazione della cultura umanistica [Valli, 2015].

Inoltre, stando ad alcune fonti, è possibile dedurre che il pavimento originale della Camera degli Sposi fosse composto da mattonelle di vetro di Murano con il fondo d'oro [www.theartpostblog.com]. L'uso di questo materiale rappresenterebbe un dettaglio importante nell'ambito della decorazione artistica complessiva. L'impiego di tali mattonelle, infatti, avrebbe sicuramente aggiunto un elemento di grande suggestione all'ambiente, grazie alla combinazione di vetri scintillanti e oro. Questa scelta sarebbe stata in linea con l'obiettivo di creare un ambiente sontuoso destinato anche a impressionare gli ospiti e a celebrare il prestigio e la potenza dei Gonzaga.

Mantegna ha reso illusoriamente grandioso lo spazio angusto della piccola sala con una complessa decorazione completamente dipinta. Una struttura fittizia con pilastri decorati, finte sculture, corone e finti medaglioni commemorativi, sostiene una volta a padiglione polilunettata che si conclude al centro con un'apertura circolare, l'oculo, da cui si scorge, dipinto in prospettiva, il cielo.

Le lunette dividono la superficie della volta in losanghe e poggiano su peducci in rilievo, con finti capitelli, corrispondenti ai finti pilastri dipinti sulle pareti. Dopo la scomparsa di Ludovico II<sup>21</sup>, la Camera degli Sposi e il suo ciclo pittorico furono seguiti da un progressivo declino che ne compromise la conservazione fisica e il riconoscimento storico-artistico. Poco tempo dopo la morte del marchese, infatti, la stanza fu adibita a deposito di oggetti preziosi, circostanza che potrebbe aver impedito a Vasari di visitarla e quindi escluderla dal suo resoconto de 'Le Vite'<sup>22</sup>. Durante l'occupazione imperiale del 1630, l'ambiente subì gravi danni, per poi essere praticamente abbandonato e lasciato ad un lento degrado fino al 1875 circa.

## CAPITOLO 1

Le informazioni riguardanti i restauri effettuati prima del XIX secolo, sono scarse e poco precise, mentre i restauri successivi fino al 1941 risultarono inadeguati nel preservare la sala e le sue decorazioni. Solo alla fine degli anni '80, con la scoperta delle diverse tecniche pittoriche utilizzate, fu avviato un complesso e approfondito restauro, adottando moderne metodologie, recuperando ciò che aveva resistito nel tempo e restituendo così l'opera alla collettività<sup>23</sup>.

A tal proposito è nel caso di un restauro avvenuto tra il 1984 e il 1987 che è stata chiarita la sequenza cronologica e le tecniche pittoriche utilizzate. Inizialmente, Mantegna ha lavorato sulla volta della stanza, applicando limitate campiture a secco, concentrando la sua attenzione principalmente su parti specifiche dell'oculo e della ghirlanda che lo circonda. Successivamente si è dedicato alla parete della Corte, utilizzando una particolare tempera grassa applicata a secco procedendo per 'pontate'<sup>24</sup>. Le fasi successive del lavoro hanno coinvolto le pareti est e sud, che sono state dipinte con la tecnica tradizionale dell'affresco eseguita anche sulla parete ovest dell'Incontro e condotta in giornate 'molto piccole'. Questo particolare dettaglio suggerisce che il maestro abbia operato con notevole lentezza, giustificando in tal modo la durata quasi decennale per completare l'intera impresa [Camesasca, 2007].

### Note

1 Andrea Mantegna (1431-1506) è stato un rinomato pittore italiano del Rinascimento. La sua opera è caratterizzata da uno stile vigoroso, preciso e dettagliato, che testimonia la sua maestria nell'uso della prospettiva, delle luci e delle ombre per creare effetti di profondità e realismo. Mantegna è noto per i suoi dipinti storici e mitologici, le sue opere trasmettono un senso di monumentalità e grandiosità, con figure potenti e imponenti immerse in paesaggi e architetture dettagliati.

2 Nella mitologia etrusca Mantus (in etrusco *Manth*) e sua moglie Mania erano Dei dell'oltretomba. Mantus era associato alla città di Mantua (in etrusco *Manthva*) l'odierna Mantova. L'origine etrusca era supportata dal mito che voleva la città fondata da Tarconte, fratello di Tirreno, eroi della mitologia etrusca. In questo caso l'eponimo era appunto Mantus, il Dio degli inferi [Colonna, 2006].

3 La casata degli Attoni, detti anche Canossa dal nome del loro feudo più celebre, furono una potente nobile famiglia feudale di stirpe longobarda che, a partire dai primi decenni del X secolo, si insediò nelle valli dell'Appennino Reggiano [Canobbio, 1593].

4 I Bonacolsi (o Bonacossi), il cui nome potrebbe derivare da buona causa, Governarono dal 1272 al 1328 e furono i primi signori di Mantova precedendo e creando le basi alla ben più famosa dinastia Gonzaga [Nosari, Canova, 2019].

5 La potente famiglia Gonzaga, governanti di Mantova per quasi quattro secoli, ha lasciato un'eredità duratura nella storia e nell'arte. Protettori di artisti, poeti e intellettuali, i Gonzaga hanno trasformato la città in un centro di rinomata cultura e raffinatezza [Amadei, Marani, 1975].

6 La corte gonzaghesca ha attirato una schiera di nomi illustri, tra cui poeti come Ariosto e Tasso, artisti come Correggio, Tiziano e Mantegna, oltre a rinomati architetti come Brunelleschi. Uno dei protagonisti di questa fase straordinaria di crescita urbana e architettonica è stato Giulio Romano, architetto di spicco che ha contribuito in modo determinante alla trasformazione della città, guidando importanti progetti di riordino urbanistico.

7 La famiglia Asburgo ha dominato le dinamiche europee per diversi secoli, raggiungendo il culmine della sua influenza tra il XV e il XVII secolo. Con una vasta eredità e una serie di governanti illustri, gli Asburgo hanno lasciato un'impronta indelebile su questioni politiche, culturali ed economiche.

8 La città ospita anche un grande numero di musei e gallerie d'arte che custodiscono opere di inestimabile valore provenienti da tutto il mondo. Questo Patrimonio Culturale e architettonico rappresenta una testimonianza vivente della storia e della ricchezza artistica di Mantova, confermandola come un importante centro turistico e culturale.

9 Mantova è stata sotto il dominio austriaco dal 1707 al 1796. Dopo l'estinzione della famiglia Gonzaga nel 1707 e a seguito del Trattato di Rastatt, che pose fine alla Guerra di Successione spagnola e assegnò Mantova all'Austria. Durante questo periodo, Mantova fu amministrata come parte dei domini austriaci fino alla sua occupazione da parte delle truppe francesi nel 1796 durante le Guerre napoleoniche [Bonora Previdi C, 2009].

10 Nel corso del XIV secolo, furono aggiunti ulteriori edifici alla Corte Vecchia, tra cui il piccolo palazzo dove Pisanello dipinse nel secolo successivo il famoso ciclo equestre [Landoni, 2022].

## CAPITOLO 1

11 Bartolino da Novara è stato un rinomato architetto rinascimentale attivo nel XV secolo. La sua abilità e genialità si sono evidenziate attraverso opere di grande rilievo, tra cui Castel San Giorgio a Mantova e il Castello Estense di Ferrara.

12 Le carceri dei Martiri di Belfiore, collocate all'ultimo piano del castello, gli conferiscono anche la funzione di un carcere di massima sicurezza, testimoniando anche la sua importanza strategica e difensiva.

13 Il beccatello è un elemento architettonico usato per sostenere parti sporgenti di un edificio, soprattutto nei castelli e negli edifici storici. Consiste in una mensola in legno, pietra o terracotta che permette di sorreggere una parte di edificio di pianta maggiore di quella sottostante.

14 Vincenzo I Gonzaga (1562-1612) fu un grande mecenate rinascimentale e sovrano dei ducati di Mantova e del Monferrato. Noto per la sua generosità e il suo amore per il lusso, fu un promotore delle arti e delle lettere, ospitando figure illustri come Claudio Monteverdi e Pieter Paul Rubens. Organizzò costose spedizioni militari in Ungheria, anche se senza successo significativo, e costruì la maestosa cittadella di Casale Monferrato [Maestri, 2009].

15 Federico II Gonzaga (1500-1540) figlio primogenito del marchese di Mantova Francesco II e di Isabella d'Este, crebbe tra la corte di Francia e quella papale di Giulio II e fu il primo duca di Mantova [Coniglio, 1967].

16 La stanza presenta soffitto e pareti affrescate con le vicende della guerra di Troia. Sotto la volta della sala rettangolare gira un sottile cornicione di stucco dorato e i dipinti delle pareti sono distinti in quadri a loro volta circondati da analoghe cornicette dorate [Ragozzino, 2003]

17 Guglielmo Gonzaga (1538 - 1587) è stato il terzo duca di Mantova e del Monferrato. Secondo figlio di Federico II Gonzaga e di Margherita Paleologa, nel 1550 succedette come duca al fratello Francesco, morto senza figli maschi [Murgia, 1972].

18 Giovanni Battista Bertani (1497-1576) è stato un importante scultore italiano del Rinascimento. La sua abilità nell'intagliare il marmo e nel modellare le forme gli ha consentito di creare opere di grande bellezza e realismo.

19 Ora noto come la Galleria degli Specchi.

20 Ferdinando Gonzaga (1587-1626), figlio secondogenito di Vincenzo I, fu Duca di Mantova e del Monferrato dal 1612 al 1626. Destinato alla carriera ecclesiastica, ricevette la porpora cardinalizia nel dicembre 1607, all'età di vent'anni. Nonostante la nomina si distinse, come il padre, per il carattere inquieto, nonché per l'amore per il lusso e lo sfarzo [Braglia, 2002].

21 Il marchese di Mantova Ludovico Gonzaga morì il 27 giugno 1478 a Goito, una località situata nelle vicinanze di Mantova. Fu un mecenate delle arti e delle lettere, e sotto il suo governo, la corte di Mantova divenne un importante centro culturale del Rinascimento italiano. La sua scomparsa lasciò un vuoto significativo e segnò la fine di un'era artistica e politica nella regione.

22 'Le Vite de' più eccellenti pittori, scultori, e architettori' conosciuta anche come 'Le Vite' è una serie di biografie di artisti, scritta nel XVI secolo dal pittore e architetto aretino Giorgio Vasari. Queste biografie sono considerate uno dei primi testi storici sull'arte e hanno contribuito in modo significativo alla conoscenza e all'apprezzamento dell'arte rinascimentale. Oltre a fornire una preziosa testimonianza storica hanno contribuito a stabilire i canoni e i criteri stilistici dell'epoca, influenzando generazioni di artisti e studiosi successivi.

23 Nel corso della storia, la Camera degli Sposi ha subito vari danni e interventi di restauro, tra cui:

- Nel 1506, Francesco Mantegna, figlio dell'artista Andrea Mantegna, fu incaricato di restaurare l'opera di suo padre nella Camera degli Sposi [Signorini, 2007].
- Durante l'occupazione dei Lanzichenecchi nel 1630, la stanza subì danni vandalici alle sue decorazioni, specialmente alle pareti occidentali e settentrionali. [Camesasca, Coletti, 1959].
- Nel XVIII secolo, il pittore austriaco Martin Knoller intervenne sulla raffigurazione de 'L'Incontro' nella Camera degli Sposi. [ASMn, AG, b. 3178, doc. 1715.01.10].
- Nel corso del XIX e XX secolo, furono eseguiti vari interventi e restauri e nel 1924, fu eseguito un intervento di restauro sugli apparati decorativi, con lavori di consolidamento nella parte superiore del muro. Furono adottate misure per regolare le condizioni termo-igrometriche delle pareti e monitorare la formazione della salsedine con apparecchiature fotografiche [Catellani, Seletti, 2001].
- Nel 1974, sotto la direzione di Ilaria Toesca, fu avviato un importante progetto di restauro che comprendeva la documentazione fotografica, la pulizia, il consolidamento, lo stucco e la reintegrazione delle superfici dipinte.
- Tra il 1980 e il 1981, furono effettuati monitoraggi delle condizioni termo-igrometriche, anemologiche e dei livelli di anidride carbonica, che servirono per determinare le metodologie di intervento [ASMn, già AMaMn, b. 'Palazzo Ducale, 2', doc. 1974.05.22, Mantova, n.p. 4531]
- Nel 1996, fu stabilita una prassi operativa per la manutenzione ordinaria dell'ambiente, che prevedeva una mappatura dello stato di conservazione, spolveratura della superficie dipinta, asportazione delle efflorescenze saline, consolidamento della pellicola pittorica e revisione delle stuccature alterate per recuperare la buona leggibilità dei dipinti [Cassini, Valli, 2010].

## CAPITOLO 1

- Nel 2006, in occasione del quinto centenario della morte di Andrea Mantegna, fu installato un sistema di ventilazione meccanica per ridurre i danni causati dall'afflusso di visitatori e mantenere il grado di umidità adeguato nella stanza [Signorini, 2007]
- Negli ultimi anni, sono stati eseguiti interventi di consolidamento a seguito dei danni causati da eventi sismici nel 2012 [ASopMn, Diario emergenza sisma 2012].

24 Nel contesto dell'affresco gli strati possono essere applicati in diversi modi. Esistono tre metodi principali: a 'giornate', a 'pontate' e a 'pontate ondulanti'. A 'pontate' è il metodo più antico, particolarmente utilizzato nel periodo medievale. Lo strato viene dipinto dall'alto verso il basso distribuito in strisce parallele sulla parete, seguendo l'altezza dei ponteggi e coprendo l'intera larghezza del muro. A 'pontate ondulanti' è una tecnica, sviluppata nel XIII secolo, rappresenta una transizione tra il metodo a 'pontate' e quello a 'giornate' in cui le strisce seguono i contorni delle figure rappresentate. A 'giornate' è il metodo più diffuso a partire dal XIII secolo e le giornate rappresentano porzioni di strato di dimensioni variabili, utilizzate per dipingere dettagli specifici. Le 'giornate' possono essere molto piccole per i dettagli come i volti o più ampie per la creazione di figure complete [www.zebrart.it].

## CAPITOLO 2

### Rete topografica integrata per la conservazione del Patrimonio

Il crescente interesse verso la valorizzazione e la salvaguardia del Patrimonio Storico e Culturale ha incentivato la promulgazione di specifiche legislazioni volte a tutelarlo e preservarlo. In particolare, alcune disposizioni normative del Ministero delle Infrastrutture italiane<sup>1</sup> attestano che le tecniche topografiche e i rilievi *reality-based* rivestono un ruolo essenziale nella conoscenza e nella valutazione del costruito storico, promuovendone una conservazione consapevole. Questi codici sottolineano l'importanza cruciale di condurre un rilievo geometrico accurato per acquisire una conoscenza dettagliata, non solo per evidenziare anomalie e deformazioni delle superfici, ma anche per la creazione di modelli 3D realistici, essenziali per analisi approfondite o specifiche della componente strutturale<sup>2</sup> o per la fruizione virtuale del bene.

Il rilievo digitale, in quanto disciplina in costante evoluzione, si distingue per la sua capacità di fondere informazioni provenienti da svariate tecniche, ognuna caratterizzata da specifici strumenti, sistemi di riferimento e livelli di precisione diversificati [Di Paola, 2007].

#### 2.1 La pianificazione del rilievo topografico

Come è noto la pianificazione e la preparazione del rilievo topografico sono fondamentali per acquisire una comprensione approfondita del contesto in cui si rileva e la consultazione dei dati catastali, degli estratti di mappe e delle visure ai terreni costituiscono la base della ricerca<sup>3</sup>.

## CAPITOLO 2

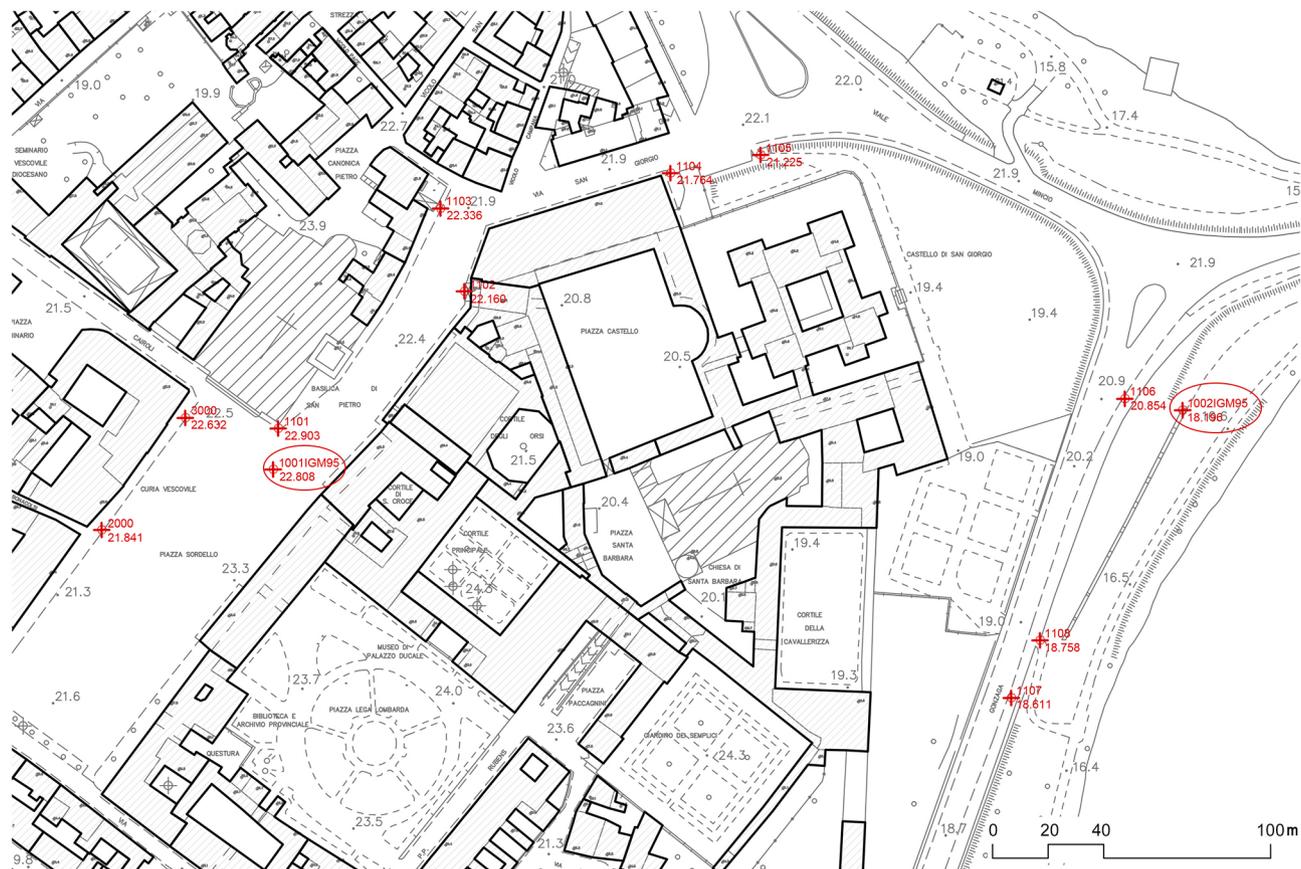


Fig. 2.1 - Evidenziazione dei punti della Rete principale di riferimento sulla mappa catastale di Mantova. I punti cerchiati sono quelli noti dell' IGM.

Dopo aver indagato il contesto, a seguito di uno studio particolareggiato, diventa quindi essenziale stabilire l'esistenza di punti noti che possano essere la base affidabile per determinare la posizione della rete di riferimento topografico<sup>4</sup>. A tal fine la scelta del punto di partenza si rivela un aspetto cruciale, mirato a massimizzare la visibilità e a ridurre il numero di stazioni necessarie. La ricerca e la verifica dei punti fiduciali<sup>5</sup> emerge quindi come fase preliminare imprescindibile, delineando il percorso per un rilievo completo ed accurato, senza trascurare alcun punto e aspetto rilevante.

La rete d'inquadramento dovrà essere definita in modo tale da offrire una scelta di vertici sufficiente per la collimazione e la misurazione di tutti i punti richiesti dal rilievo [Tedeschi, 2006]. Una volta definito lo schema della rete, si procede alla materializzazione dei vertici e alla realizzazione degli appositi eidotipi. Questi ultimi devono includere tutti gli elementi e le informazioni essenziali al rilievo sul campo, come i vertici della rete della poligonale e la numerazione dei punti rilevati. Questa fase preliminare è fondamentale per garantire un'organizzazione chiara e dettagliata prima di procedere all'effettiva esecuzione delle operazioni sul campo<sup>6</sup>. Dopo aver completato tutte queste fasi, si esegue il rilievo topografico determinando le coordinate altimetriche e planimetriche dei punti con la tecnica della celerimensura<sup>7</sup> e l'utilizzo della stazione totale<sup>8</sup>.

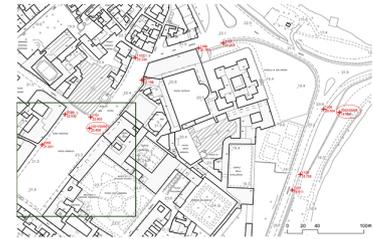
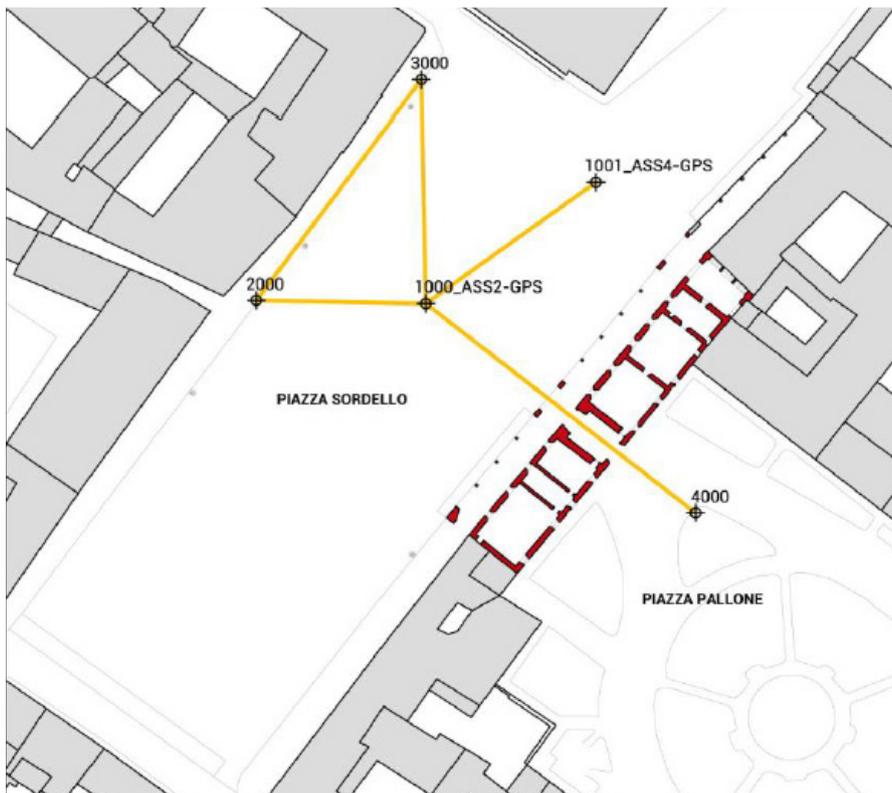


Fig. 2.2 Pianta della rete topografica con localizzazione dei vertici in Piazza Sordello. [Fregonese et al., 2013]



## 2.2 Sviluppo e controllo di una rete topografica per il rilievo del Palazzo Ducale

Per quanto riguarda il caso studio in esame, la complessità del bene e del suo contesto ha richiesto la pianificazione e lo sviluppo di un rilievo integrato volto alla messa a sistema di dati provenienti da metodologie di rilievo topografico (con la costruzione di una rete di riferimento) e metodologie di rilievo tridimensionale (con la generazione di modelli puntiformi *range-based* e *image-based*). La rete topografica, dunque, costituisce l'ossatura del rilievo, ed è stata materializzata utilizzando le informazioni desunte dall'IGM (fig. 2.1) e da una poligonale preesistente già compensata per lavori precedenti in Piazza Sordello [Fregonese *et al.*, 2013] (fig. 2.2).

Questa rete è stata implementata con nuovi punti al fine di creare un fitto sistema topografico sia esterno che interno al Palazzo Ducale, con particolare attenzione alla Camera degli Sposi per il suo corretto orientamento nel sistema di riferimento globale.

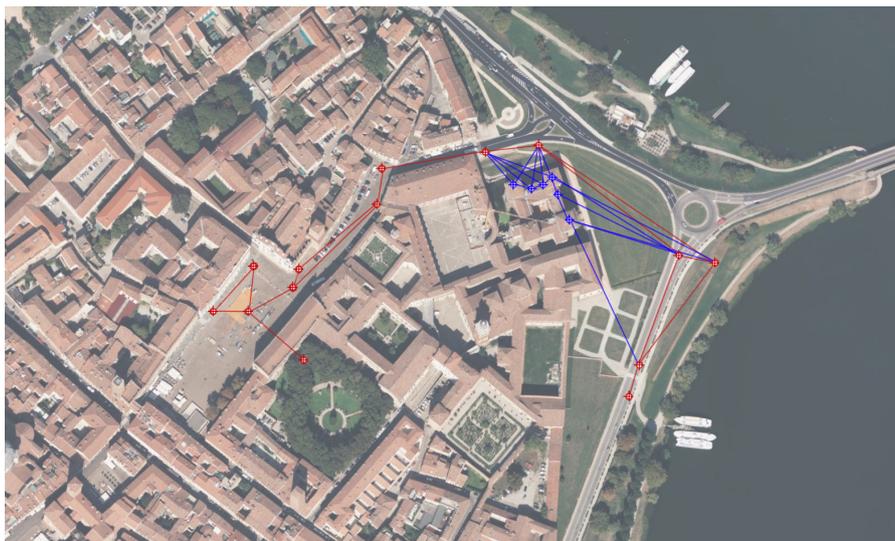


Fig. 2.3 Evidenziazione schematica della rete primaria esterna in rosso e della rete secondaria interna in blu. Elaborazione grafica a partire dall'ortofoto del palazzo Ducale di Mantova.

Ovviamente il ricorso ad un sistema noto ha semplificato significativamente il processo di creazione della rete principale esterna a seguito di un accurato controllo.

L'implementazione delle reti e del sistema di riferimento è avvenuto con la stazione totale Leica TS30<sup>9</sup> e con l'ausilio di un prisma posizionato su treppiedi; questo approccio ha consentito di materializzare un sistema di riferimento complessivo basato su punti noti sul quale riferire tutte le successive operazioni.

La rete topografica è stata sviluppata su due livelli interni del Palazzo, con collegamenti tra i piani tramite le scale e tra gli ambienti esterni ed interni attraverso finestre, riducendo così al minimo gli errori (fig. 2.3). Operativamente, per la materializzazione delle reti esterne sono state utilizzate delle viti topografiche collocate in posizioni facilmente accessibili, evitando la presenza di ostacoli stabili e altri disturbi, preferibilmente su manufatti in calcestruzzo caratterizzati da dimensioni, consistenza e scopo d'uso tali da garantire stabilità e durata nel tempo (fig. 2.4). I punti sono stati dislocati opportunamente in modo da coprire, unitamente ai caposaldi già esistenti della rete regionale, l'intero ambito di intervento<sup>10</sup>.

Dopo aver eseguito la messa in stazione dello strumento e del prisma su punti di controllo noti questi sono stati collimati attraverso la ricerca automatica di quest'ultimo. Con la lettura degli angoli e delle distanze sono state quindi definite le coordinate del punto in esame la cui accuratezza è stata validata attraverso controlli incrociati eseguiti mediante il metodo delle intersezioni in avanti<sup>11</sup>.

Particolare attenzione è stata posta alla deviazione standard<sup>12</sup> delle coordinate (fig. 2.5) al fine di validare i dati ottenuti e procedere con la registrazione delle coordinate, documentando eventuali condizioni o variabili che avrebbero potuto influenzare i risultati.

Questo processo è stato ripetuto spostando la stazione totale su tutti i punti noti e i dati raccolti sono stati successivamente trasferiti in un *software* di elaborazione topografica, dove sono stati utilizzati per creare una mappa dettagliata basata sulla rete appena sviluppata.



Fig. 2.4 Materializzazione del punto 1104 tramite vite topografica.

## CAPITOLO 2

DEVIAZIONI STANDARD			
1001IGM95	0.000000	0.000000	0.000000
1002IGM95	0.000000	0.000000	0.000000
2000	0.002544	0.003649	0.002724
3000	0.001110	0.001932	0.001327
1101	0.000711	0.001007	0.000696
1102	0.001724	0.002070	0.002594
1103	0.001771	0.002172	0.002722
1104	0.001563	0.002054	0.003291
1105	0.001481	0.002159	0.003336
1106	0.000995	0.000919	0.000988
1107	0.004905	0.002622	0.005511
1108	0.004011	0.002236	0.004458

Fig. 2.5 - Deviazione standard misurata sui punti topografici esterni. Il valore più alto è di 4,9 mm del punto 1107.

L'elaborazione dei dati raccolti ha visto un'ultima fase dedicata all'effettiva validazione dei punti collimati. La familiarità con la forma del rilievo ha agevolato il riconoscimento di eventuali discrepanze per cui sono stati esclusi quelli che presentano anomalie evidenti o caratterizzati da un elevato errore.

Per ciascun vertice, è stata compilata una monografia (fig 2.6), in formato numerico, organizzata in tabelle che riportino varie informazioni desunte sia in fase preliminare di costruzione della rete che in seguito al rilievo topografico. In ogni scheda quindi è presente nome e/o numero del vertice; schizzo monografico della materializzazione e della zona circostante con tutte le possibili misure di distanza fra il vertice ed i particolari limitrofi rilevanti e facilmente individuabili; coordinate geografiche nel sistema WGS84(ETRF2000). In tal modo è stato costruito uno strumento utile per garantire la qualità e l'affidabilità dei dati topografici nel tempo [Arpal, 2022].

La documentazione fotografica, integrata durante o al termine del rilievo, costituisce un archivio visivo prezioso per facilitare il ricordo di dettagli rilevanti durante la fase di elaborazione al *computer* inoltre assume un ruolo cardine nella registrazione di dettagli cruciali per la fase successiva di elaborazione ed integrazione dei dati di rilievo.

### 2.3 Creazione di una rete di dettaglio nella Camera degli Sposi

L'obiettivo finale è stato quindi la creazione di una rete di dettaglio all'interno della Camera degli Sposi (fig. 2.7). Nello specifico contesto degli ambienti interni, è stato adottato un approccio attento alla conservazione, evitando di materializzare fisicamente i punti topografici al fine di preservare l'integrità della muratura. Per cui è stato scelto di adottare una strategia di identificazione basata sui punti caratteristici dell'architettura o degli affreschi (fig. 2.8), debitamente appuntati nell'eidotipo, contribuendo così a una rappresentazione dettagliata e non invasiva degli elementi topografici all'interno della Camera. A partire da due punti fissi della rete secondaria collocati all'interno della camera, si è proceduto con il

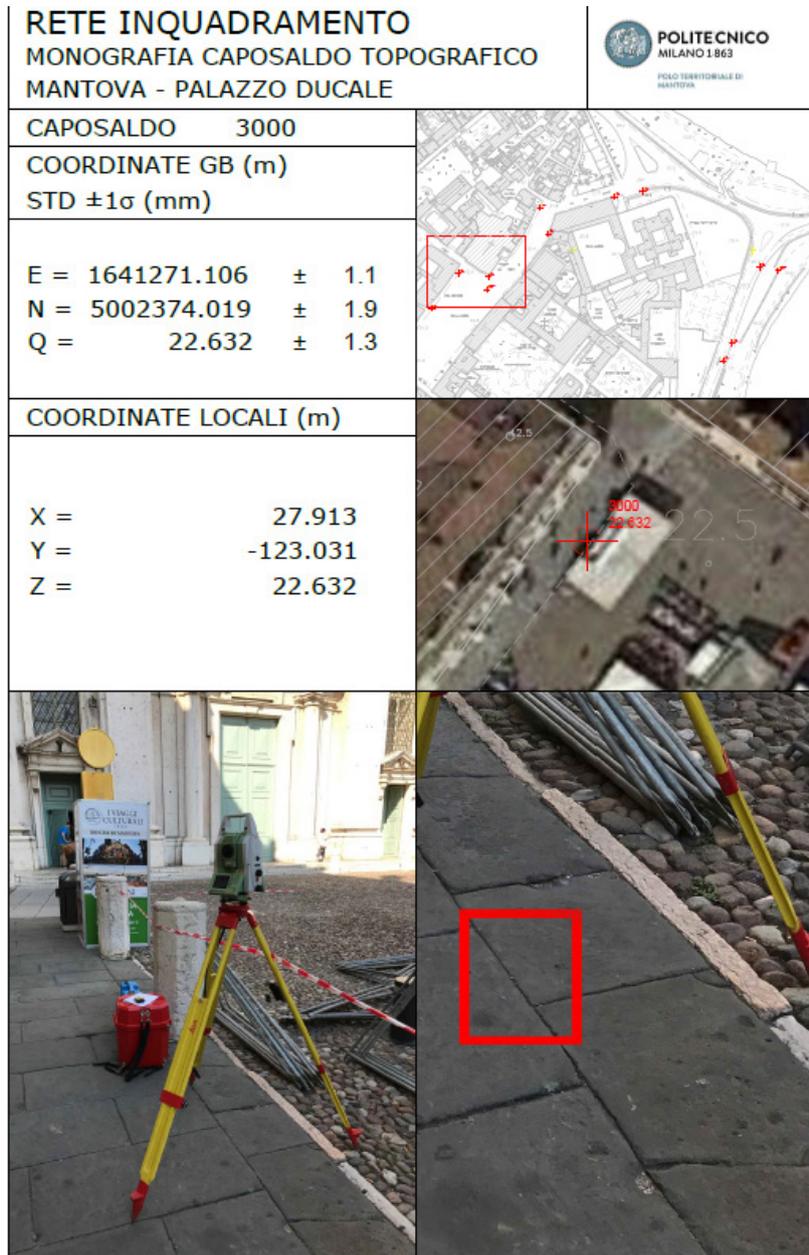


Fig. 2.6 - Monografia del caposaldo topografico 3000 della rete di inquadramento esterna elaborato da He.Su.Tech. Group.

## CAPITOLO 2

metodo dell'irraggiamento<sup>13</sup> ad identificare 45 punti distribuiti in maniera omogenea sul pavimento, sulle pareti interne e sulla volta (fig. 2.9). Anche in questo caso sono stati nuovamente rilevati i singoli punti a partire dalle due stazioni note e sono state misurate le deviazioni standard. Dopo aver validato i risultati, sono state redatte schede informative corredate da una dettagliata documentazione fotografica.

La realizzazione di questa rete di dettaglio non solo preserva la precisione topografica, ma contribuisce anche ad una rappresentazione completa e interconnessa di questo ambiente, offrendo un prezioso strumento per la conservazione, la ricerca e la fruizione consapevole del Patrimonio Culturale.

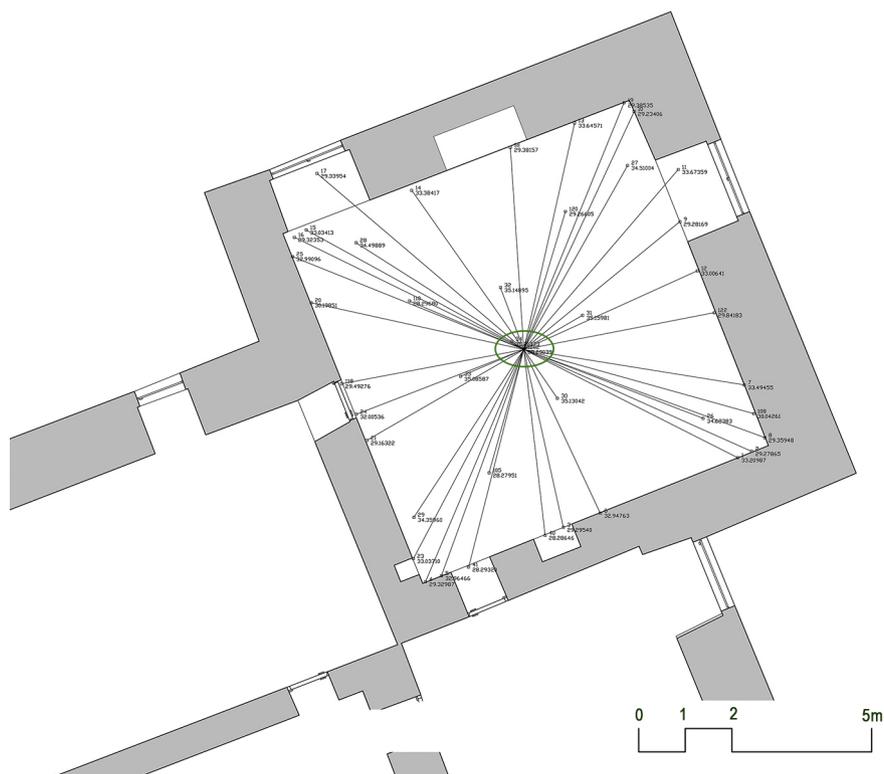


Fig. 2.7 - Vista planimetrica dei punti di dettaglio all'interno della camera.

La scelta di integrare i riferimenti esterni con quelli interni garantisce una continuità spaziale tra la Camera degli Sposi, l'interno del Palazzo Ducale e il contesto, con le finestre che diventano i punti di congiunzione, consentendo una transizione fluida tra le informazioni topografiche. Questa rete rappresenta un riferimento essenziale per studi, analisi e futuri interventi, offrendo una base solida per la comprensione della disposizione spaziale e delle caratteristiche architettoniche di questo ambiente.

Grazie a questa mappatura dettagliata, è stato possibile integrare in modo sinergico il rilievo *laser scanner* e fotogrammetrico in un unico sistema unificato e coerente (Cfr. Cap 3). Questo processo ha garantito che tutti i dati raccolti, provenienti da diverse fonti, fossero allineati in modo preciso e integrati all'interno di un sistema di coordinate comune rendendo possibile un'analisi più approfondita e una comprensione più completa degli elementi [Adami *et al.*, 2019].

## Note

1 In riferimento alle disposizioni normative del Ministero delle Infrastrutture italiane emanate il 14 gennaio 2008 le più specifiche sono: 'Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni' e la 'Valutazione e Riduzione del Rischio Sismico dei Beni Culturali' [www.dgspatrimonioculturale.beniculturali.it].

2 Mediante il metodo degli elementi finiti (FEM) ovvero una tecnica di analisi numerica utilizzata per studiare il comportamento di strutture complesse. Questo approccio suddivide la struttura, o il modello 3D della stessa, in elementi finiti più semplici, consentendo un'analisi dettagliata e accurata delle sue proprietà.

3 L'esplorazione tramite strumenti come *Google Maps* o *Street View* arricchisce significativamente la fase di preparazione, integrando in modo efficace la visione del luogo con l'analisi preliminare. Tuttavia il sopralluogo fisico sul sito rimane sempre consigliabile per valutare con precisione gli ostacoli, la morfologia del terreno, la visibilità e la presenza di altri edifici.

4 A questo scopo, vengono impiegate le reti geodetiche, sviluppate su scala nazionale e integrate da reti di I, II, III, IV, V, VI ordine per garantire una distribuzione più ravvicinata di punti di riferimento. Le misurazioni fino al IV ordine, noti come punti d'appoggio, sono state condotte dall'IGM; oltre questo livello, si ricorre alle triangolazioni di dettaglio (V ordine) e alle triangolazioni di sottorete (VI ordine), tracciate e rilevate dall'Amministrazione del Catasto, con il supporto delle reti dell'IGM.



Fig. 2.8 - Evidenziazione di due punti con relativa numerazione. In alto: il punto 03 identificato sull'architettura della parete ovest; in basso: il punto 24 identificato sull'affresco della parete nord.

Parete	Punti su affresco	Punti su architettura	Punti totali
Nord	5	3	8
Est	6	2	8
Sud	6	1	7
Ovest	6	3	9
Volta	9	-	9
Pavimento	-	4	4
			45

Fig. 2.9 Tabella della divisione dei punti battuti tramite metodo dell'irraggiamento.

## CAPITOLO 2

5 Punti di coordinate note che fungono da base per la georeferenziazione.

6 In situazioni in cui è necessario creare più stazioni di rilevamento e i punti noti non sono sempre visibili o disponibili, si ricorre alla poligonazione. Questo procedimento consente di collegare i vari rilievi all'interno di una rete di stazioni, di cui almeno una è georeferenzabile.

7 La celerimensura è una tecnica avanzata di rilievo topografico che si caratterizza per la sua efficienza e rapidità nell'acquisizione di dati planimetrici e altimetrici. Utilizzando strumenti come le stazioni totali, questo metodo consente una rapida esecuzione delle misurazioni, ottimizzando il tempo impiegato nel processo di rilevamento.

8 Queste operazioni di rilievo coinvolgono la lettura degli angoli verticale e orizzontale (zenitale e azimutale) e della distanza del punto in esame. Lo strumento automaticamente registra ed elabora i dati, fornendo le coordinate topografiche in vari formati e ne consente l'importazione diretta in *software* GIS o CAD.

9 La stazione totale Leica TS30 ha una precisione angolare di 0.5"; precisione EDM Pinpoint di 0.6 mm + 1 ppm con prisma e 2.0 mm + 2 ppm su qualsiasi superficie. Inoltre ha la funzionalità di Riconoscimento Automatico del Prisma (ATR) con una precisione di 1", garantendo un puntamento automatico accurato e affidabile [www.gefos-leica.cz].

10 Consultare le 'Specifiche Tecniche per l'aggiornamento di cartografie numeriche ed il loro adeguamento al Data base topografico Versione 2.0 - Dicembre 2007' della regione Lombardia.

11 Il metodo delle intersezioni in avanti utilizza la stazione totale per determinare la posizione di un punto nel terreno attraverso la misurazione degli angoli e delle distanze rispetto a punti di controllo predefiniti. Dopo l'installazione della stazione su un punto noto, essa viene puntata verso il punto da determinare, registrando gli angoli orizzontali e verticali e misurando le distanze e, nel caso di tecnologia ATR, individua automaticamente il prisma posizionato sul punto desiderato.

12 La deviazione standard dei punti topografici è una misura statistica che indica quanto i dati topografici sono dispersi o variabili rispetto alla media. Una deviazione standard più bassa indica una minore dispersione dei dati, quindi una maggiore accuratezza.

13 Il metodo dell'irraggiamento è una tecnica avanzata di rilievo topografico che impiega una stazione totale per determinare con precisione la posizione di punti visibili collocati nell'intorno.

### CAPITOLO 3

Rilievi *reality-based* del Palazzo Ducale e della Camera degli Sposi

Nell'ambito delle procedure per l'analisi e documentazione del Patrimonio Architettonico, l'integrazione di metodologie *range-based* e *image-based* si presenta come una strategia ottimale per sfruttare appieno le potenzialità di entrambi i sistemi la cui sinergia permette di ottenere misurazioni 3D precise e dettagliate insieme a rappresentazioni di alta qualità [Remondino, 2011].

In particolare, l'approccio fotogrammetrico offre una corrispondenza biunivoca tra i dati RGB dei singoli *pixel* e le relative coordinate XYZ e consente di creare un modello geometrico tridimensionale con informazioni radiometriche<sup>1</sup>. Tale modello non solo fornisce rappresentazioni spaziali dettagliate, ma può essere utilizzato per generare immagini metriche nel piano 2D (ortofoto di pianta o di prospetto). D'altro canto, i sistemi di scansione *laser* offrono tempi di acquisizione più rapidi sul campo e un controllo diretto della geometria (Cfr. Appendice A) risultando particolarmente vantaggiosi per misurare ambienti complessi e spazi con poca illuminazione e consentendo una registrazione agevole tra gli ambienti interni ed esterni.

L'integrazione di queste metodologie è attualmente largamente utilizzata nonostante la complessità relativa alla gestione dei dati e ai flussi di lavoro [Barba, 2019].

Nell'ambito della presente ricerca è stato condotto un rilievo che ha visto l'integrazione di tali metodologie, applicate alla Camera degli Sposi.



Fig. 3.1 - Laser scanner RTC360 durante il rilievo *range-based* della Camera degli Sposi.

## CAPITOLO 3



Fig. 3.2 - Nuvola di punti di due ambienti con condizioni di illuminazione differenti. Nel primo caso, l'ambiente non dispone di finestre, rendendo impossibile il controllo della luce naturale; il secondo è un ambiente cieco, privo di aperture. In questi contesti, il rilievo con laser scanner si dimostra particolarmente vantaggioso per la misurazione di spazi complessi, consentendo inoltre una registrazione agevole tra ambienti interni ed esterni.

L'impiego di strumentazioni *reality-based* ha consentito di ottenere rapidamente nuvole di punti, offrendo una base di dati accurata dal punto di vista metrico e geometrico. In particolare, è stata condotta una prima campagna di rilievo nel febbraio 2021, utilizzando metodologie *range-based* per documentare gli ambienti di Castel San Giorgio anche con l'obiettivo di aggiornare la documentazione esistente acquisendo le informazioni dettagliate sui rapporti in pianta e in alzato.

### 3.1 Il rilievo tridimensionale con tecnologie *range-based*

L'indagine preliminare ha consentito di pianificare in modo accurato le attività di rilievo, orientando la scelta della strumentazione più adeguata all'acquisizione dei dati. Tale selezione è stata condotta considerando la conformazione degli spazi e le relazioni tra di essi. In base a queste valutazioni si è deciso di privilegiare, in una prima fase, l'impiego di strumenti e sensori attivi, in grado di restituire informazioni a diverse scale - dal contesto volumetrico generale ai dettagli più minuti - in tempi ridotti e senza dipendere dalle condizioni di illuminazione della scena.

Date le differenti condizioni di illuminazione presenti lungo il percorso di scansione<sup>2</sup>, l'utilizzo di un *laser scanner* è risultato essenziale per garantire la coerenza dei dati (fig. 3.1). All'interno delle tecnologie *range-based* disponibili, è stato scelto il *laser scanner* RTC360<sup>3</sup> Leica Geosystem, in dotazione al laboratorio He.Su.tech<sup>4</sup> del Politecnico di Milano (fig. 3.2).

Questo strumento impiega la modulazione di fase per misurare le distanze, calcolando la differenza tra l'onda emessa e quella riflessa dalle superfici (Cfr. Appendice A) e presenta un ampio campo di acquisizione con una portata massima che varia tra 0,5 e 130 m nelle condizioni ottimali<sup>5</sup>.

Inoltre, lo strumento è dotato di sensori ottici, tra cui 3 telecamere HDR per acquisire immagini sferiche a 360° e 5 telecamere per il tracciamento delle stazioni tramite il sistema VIS<sup>6</sup>.



Fig. 3.3 - Foto sferica della scansione centrale nella Camera degli Sposi.

Le camere HDR acquisiscono 36 foto<sup>7</sup> per ricostruire l'immagine panoramica<sup>8</sup>, che viene poi utilizzata per colorare la singola nuvola di punti con valori RGB (fig. 3.3). Inoltre consente una registrazione grezza in tempo reale tra le singole scansioni in sito grazie all'integrazione del VIS e della piattaforma IMU<sup>9</sup> [Fiorillo *et al.*, 2021].

Questo approccio ottimizza l'uso dei dati IMU e risolve potenziali errori di posizionamento identificando punti riconoscibili nello spazio circostante e tracciando le posizioni di scansione consecutive [Higgins, 2018].

Inoltre l'interfaccia wireless e l'applicazione *Leica Cyclone FIELD 360*<sup>10</sup> per dispositivi *iPad* o *tablet* Android consentono il controllo remoto dello strumento facilitando la valutazione e la verifica della qualità durante il processo di scansione (fig. 3.4).

Questo include la visualizzazione dati 2D e 3D, il *tagging*<sup>11</sup> dei punti e l'allineamento automatico delle scansioni in tempo reale.

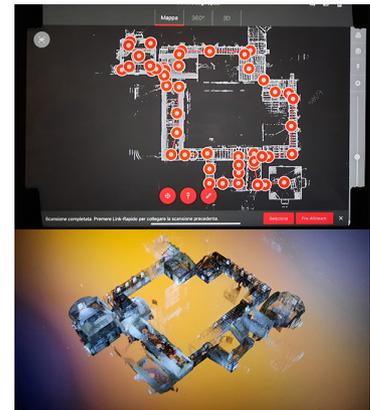


Fig. 3.4 - Questo laser scanner ha il vantaggio di poter vedere istantaneamente la nuvola di punti che si genera attraverso un tablet associato. In questo modo è possibile sopperire istantaneamente a eventuali lacune.

### 3.2 Filtraggio ed operazioni di *post-processing* della nuvola di punti

La campagna di acquisizione si è concentrata sul rilievo degli spazi interni del Castel San Giorgio, con particolare attenzione alla Camera degli Sposi e agli ambienti circostanti.

Il percorso di scansione è stato pianificato per acquisire i dati necessari senza creare zone d'ombra o caratterizzate dalla presenza di rumore o dati non rilevanti (fig. 3.5). Sono state effettuate 49 scansioni, coprendo un dislivello di circa 13 m e un'area di circa 45 x 45 metri, con una risoluzione di 6 mm a 10 m. L'allineamento delle scansioni è stato ottimizzato attraverso una registrazione cloud-to-cloud, basata sull'algoritmo ICP<sup>12</sup> nel *software Cyclone REGISTER 360*<sup>13</sup> (fig. 3.6).

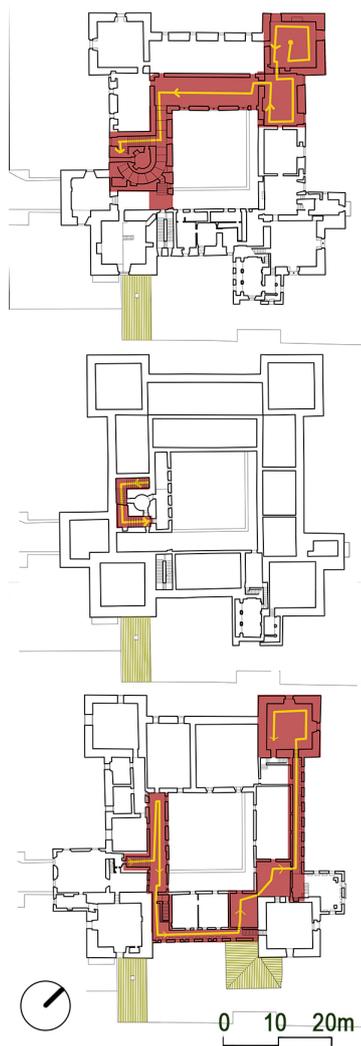


Fig. 3.5 - Schema riassuntivo del percorso di scansione eseguito durante i rilievi range-based del Castel San Giorgio. Piante a quota +31, +33 e +37.

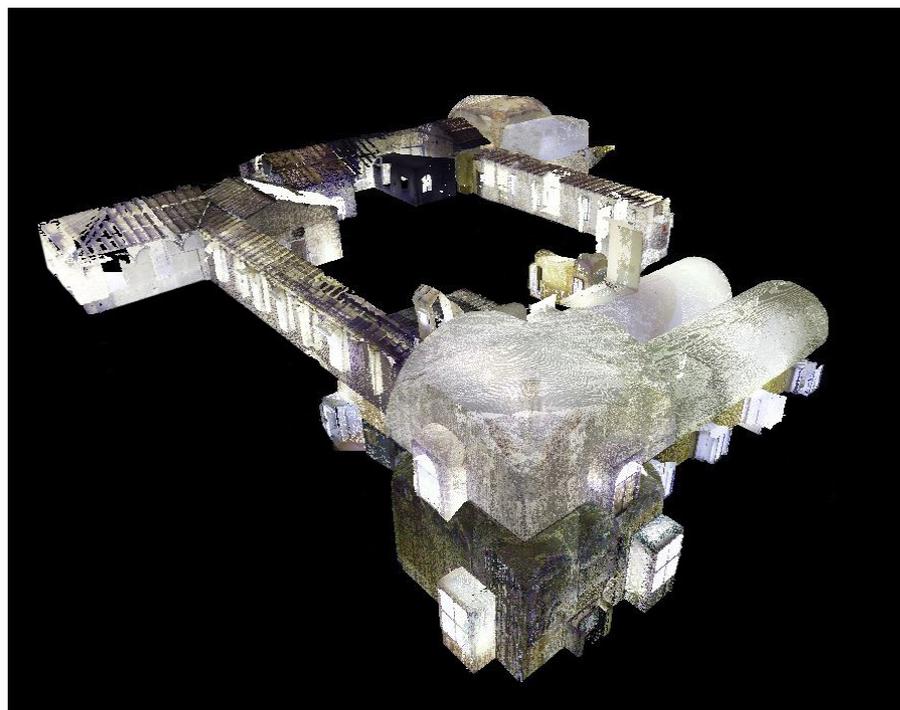


Fig. 7.6 - Nuvola di punti ripulita.

Questo processo ha permesso di creare collegamenti tra le posizioni di scansione, generando una nuvola di punti finale composta da oltre 2 miliardi e 500 milioni di punti. Complessivamente, la registrazione cloud-to-cloud ha raggiunto una deviazione media di circa 2 mm tra le diverse scansioni, con sovrapposizioni medie delle stazioni di scansione di circa il 73% e una robustezza dell'82% (fig. 3.7).

Sono state eseguite operazioni di filtraggio e pulizia dei dati a seguito del rilievo, poiché l'analisi dei dati ha rivelato la presenza di disturbi, come ad esempio ombre create dalla vegetazione esterna visibile dalle finestre e il transito di persone e veicoli nelle strade adiacenti alle facciate esterne. Inoltre, si è riscontrata un'eccessiva quantità di dati relativi agli edifici circostanti il castello. Pur essendo informativi per contestualizzare il complesso, questi dati avrebbero potuto sovraccaricare il *file*, compromettendo la gestione e la visualizzazione ottimale della nuvola di punti. Di conseguenza, è stata necessaria un'attenta operazione di pulizia per garantire la qualità e la pertinenza delle informazioni acquisite.

La prima fase di filtraggio è stata eseguita automaticamente utilizzando *Faro Scene*<sup>14</sup> durante la fase di pre-processamento delle posizioni di scansione applicando un filtro predefinito per ridurre i punti in base

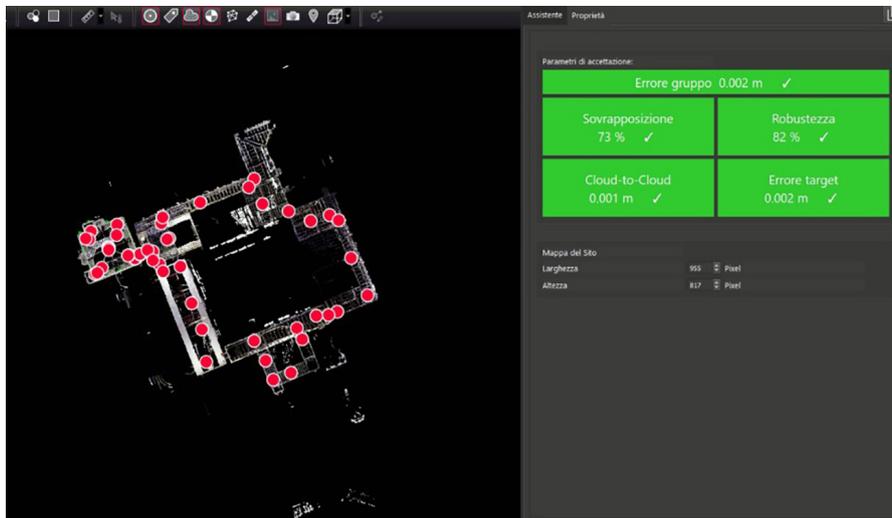


Fig. 7.7 - Parametri di accettazione nel programma Cyclone REGISTER 360.

### CAPITOLO 3



Fig. 3.8 - Pianta a quota 31 slm del Castel San Giorgio con informazioni RGB della nuvola di punti ove rilevata.

ai valori di riflettanza e dispersione e utilizzando altri filtri per definire intervalli di distanza o valori medi da rispettare. Tuttavia, al fine di ottenere un controllo accurato e individuare con precisione gli elementi da rimuovere, sono state condotte anche operazioni manuali utilizzando *Autodesk ReCap Pro*<sup>15</sup>.

Ciascun gruppo di nuvole di punti è stato esportato come un progetto nel formato .rcp, conservando le informazioni sulla posizione relativa e sulle singole posizioni di scansione.

Attraverso la manipolazione dei limiti di visualizzazione e l'uso di strumenti di selezione rettangolari e poligonali, sono state eliminate le informazioni ritenute superflue dalla nuvola di punti. Dopo questi passaggi, la versione filtrata è stata utilizzata come base per le prime valutazioni sulla disposizione degli ambienti e per il confronto con la documentazione esistente (figg. 3.8 - 3.10).



Fig. 3.9 - Sezione A-A' del Castel San Giorgio con informazioni RGB della nuvola di punti ove rilevata.

Rilievi *reality-based* del Palazzo Ducale e della Camera degli Sposi

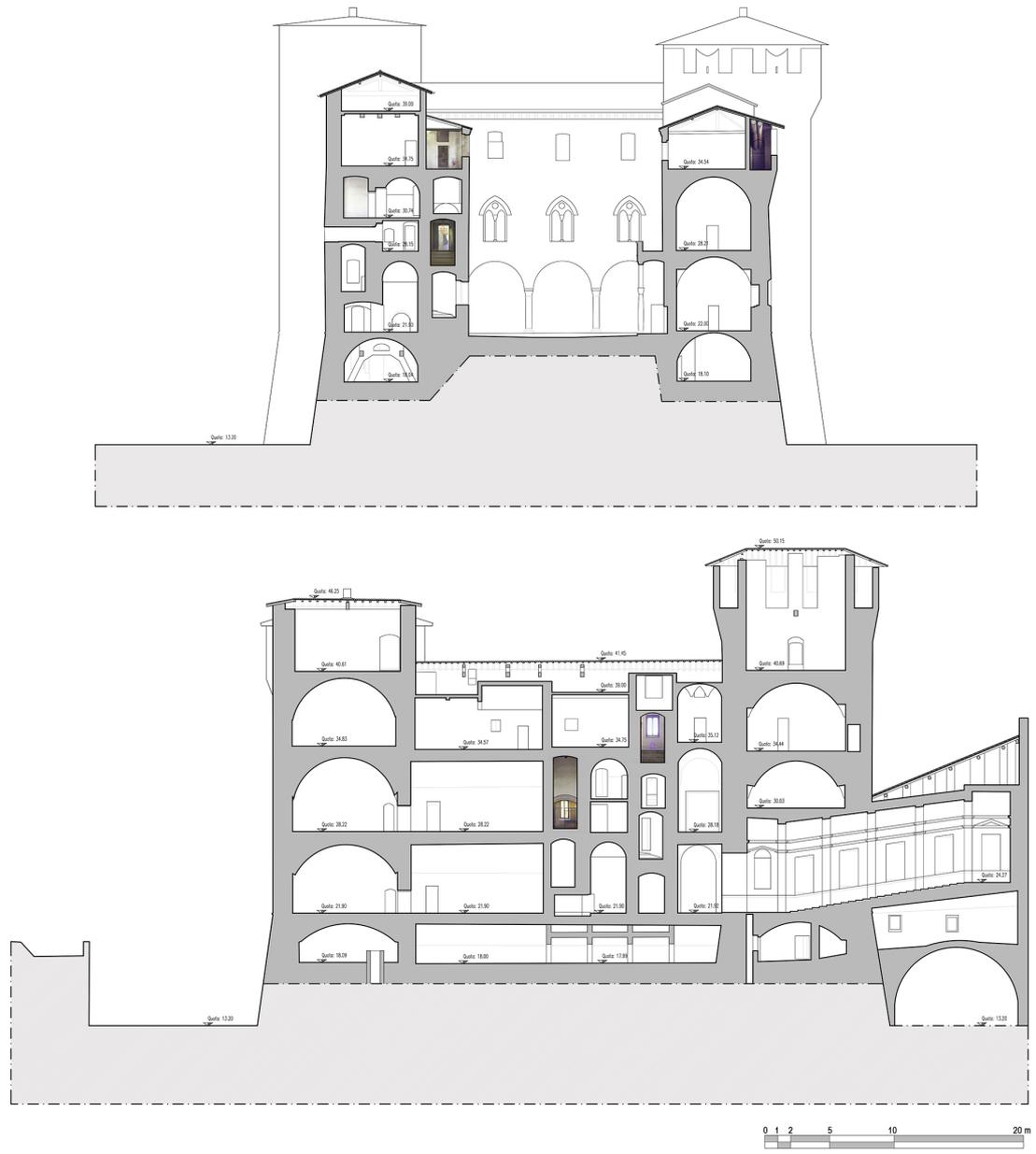


Fig. 3.10 - Sezione B-B' e C-C' del Castel San Giorgio con informazioni RGB della nuvola di punti ove rilevata.

### 3.3 Il rilievo tridimensionale con tecnologie *image-based*

A seguito del rilievo TLS è stato progettato un rilievo *image-based*, nell'ottica di acquisire dati di maggiore dettaglio di alcuni elementi. Tale acquisizione è stata dettata dalla volontà di avere un dato quanto più fotorealistico e cromaticamente corretto, grazie al quale leggere le più piccole sfumature delle superfici affrescate.

Le fasi del rilievo fotogrammetrico sono state suddivise in tre momenti principali: la calibrazione della fotocamera<sup>16</sup>, l'acquisizione delle immagini e la post produzione finalizzata alla nuvola di punti e al modello 3D.

La fotogrammetria digitale si basa sulla *Structure from motion* (SfM), una tecnica che utilizza algoritmi di *computer vision* per estrarre informazioni da un *dataset* di immagini. Questa metodologia consente di ricostruire la struttura tridimensionale di oggetti o scene a partire da diverse prospettive fotografiche, sfruttando i dati geometrici e le relazioni spaziali presenti nelle immagini. In sostanza, la SfM elabora le informazioni di movimento e posizione fornite dalle immagini per generare un modello 3D accurato degli oggetti fotografati. Il principio fondamentale del processo di *structure from motion* si basa sulla triangolazione, a partire dall'acquisizione di immagini di un oggetto osservato da diverse angolazioni, in cui un punto oggetto viene osservato da diverse angolazioni con sovrapposizioni significative tra le immagini.

La generazione della nuvola di punti e la creazione del modello tridimensionale, fase conclusiva del processo, si affidano a *software* di calcolo in grado di elaborare dati iniziali per produrre modelli correttamente definiti dal punto di vista geometrico. Tuttavia, è essenziale che abbiano un sistema di riferimento stabilito mediante il riconoscimento e la rielaborazione dei punti con coordinate note presenti nelle immagini. Questo procedimento genera un modello scalato e orientato, utile per la verifica di eventuali errori residui nelle coordinate di riferimento note [Bolognesi *et al.*, 2015].

L'utilizzo dei dati fotografici consente di ottenere una rappresentazione più realistica in termini di fedeltà cromatica e dettaglio delle superfici. Nel caso delle ampie superfici affrescate della Camera degli Sposi, l'acquisizione è stata



Fig. 3.11 - Macchina fotografica Canon EOS 5DS R durante il rilievo *image-based* della Camera degli Sposi.



Fig. 3.12 - Posizionamento di quattro lampade video LED per garantire una luce uniforme durante le prese fotografiche.

effettuata con la stessa fotocamera, ma adottando strategie di scatto differenti, in particolare con assi paralleli e con assi convergenti verso il centro della parete acquisita e successivamente intorno agli elementi architettonici in rilievo [di Luggo *et al.*, 2019]. Il rilievo fotogrammetrico delle pareti interne e della volta della Camera degli Sposi è stato effettuato utilizzando una fotocamera Canon EOS 5DS R, precedentemente sottoposta a calibrazione (fig. 3.11). Le impostazioni della fotocamera sono state regolate con una configurazione di diaframma a  $f/8$ , un tempo di esposizione di  $1/5$  di secondi, un ISO 400 e una lunghezza focale di 85 mm. Al fine di garantire la stabilità degli scatti la fotocamera è stata montata su un cavalletto e posizionata alla medesima quota per ciascuna strisciata. Dopo ogni cattura, la posizione della fotocamera è stata cambiata manualmente per coprire l'intera area con la necessaria sovrapposizione, evitando lacune nella documentazione. Al fine di garantire una distribuzione uniforme dell'illuminazione e minimizzare l'insorgenza di zone d'ombra indesiderate è stato pianificato il posizionamento di quattro lampade video LED<sup>17</sup> collocate il più lontano possibile dalla parete rilevata (fig. 3.12). Un ulteriore accorgimento è stato l'utilizzo di luce bianca, in modo da non alterare i colori degli affreschi e degli elementi architettonici presenti.



Fig. 3.13 - Color checker collocata sulla superficie da rilevare, utile per il bilanciamento dei colori delle foto .raw.

### 3.4 La calibrazione del colore tramite *color checker*

Le immagini catturate sono state salvate in due formati: .jpg ad alta risoluzione e .raw<sup>18</sup>. Questa doppia modalità di salvataggio ha consentito differenti approcci nell'elaborazione dei dati dove, in particolare, le immagini in formato .jpg ad alta risoluzione sono state utilizzate per un primo processamento della nuvola di punti, garantendo una maggiore efficienza nell'elaborazione, ma eventuali errori nel colore. Per ottenere una resa cromatica il più possibile fedele alla realtà, pertanto, sono state utilizzate immagini .raw per il bilanciamento. In un contesto non solo architettonico, ma anche pittorico, in cui ogni sfumatura e variazione di tonalità sono rilevanti, la corretta cattura del colore risulta essenziale. Pertanto, le immagini .raw sono state elaborate con l'ausilio di un *color checker*<sup>19</sup>, che consiste in un dispositivo che permette di avere un riferimento accurato per il bilanciamento cromatico fondamentale per la conservazione del dato cromatico, mitigando il rischio di distorsioni o perdite di tonalità durante gli scatti e la post produzione.

Il *color checker* è stato posizionato in modo tale da prevedere un'illuminazione identica a quella del soggetto di interesse e pertanto è stato necessario collocarlo su tutte le pareti includendolo in una serie di scatti (fig. 3.13). Grazie al formato .raw si è potuto lavorare sull'intera palette di colori acquisiti servendosi delle 24 *patch* colorate del *checker* e bilanciare i colori per ottenere una *texture* realistica. Sebbene dal punto di vista fotogrammetrico i risultati ottenuti con le foto .jpg e .raw si siano dimostrati entrambi efficaci in termini dimensionali, la texturizzazione del modello *mesh* e l'estrazione delle ortofoto hanno restituito esiti diversi a partire dalle due procedure. Infatti, l'analisi delle immagini non calibrate, catturate nella modalità .jpg, testimoniano l'impatto delle condizioni ambientali (fig. 3.14) in quanto, anche se le finestre erano schermate dall'esterno con fogli di carta, la luce ha comunque influenzato la resa visiva di alcune angolazioni. D'altro canto, le foto acquisite nel formato .raw hanno consentito una maggiore flessibilità durante la fase di post-produzione e pertanto, attraverso un

processo basato sull'identificazione delle *patch* colorate nel *color checker* e un intervento semiautomatico, la correzione è stata generalizzata all'intero *set* di immagini. Questo approccio ha permesso un'affinazione iterativa, conducendo a risultati ottimali attraverso passaggi successivi [Scandurra, Gallo, 2023]. Le immagini finali, così elaborate, sono state impiegate con successo nel processo fotogrammetrico.

Dopo aver corretto tutte le immagini con l'aiuto del *color checker*, considerando l'estensione delle superfici e la loro natura priva di discontinuità plastiche significative, l'elaborazione dei dati è stata effettuata utilizzando *Agisoft Metashape*.

Per l'orientamento del *dataset* si è scelto un settaggio di risoluzione a qualità 'high' al fine di utilizzare i dati di *input* nella loro dimensione originaria



Fig. 3.14 - Immagine .jpg non bilanciata a confronto con un'immagine .raw bilanciata sulla base del *color checker*.

### CAPITOLO 3

e garantire una stima più accurata nella definizione automatizzata dei parametri interni ed esterni della camera mantenendo i valori predefiniti per l'individuazione dei *key point* e *tie point*, ritenendo che fossero adeguati per il processo.

L'elaborazione ha restituito una prima nuvola di punti sulla base dell'allineamento di 525/525 *frames*, costituita da 750.000 *tie points*.

Dopo la prima fase, è stato avviato il processo di infittimento della nuvola di punti rada per meglio definire il modello nelle caratteristiche



*Fig. 3.15 - Nuvola di punti densa processata su Agisoft Metashape ottenuta dopo il bilanciamento delle immagini.*

geometriche generali e di dettaglio: per ogni *pixel* dei *frames* è stato individuato il corrispettivo punto 3D attraverso algoritmi di *Dense Image Matching*. Anche in questo caso, come per l'allineamento, è stata scelta l'impostazione 'high'. Questa scelta ovviamente ha influito sui tempi del processo, ma ha generato una nuvola di punti densa costituita da oltre 3 milioni di punti, che in una prima analisi puramente visiva, ha restituito un risultato soddisfacente [Pulcrano, 2022] (fig. 3.15).

### 3.5 Confronto e integrazione delle due metodologie

Le nuvole di punti, generate sia da rilievi *laser scanner* che da quelli fotogrammetrici, rappresentano modelli concettualmente affini, tuttavia distinguibili per le caratteristiche intrinseche proprie di ciascun metodo e delle apparecchiature utilizzate, del contesto [Acquaviva, 2022].

Al fine di ottenere una valutazione accurata della qualità metrica delle nuvole di punti relative alla Camera degli Sposi è stato eseguito un confronto critico tra i rispettivi *output*. La sovrapposizione delle nuvole è stata effettuata mediante l'impiego del *software CloudCompare*<sup>20</sup>, che permette l'importazione di nuvole di punti in differenti formati all'interno dello stesso spazio di lavoro. Nel contesto di questa analisi, i dati provenienti dal rilievo *laser scanner* e dal rilievo fotogrammetrico sono stati messi a sistema grazie alla battuta topografica effettuata prima dei rilievi. Pertanto, sono stati manualmente identificati e misurati punti di riferimento riconoscibili sia nei dati *laser* che in quelli fotogrammetrici, al fine di garantire un adeguato controllo di scala e orientamento utile anche all'estrazione di viste bidimensionali a partire dalla nuvola di punti (fig. 3.16). L'allineamento e la comparazione tra le nuvole è stato effettuato tramite l'utilizzo di target opportunamente posizionati e punti fissi selezionati nella Camera, ripresi in entrambi i rilievi.

Questi elementi hanno fornito i punti di corrispondenza tra i due modelli puntiformi. Nel computare la distanza che intercorre tra le due nuvole di punti - con il metodo *cloud-to-cloud* - *CloudCompare* sfrutta il metodo di calcolo



Fig. 3.16 - Ortofoto ad alta risoluzione esportate da Agisoft Metashape dei prospetti interni e della volta.

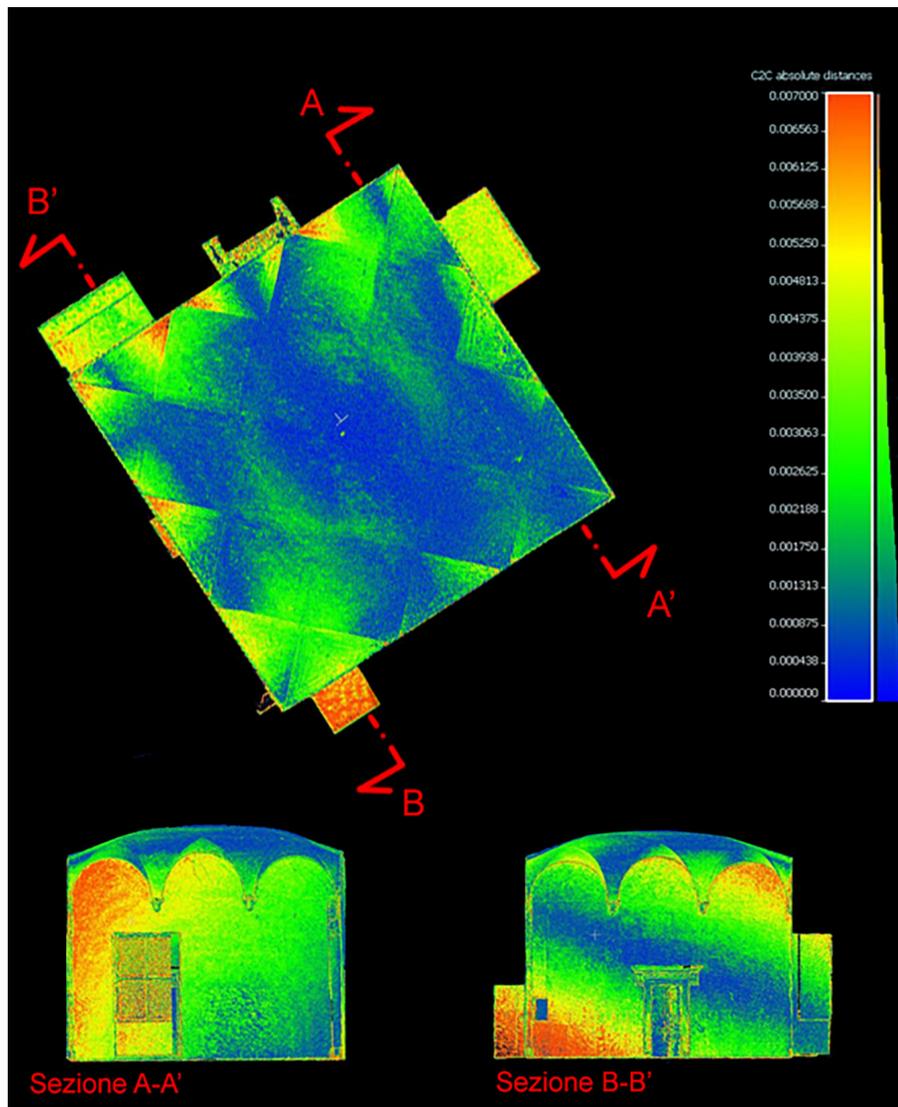


Fig. 3.17 - Nuvole di punti a confronto nel software CloudCompare. Da queste analisi si evince che le due nuvole coincidono. In alcuni punti fino al centesimo di millimetro (punti blu) e con un errore massimo nelle zone arancioni di 7 mm.

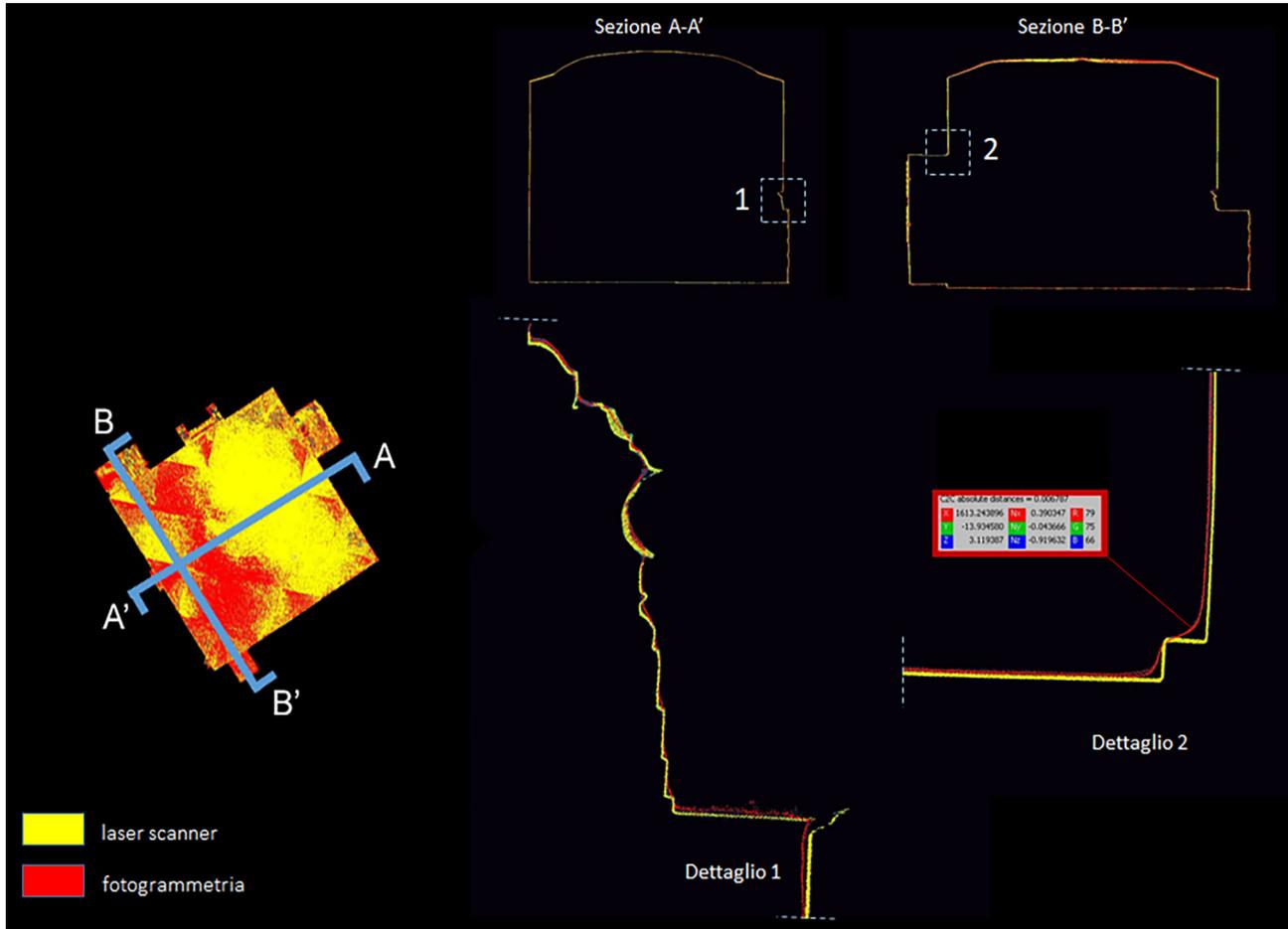


Fig. 3.18 - Sezionando le nuvole nei punti con errore più alto possiamo facilmente osservare che il profilo frutto della nuvola laser è molto più realistico e fedele rispetto a quello fotogrammetrico.

della *nearest neighbor distance* che per ogni punto del modello confrontato, ricerca il punto più vicino del modello di riferimento.

I risultati restituiti, con il relativo valore di deviazione standard, rappresentano la stima dell'errore sul numero massimo di punti considerati, rilevando una discrepanza di pochi millimetri sulla nuvola di punti completa (fig. 3.17).

### CAPITOLO 3

Sezionando le nuvole nei punti con l'errore più alto (circa 7 mm) è stato possibile osservare che il profilo ottenuto con il rilievo *range-based* è molto più realistico e fedele rispetto a quello fotogrammetrico (fig. 3.18).

Dopo aver effettuato una comparazione (fig. 3.19) tra le due rappresentazioni tridimensionali dei dati puntuali, è stato sviluppato un modello 3D mediante l'integrazione della mappa di *texture* acquisita tramite fotogrammetria, utilizzando *Agisoft Metashape*.

Questo modello tridimensionale dotato di informazioni cromatiche accurate è stato opportunamente posizionato nello spazio e ridimensionato in scala grazie all'associazione della battuta topografica

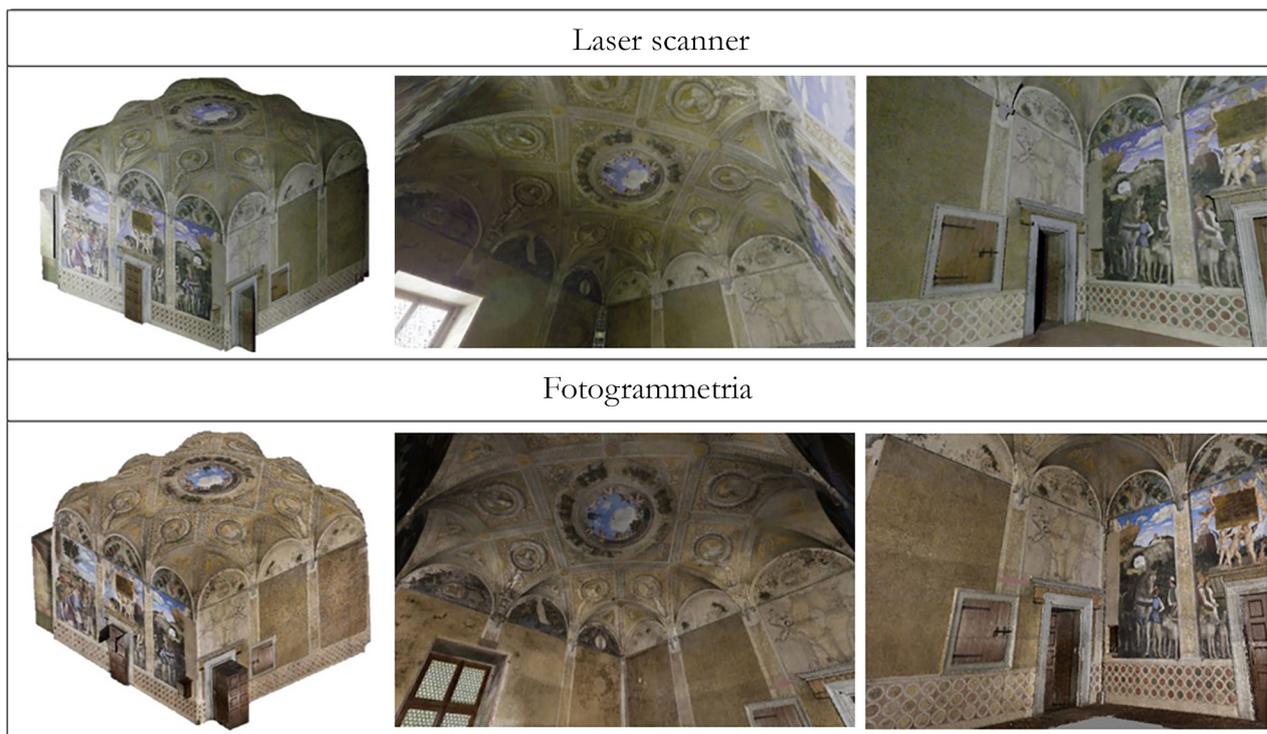


Fig. 3.19 - Confronto delle viste interne ed esterne delle nuvole di punti ottenute dal rilievo laser scanner e fotogrammetrico

Tutte le scansioni sono state georeferenziate nel sistema di riferimento topografico con il *software Leica Cyclone* utilizzando *target* a scacchiera bianco e nero, rilevati anche topograficamente. Tutte le nuvole di punti registrate formano così un database di punti ad altissima risoluzione che può essere analizzato, misurato e sezionato per ottenere rappresentazioni 2D e 3D della Camera e del suo contesto [Adami *et al.*, 2021].

Il modello *mesh* è stato opportunamente sezionato per creare rappresentazioni ortofotografiche della pianta, della volta e dei quattro prospetti interni della camera. Queste rappresentazioni hanno consentito un confronto approfondito con la documentazione grafica proveniente dagli archivi, precedentemente acquisita durante la fase iniziale dell'indagine.

Laddove i dati risultavano mancanti è stato fatto ricorso ad operazioni di interpolazione sulla base della disposizione geometrica dei punti e delle loro relazioni spaziali, con la possibilità di dedurre informazioni in zone dove i dati tridimensionali non erano disponibili. L'interpolazione, infatti, sfrutta le caratteristiche intrinseche dei dati raccolti e le relazioni spaziali all'interno dell'ambiente rilevato. Ciò ha consentito di stimare gli spessori murari e dei solai, fornendo una rappresentazione degli elementi architettonici non direttamente osservabili attraverso le tecniche di rilevamento 3D.

È tuttavia importante sottolineare che, mentre la nuvola di punti fornisce informazioni sulla superficie esterna degli oggetti, l'informazione riguardante gli spessori interni verticali e orizzontali è dedotta attraverso un processo analitico (fig. 3.20). In altre parole, la tecnica di interpolazione ha fornito una stima degli spessori sulla base della geometria dei punti circostanti, ma non è in grado di rivelare proprietà materiche interne, come la densità o la composizione (fig. 3.21). Infine, il modello tridimensionale risultante è stato impiegato come fondamento per la creazione di un ambiente virtuale interattivo attraverso l'utilizzo di dispositivi come *Oculus Rift*, nell'ottica di prevedere una fruizione immersiva dell'ambiente ricostruito.

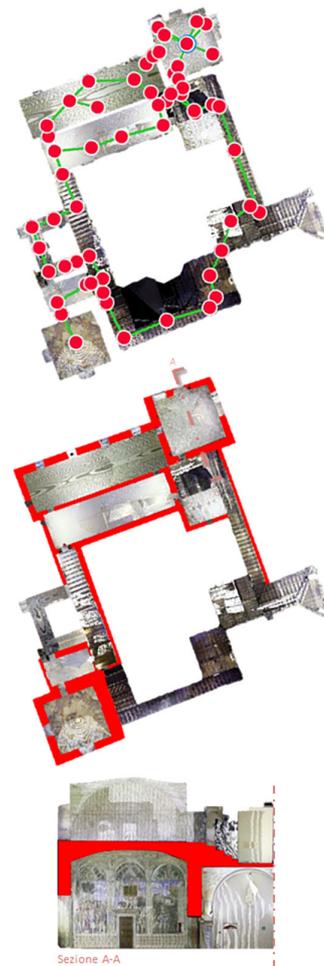


Fig. 3.20 - Interpolazione degli spessori murari e dei solai a partire dalla nuvola di punti.

## CAPITOLO 3

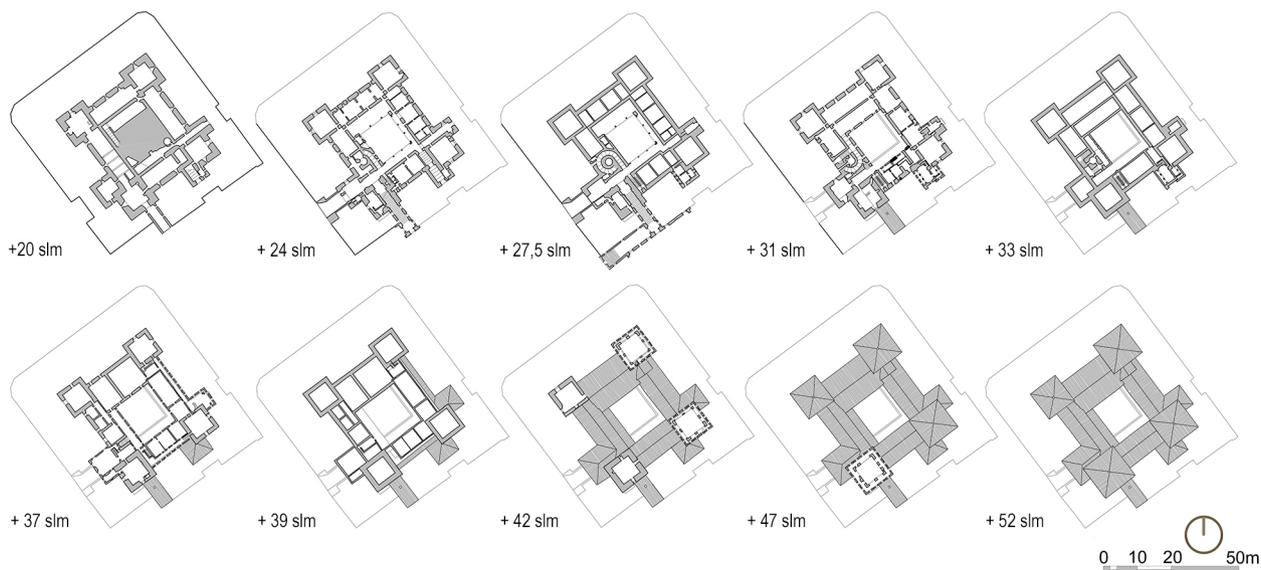


Fig. 3.21 - Elaborazione delle piante a diverse quote del Castel San Giorgio a partire dai rilievi effettuati dalla Data Engineering S.r.l. nel 1993

### Note

1 Le informazioni radiometriche si riferiscono alle proprietà e ai dati quantitativi associati all'energia elettromagnetica riflessa o emessa da una superficie o oggetto. Queste informazioni includono parametri come la luminosità, il colore e l'intensità della radiazione elettromagnetica catturata da sensori o dispositivi di rilevamento.

2 Alcuni ambienti avevano finestre non oscurabili, altri invece, come corridoi o scale di collegamento erano completamente ciechi.

3 Dispositivo che integra *hardware*, *app* e *software* per rilievo rapido anche in tempo reale sul *tablet* ed il *software* performante al fine di integrare il modello 3D nel flusso di lavoro. È in grado di catturare fino a 2.000.000 punti al secondo e completare una scansione *full dome* e l'immagine HDR sferica in meno di 2 minuti. [www.leica-geosystems.com].

4 *Heritage Survey TECHNOlogy group* è la sezione di Geomatica del MantovaLab afferente al Politecnico di Milano; è focalizzata su metodologie di rilievo, rappresentazione e gestione

dei dati 3D per architettura e archeologia, a supporto di conservazione e documentazione. [www.unescolab.mantova.polimi.it].

5 Ha una precisione angolare di 18", la precisione della portata 1,0 mm + 10 ppm e la precisione del punto 3D di 1,9 mm a 10 m e di 2,9 mm a 20 m e di 5,3 mm a 40 m.

6 *Visual Inertial System* ovvero il sistema di misurazione video inerziale avanzato per tracciare in tempo reale il movimento della posizione dello scanner rispetto alla configurazione precedente.

7 Ogni singola foto ha una risoluzione 4000 x 3000 px.

8 Calibrata a 360° x 300°.

9 *Inertial Measurement Unit* è un sistema basato su giroscopi e accelerometri per misurare orientamento e movimento dello scanner, compensando oscillazioni e garantendo dati accurati anche in movimento.

10 *Leica Cyclone FIELD 360* è un'applicazione mobile sviluppata da *Leica Geosystems*. Offre funzionalità per la cattura, la visualizzazione e la condivisione di dati di rilevamento e scansione in tempo reale, direttamente dal campo.

11 È il processo di attribuzione di etichette o marcatori virtuali ai punti di interesse identificati nella scansione tridimensionale. Questi *tag* forniscono informazioni aggiuntive ai dati raccolti, consentendo un'organizzazione più efficiente e agevolando l'analisi successiva. Il *tagging* può essere utilizzato per identificare oggetti specifici, creare mappe di colore o stabilire punti di riferimento all'interno della nuvola di punti acquisita dallo *scanner*.

12 La registrazione *cloud-to-cloud* basata sull'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) è una tecnica utilizzata nel campo della visione artificiale e dell'elaborazione delle immagini per allineare e registrare due nuvole di punti tridimensionali provenienti da diverse fonti di dati. L'algoritmo ICP è ampiamente utilizzato per calcolare la trasformazione di traslazione e rotazione ottimale che migliora l'allineamento tra le nuvole di punti, rendendole quanto più sovrapposte possibile [Piron L., 2016].

13 *Cyclone REGISTER 360* è un *software* di registrazione e allineamento avanzato progettato per semplificare e ottimizzare il processo di registrazione di dati di scansione provenienti da diverse fonti e sviluppato da *Leica Geosystems* [www.leica-geosystems.com].

## CAPITOLO 3

14 *FARO SCENE* è un *software* avanzato di elaborazione e gestione dei dati di scansione *laser* 3D. È progettato per lavorare con dati provenienti da scanner *laser 3D FARO* e da altre fonti di dati di scansione. Il *software* consente agli utenti di importare, registrare e elaborare grandi quantità di dati di scansione per creare modelli 3D dettagliati e precisi di oggetti, ambienti o strutture [www.faro.com].

15 *Autodesk ReCap Pro* è un software avanzato sviluppato da *Autodesk*, focalizzato sulla cattura, l'elaborazione e la gestione di dati di scansione 3D provenienti da diverse fonti, inclusi *scanner laser 3D*, fotocamere aerea e droni [www.autodesk.it].

16 La calibrazione di una macchina fotografica è il processo di regolazione accurata dei parametri interni della fotocamera per garantire la precisione e la coerenza nella cattura delle immagini. Questo coinvolge la correzione di variazioni nei colori, nell'esposizione, nella messa a fuoco e in altri aspetti, al fine di ottenere risultati fedeli alla realtà. La calibrazione può essere eseguita manualmente o attraverso strumenti e software specializzati, garantendo che l'*output* delle immagini rifletta fedelmente le condizioni di ripresa.

17 *Walimex Pro LED 1000* - Lampada video collocata su cavalletto.

18 Il formato *.raw* rappresenta un insieme non elaborato di dati dell'immagine, e preserva l'integrità completa delle informazioni catturate dal sensore. Fornisce dettagli precisi e inalterati per analisi approfondite. Il formato *.jpeg*, invece, introduce una compressione con perdita per ottimizzare la dimensione del *file*. Viene utilizzato nei contesti in cui la praticità di condivisione e visualizzazione veloce è prioritaria, sebbene con un compromesso sulla precisione totale dei dati. La selezione tra *.raw* e *.jpeg* nel contesto scientifico si basa sulla ponderata valutazione tra l'esigenza di dettagli inalterati e la praticità operativa nella diffusione delle informazioni.

19 Il '*color checker*' è composto da una serie di patch colorate e viene posizionato strategicamente all'interno della scena da catturare. Le varie tonalità presenti nel *color checker* servono come punti di riferimento standard per valutare e correggere il bilanciamento del colore durante le fasi di acquisizione e post-produzione delle immagini. L'utilizzo accurato di questo strumento contribuisce a evitare distorsioni cromatiche indesiderate e a ottenere una resa cromatica autentica e uniforme nell'analisi fotografica.

20 *Software* di elaborazione dati 3D per la gestione e l'analisi di nuvole di punti e modelli tridimensionali.

## **CAPITOLO 4**

Analisi delle superfici affrescate a partire dalle ortofoto ad alta risoluzione

L'utilizzo di ortofoto ad alta risoluzione amplifica le possibilità di analisi critica, consentendo un esame dettagliato della tecnica pittorica, delle sfumature cromatiche e delle eventuali alterazioni o restauri che nel corso del tempo potrebbero aver influenzato l'integrità dell'opera d'arte. Grazie a questa metodologia è possibile notare i dettagli più minuti, rivelando sfaccettature e sottili variazioni altrimenti impercettibili, arricchendo così la comprensione globale delle opere d'arte nel loro contesto storico e artistico. Per questo studio specifico sono state esportate le ortofoto a 1mm di risoluzione delle quattro pareti e della volta.

### **4.1 La Volta**

La volta della Camera degli Sposi è assimilabile ad una volta a padiglione su base quadrata (Cfr. Cap. 5).

Alcuni finti costoloni dividono lo spazio in figure regolari ed il tutto è arricchito da uno sfondo dorato e pitture che simulano sculture e clipei in stucco. L'impiego degli elementi architettonici dipinti crea l'illusione di un ampio spazio voltato che è il risultato della combinazione sinergica dell'uso di tecniche pittoriche avanzate con l'applicazione di principi architettonici/geometrici, che creano un effetto ottico sorprendente.

## CAPITOLO 4

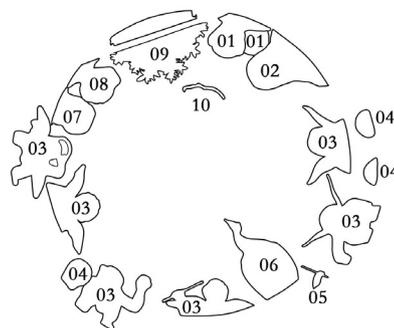


Fig. 4.1 - Identificazione dei personaggi e degli elementi sull'oculo:

01) Dama; 02) Dama con pettinino; 03) Putto; 04) Testa di putto; 05) Mano di putto con canna di bambù; 06) Pavone; 07) Dama nera; 08) Giovane sposa; 09) Vaso di agrumi; 10) Profilo nascosto tra le nuvole

### 4.1.1 L'oculo

Il punto focale della volta è il cerchio centrale che è l'elemento più stupefacente di tutto il sistema pittorico e dove sono portate alle estreme conseguenze le prime sperimentazioni del Mantegna nella Cappella Ovetari di Padova<sup>1</sup>. Si tratta di un tondo aperto illusionisticamente verso il cielo<sup>2</sup>, ove, scorciata secondo la prospettiva da 'sott'in su'<sup>3</sup> (Cfr. Cap. 7), si vede una balaustra dalla quale sporgono diverse figure<sup>4</sup> sullo sfondo di un cielo azzurro.

Mantegna ha utilizzato uno scorcio prospettico forzato per rappresentare architetture, oggetti e persone, inclusi putti e figure femminili, con straordinaria maestria. Le varie figure sono distribuite intorno alla balaustra in modo ordinato ed equilibrato, creando un senso di armonia e movimento rotatorio nell'intera composizione<sup>5</sup>.

Il dipinto sembra quasi ruotare come una giostra circolare, permettendo di ammirare le figure dei putti e delle dame come se fossero sculture osservate dal basso [Ado, 2018]. Questa stupefacente illusione prospettica e l'armonia della disposizione delle figure evidenziano l'abilità del Mantegna nell'uso della prospettiva e nell'equilibrio compositivo. Si tratta, come è noto, di una delle invenzioni più strabilianti del Quattrocento italiano, ove vengono a fondersi realtà e illusione attraverso strategie visive come nel caso dei putti dipinti in posizioni precarie, aggrappati alla cornice come se si stessero affacciando nel mondo reale, o altri putti nascosti dalla balaustra del balcone, mostrando solo la testa e le mani, che contribuiscono a creare un effetto di straordinaria tridimensionalità.

Mantegna ha dimostrato grande maestria nell'esplorare la prospettiva anche in riferimento al corpo umano, rappresentando i putti in pose articolate, inusuali e a volte anche di scorcio, sfidando la rappresentazione tradizionale dell'anatomia<sup>6</sup>. Tutto questo complesso di effetti visivi e prospettici evoca una sensazione di vertigine ed instabilità, creando un'esperienza unica all'interno dello spazio [Pescio, 2018].

La scena rappresentata nella volta suggerisce la vitalità della vita quotidiana dietro le quinte della corte contrapposta al rigido cerimoniale e ai momenti ufficiali narrati sulle pareti. In questo caso Mantegna sembra quasi volerci rendere partecipi di un'etichetta meno rigida e più pulsante di vita, offrendoci uno sguardo privilegiato nel cuore della corte gonzaghesca [Marini 2005].

Curiosamente, in tutti gli altri affreschi della Camera degli Sposi, non vi è un personaggio che mostri una vaga traccia di allegria, neanche i bambini, i putti o gli animali.

I dettagli dei volti e delle espressioni mostrano la profondità del talento di Mantegna e questo contrasto tra l'atmosfera giocosa delle donne sulla balaustra e l'aria mesta di tutti gli altri personaggi nella stanza aggiunge una nota intrigante all'opera<sup>7</sup> (fig. 4.1).

## CAPITOLO 4



*Fig. 4.2 - Sopra: identificazione delle otto losanghe; a destra: rappresentazione in CAD della losanga con la raffigurazione di Giulio Cesare.*

### 4.1.2 Il tributo classico: simboli imperiali e mitologia

La ‘finestra’ illusionistica, con un diametro approssimativo di circa un quarto della lunghezza del lato della stanza, è circondata da una ghirlanda circolare, che a sua volta è racchiusa in un quadrato di finti costoloni, dipinti con un motivo intrecciato che ricorda le palmette dei bassorilievi antichi, i cui punti di incontro sono rimarcati dalla presenza di medaglioni dorati.

Attorno al quadrato centrale, sono posizionate otto losanghe con uno sfondo dorato, ognuna delle quali contiene una ghirlanda circolare che incornicia il



ritratto clipeato in finto stucco di Giulio Cesare (fig. 4.2) e dei primi sette imperatori romani<sup>8</sup> (fig. 4.3).

I ritratti, dipinti a *grisaille*<sup>9</sup>, sono sorretti da putti e circondati da nastri. Questa rappresentazione sottolinea la forte ispirazione classica dell'intero ambiente, diventando anche in questo caso un tributo alla città dei grandi imperatori, modelli ideali di una forma di potere assoluto<sup>10</sup> [Folcini 2021].



Attorno alle losanghe, nel registro più esterno, sono collocati dodici pennacchi, ognuno corrispondente a una delle lunette presenti sulle pareti. Essi sono decorati con finti bassorilievi di ispirazione mitologica, che simbolicamente celebrano le virtù del marchese come condottiero e uomo di stato<sup>11</sup> (fig. 4.4). I finti costoloni<sup>12</sup> si concludono con capitelli dipinti, decorati con elementi vegetali che poggiano su peducci reali in stucco, su cui si trovano le basi dei putti che reggono i medaglioni [Malaguti 2018].

L'inclusione di riferimenti agli imperatori romani e alla mitologia greca costituisce senza dubbio una scelta celebrativa, sottolineata anche nelle pareti affrescate.

Fig. 4.3 - Rappresentazione in CAD degli imperatori romani a partire da Giulio Cesare in senso antiorario. Nella prima riga: Giulio Cesare, Ottaviano Augusto, Tiberio, Caligola. Nella seconda riga: Claudio, Nerone, Galba, Otone.

## CAPITOLO 4

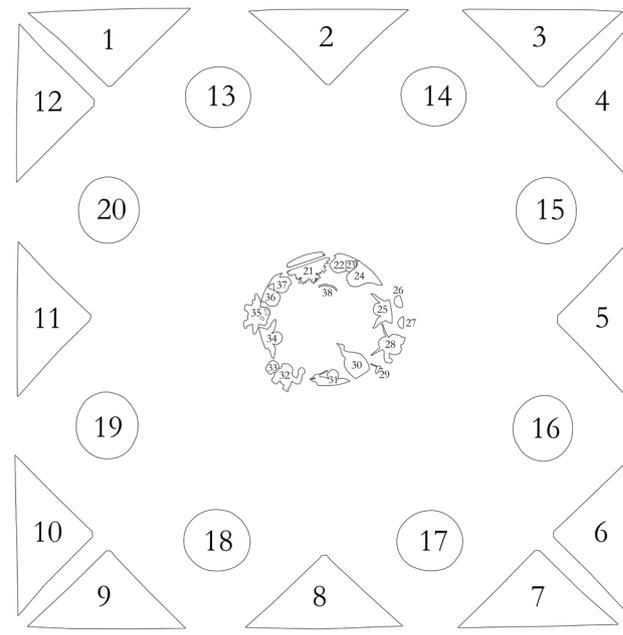


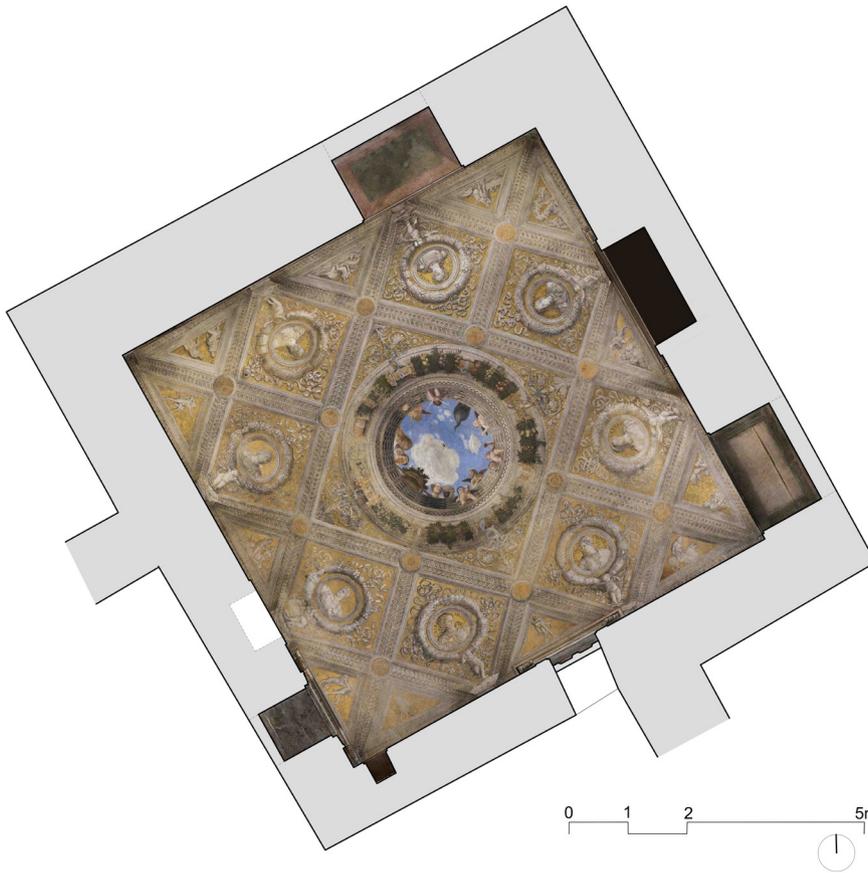
Fig 4.4 - Lunette:

1) *Le Fatiche di Ercole*: Ercole lotta contro il leone Nemeo; 2) *Le Fatiche di Ercole*: Nesso e Deianira; 3) Ercole scocca una freccia verso il centauro Nesso; 4) Periandro che condanna i cattivi marinai; 5) Arione portato in salvo dal delfino; 6) Arione che incanta il delfino; 7) Morte di Orfeo (Orfeo straziato dalle Baccanti); 8) Orfeo incanta Cerbero e una Furia; 9) Orfeo incanta le forze della natura; 10) Ercole che uccide Cerbero; 11) Ercole e Anteo; 12) Ercole che uccide l'Idra;

*Busti degli imperatori romani:*

13) Nerone; 14) Claudio; 15) Caligola; 16) Tiberio; 17) Ottaviano Augusto; 18) Giulio Cesare; 19) Otone; 20) Galba.

La famiglia viene associata ai grandi imperatori e alle virtù della mitologia, trasformando la Camera degli Sposi in un palcoscenico dedicato alla celebrazione di una dinastia e di un'epoca. In questo contesto, l'arte diventa uno strumento per proiettare l'immagine di una famiglia nobile nell'ambito dell'antica grandezza imperiale con profonda abilità e realismo dei ritratti e dei paesaggi. La profonda cultura di Mantegna<sup>13</sup>, la conoscenza delle fonti classiche e la capacità di fondere la mitologia e la storia in un'unica narrazione visiva si concretizzano quindi nella realizzazione di uno spazio sorprendente (fig. 4.5).



*Fig. 4.5 - Ipografia della Camera degli Sposi.*

## 4.2 Le pareti

Il tema generale raffigurato sulle pareti è la celebrazione politico-dinastica dell'intera famiglia Gonzaga, anche se decenni di studi non sono riusciti a chiarire univocamente un'interpretazione accettata da tutti gli studiosi. Probabilmente l'ideazione del complesso programma iconografico richiese varie consulenze, tra cui sicuramente quella del marchese stesso.

## CAPITOLO 4

Tuttavia a volte è impossibile riconoscere tutti i personaggi presenti nelle scene, nonostante la vasta bibliografia e l'accuratezza della fisionomia dei personaggi ritratti. Ogni parete presenta delle caratteristiche differenti, per quanto siano tutte accumulate da degli elementi di raccordo come il finto zoccolo marmoreo che gira tutt'intorno nella fascia inferiore, sul quale poggiano i pilastri che suddividono le scene in tre aperture (fig. 4.6).

Nella prima e nella terza lunetta<sup>14</sup> di ogni parete è rappresentato un medaglione con un'impresa della famiglia Gonzaga sotto forma di simbolo. Le imprese e gli stemmi di una nobile famiglia rappresentano più di una semplice insegna: sono la sintesi delle virtù innate e del potere acquisito nel tempo, il blasone che gli altri signori devono ammirare e temere [Pasetti, 1999].

Alla base delle lunette, tra peduccio e peduccio, corrono figuratamente le aste che fanno da cursore ai tendaggi, che sono raffigurati come scostati per permettere la visione delle scene principali. Questi drappi, che realmente coprivano i muri delle stanze del castello, simulano il broccato<sup>15</sup> o il cuoio impresso a oro e foderato d'azzurro, e sono abbassati sulle pareti sud ed est, mentre sono aperti sulla parete nord 'della Corte' e ovest 'dell'Incontro' [Camesasca, 2007].

In questa disamina delle pareti si è scelto di procedere in senso antiorario, a partire dalla parete nord e si analizzano gli affreschi situati in ogni settore dal primo al terzo a meno che non siano chiusi da tendaggio i occupati dalle finestre.



Fig. 4.6 - Finto zoccolo marmoreo che gira lungo la fascia inferiore di tutte le pareti.



Fig. 4.7 - Parete interna nord della Camera degli Sposi e identificazione dei tre settori, scanditi dai pilastri dipinti, in cui si dividono tutti i prospetti.

#### 4.2.1 La parete nord o 'della Corte'

La scena della corte nella Camera degli Sposi presenta una strutturazione particolarmente originale per adattarsi alla forma della stanza. La presenza di un camino, che invade la parte centrale destinata agli affreschi narrativi, presentava una sfida nel disporre la scena senza interruzioni visive. Mantegna risolse questo problema in modo ingegnoso, collocando la scena su una piattaforma rialzata accessibile tramite alcuni gradini sul lato destro.

## CAPITOLO 4



Fig. 4.8 - Il marchese Ludovico che tiene in mano una lettera stralcio dell'ortofoto e rappresentazione in CAD.

Questa piattaforma si estende sopra il camino e ospita preziosi tappeti, arricchendo e sottolineando ulteriormente l'opulenza e la sontuosità della scena. Il primo settore della parete nord, in corrispondenza della prima lunetta, è occupato da una finestra che si affaccia sul fiume Mincio; qui Mantegna rappresentò una tenda chiusa<sup>16</sup>.

Nel secondo settore invece, la tenda è dischiusa e mostra la corte dei Gonzaga riunita, con una splendida transenna decorata da medaglioni marmorei sullo sfondo, oltre la quale un alberello sfonda nella lunetta sormontato da festoni adornati da mele cotogne, uno dei tesori gastronomici di Mantova.

Nel terzo settore, la tenda è chiusa, ma alcuni personaggi vi passano davanti, camminando anche davanti al pilastro, in un'abile confusione tra mondo reale e mondo dipinto (fig. 4.7).

La scena raffigurata nell'affresco della parete nord è ancora oggetto di varie interpretazioni e dibattiti tra gli studiosi. La presenza di una lettera tenuta dal marchese Ludovico II Gonzaga ha suscitato diverse ipotesi riguardo all'episodio rappresentato. Alcuni suggeriscono che la lettera potrebbe essere stata una convocazione urgente di Ludovico da parte della duchessa di Milano Bianca Maria Visconti, riguardante l'aggravarsi delle condizioni del marito Francesco Sforza e la necessità del marchese di tornare a Milano per assumere il comando delle truppe milanesi [Simon, 2001].

Tuttavia, la mancanza di scritte leggibili sulla lettera e la sua copertura da parte del pomello del faldistorio sul trono rendono difficile confermare questa ipotesi. Altri hanno proposto che la lettera potrebbe essere stata una *damnatio memoriae*, una sorta di cancellazione o censura simbolica, decisa dai Gonzaga nei confronti della famiglia Sforza, poiché questi ultimi avevano impedito al loro erede di sposare le figlie di Ludovico [Camesasca, 2007; Signorini, 1985] (fig. 4.8).

#### 4.2.1.1 Le lunette della parete nord

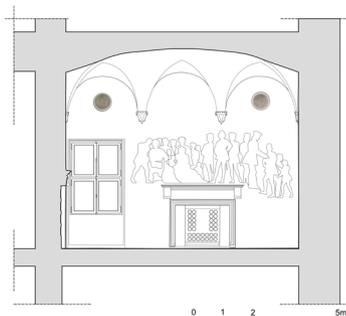
La prima e la terza lunetta presentano un medaglione con un emblema che conduce a un significato più profondo e simbolico. La prima lunetta, dedicata all'impresa della 'Tortorina', trasmette un messaggio di amore incondizionato e di valore nella fedeltà coniugale<sup>17</sup>.

Un'immagine poetica di una tortora posata su un ramo curvato attorno a una pozza d'acqua torbida, accompagnata da un antico motto francese che afferma '*Vrai amour ne se change*' ovvero 'il vero amore non cambia' [Signorini, 1985].

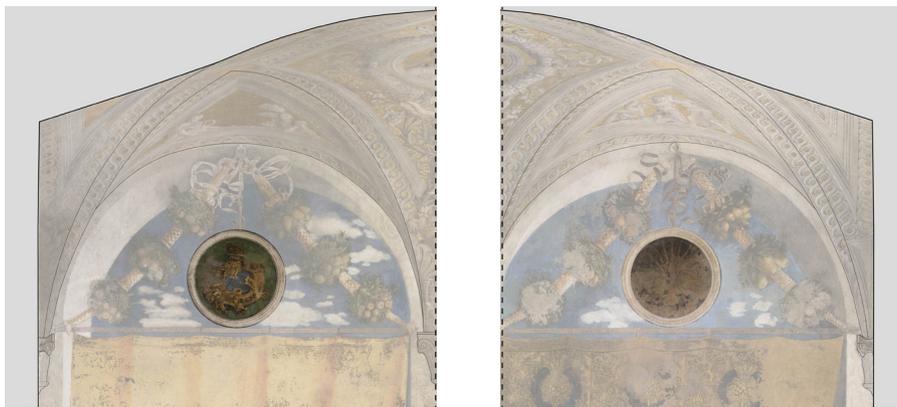
In contrasto con la delicatezza della Tortorina, nella terza lunetta emerge l'impresa gonzaghesca per eccellenza: il Sole.

Questo simbolo, ampiamente diffuso su marmi e dipinti della città, esprime la forza dell'astro e la sua natura benefica sulla terra (fig. 4.9) [Pasetti, 1999].

## CAPITOLO 4



*Fig. 4.9 - Identificazione degli emblemi nella prima e terza lunetta della parete nord.*

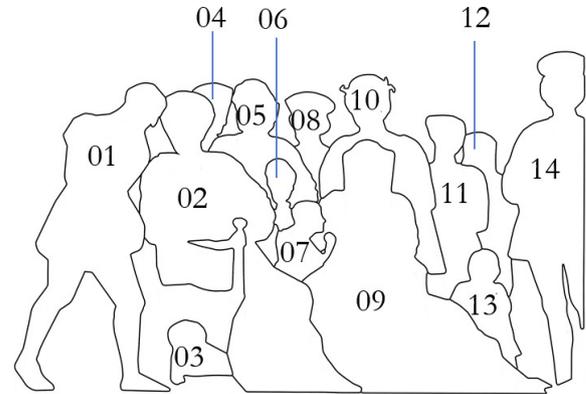
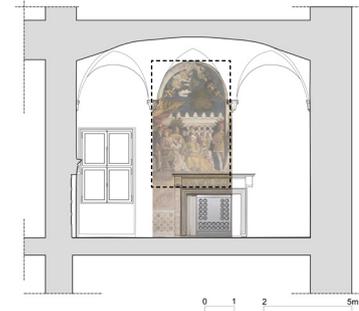


### 4.2.1.2 I personaggi della parete nord

L'identificazione dei personaggi raffigurati nella Camera degli Sposi è un compito complesso, che ha coinvolto, e coinvolge tuttora storici dell'arte e studiosi. La sfida principale nell'identificazione dei personaggi rappresentati è dovuta all'assenza di iscrizioni o spiegazioni dirette nel dipinto stesso che avrebbero potuto fornire chiare indicazioni sui nomi dei personaggi. Di conseguenza, gli studiosi hanno dovuto adottare diverse metodologie per avvicinarsi a una corretta identificazione. Una delle tecniche utilizzate è stata la comparazione con ritratti esistenti di personaggi dell'epoca, come dipinti, sculture o monete. Inoltre, sono stati ricercati documenti storici<sup>18</sup>, come lettere, diari e registri di corte, che potessero fornire informazioni sulle persone presenti nella corte dei Gonzaga a Mantova. Questi documenti hanno contribuito a delineare le relazioni tra i membri della famiglia Gonzaga e le figure influenti presenti nella corte, offrendo contesti e legami storici. Un'altra strategia è stata l'analisi dello stile dell'artista e dei dettagli iconografici presenti nell'affresco che spesso, nel Rinascimento, venivano associati ad alcune persone o periodi specifici. Tuttavia, nonostante l'approccio multidisciplinare e l'uso combinato di queste metodologie, alcune identificazioni rimangono incerte e soggette a dibattito.

Ciò potrebbe derivare da rappresentazioni ambigue o idealizzate di alcuni personaggi, oppure da scelte artistiche intenzionali, oppure alcuni potrebbero essere stati intenzionalmente mascherati o resi difficili da riconoscere.

Il primo settore di questa parete è prevalentemente coperto da un tendaggio e occupato quasi interamente da una finestra, per questo motivo l'attenzione dell'iconografia è focalizzata esclusivamente sul secondo e terzo settore.



*Fig. 4.10 I personaggi del secondo settore della parete nord:*

*01) Il segretario Marsilio Andreasi o Raimondo Lupi di Soragna oppure il fratello del marchese Alessandro; 02) Il marchese Ludovico II Gonzaga; 03) Rubino il cane preferito del marchese; 04) Leon Battista Alberti; 05) Il terzogenito Gianfrancesco Gonzaga; 06) Il protonotario Ludovichino; 07) Paula Gonzaga; 08) Vittorino da Feltre; 09) Barbara di Brandeburgo; 10) Rodolfo Gonzaga; 11) Barbarina Gonzaga; 12) Paola Malatesta o una nutrice; 13) La nana di corte Lucia; 14) Un famiglia o Alessandro Sforza (Cfr. Cap. 4.1).*

### 4.2.1.3 Il secondo settore della parete nord

Dallo studio e dal confronto di queste diverse letture è quindi possibile stabilire che il settore centrale mostri il marchese Ludovico II Gonzaga<sup>19</sup> seduto su un trono in veste da notte, che tiene in mano una lettera e si intrattiene con un servitore dal naso adunco<sup>20</sup>.

Ai piedi del trono, accucciato, c'è il fedele cane preferito del marchese, Rubino, simbolo di fedeltà e lealtà.

Alle spalle del marchese, in piedi, si erge il terzogenito Gianfrancesco<sup>21</sup>, che poggia le mani sulle spalle di un bambino, forse il protonotario Ludovichino<sup>22</sup>.

L'uomo con il cappello nero è Vittorino da Feltre<sup>23</sup>, il precettore del marchese e dei suoi figli, noto per essere stato un rinomato educatore dell'epoca. Accanto al marchese troneggia la moglie, Barbara di Brandeburgo<sup>24</sup>, dall'espressione solenne e in posizione quasi frontale<sup>25</sup>. Fra i due coniugi è ritratta, rigidamente di profilo, Paula, la figlia morta prematuramente: questa posa innaturale rende la sua figura astratta e irreali, nonostante la puntuale individuazione fisionomica [Nifosi, 2022]. Dietro la madre sta in piedi Rodolfo<sup>26</sup>, affiancato a destra da una donna, probabilmente Barbarina Gonzaga<sup>27</sup>.

Gli altri personaggi sono incerti. Il primo uomo di profilo in secondo piano da sinistra è stato interpretato come un possibile ritratto di Leon Battista Alberti<sup>28</sup>, mentre la donna dietro Barbarina è forse una nutrice di casa Gonzaga o Paola Malatesta<sup>29</sup>, madre di Ludovico II, in abito monastico.

In basso si trova la nana di corte Lucia affetta da neurofibromatosi, che guarda direttamente lo spettatore<sup>30</sup>, in piedi, parzialmente coperto dal pilastro si trova un famiglio<sup>31</sup>.

Il settore centrale è quindi quello cruciale per sottolineare la ricchezza della famiglia, ma anche per sottolinearne lo status tramite l'opulenza e l'eleganza delle vesti, dei tessuti e degli arredi e la presenza di figure eminenti come Leon Battista Alberti e Vittorino da Feltre.

Mostrando queste personalità di spicco tra familiari, cortigiani e amici, Ludovico Gonzaga intende presentarsi come il sovrano di una corte colta ed erudita, decisa a proteggere e promuovere le arti.

Questo dimostra il suo impegno nel creare un ambiente culturale stimolante, dove l'apprezzamento per le arti e le conoscenze letterarie si fondono con l'opulenza e il lusso materiale.

In tal modo si proietta un'immagine di nobiltà non solo nel potere e nella ricchezza, ma anche nella sua capacità di essere un mecenate e un promotore delle arti e della cultura nella sua corte [Bonoldi, 2020] (fig. 4.10).

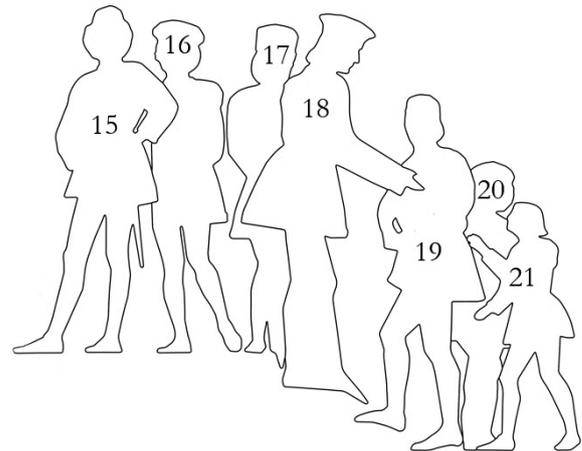
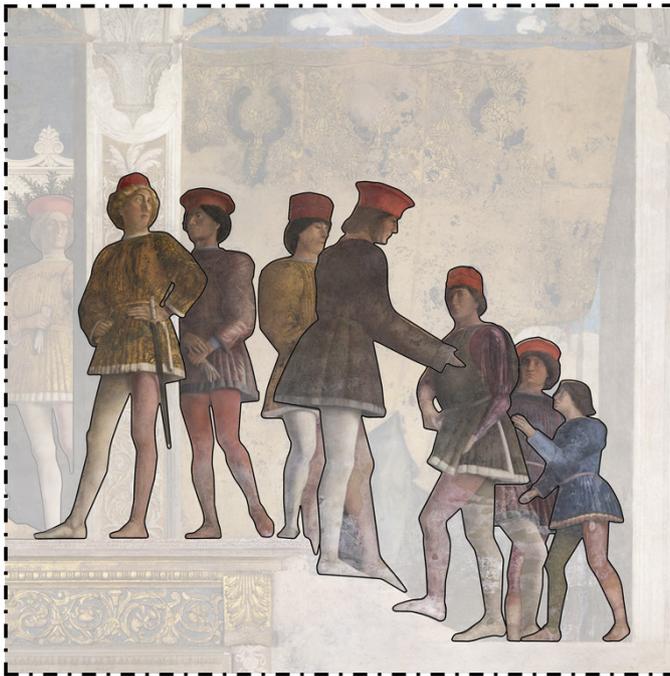
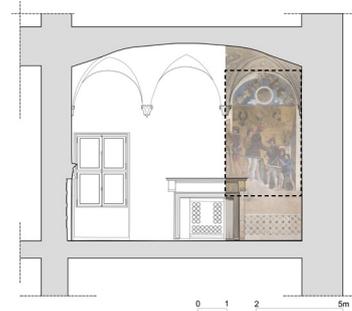


Fig. 4.11 - I personaggi del terzo settore della parete nord:

15) Nicolò d'Este o Carlo Sforza; 6) Costanzo Sforza; 17) Secondo Sforza; 18) Tristano Sforza; 19) Ludovico il Moro; 20) Sforza Maria Sforza; 21) Caterina Gonzaga.

### 4.2.1.4 Il terzo settore della parete nord

Il terzo settore mostra sette cortigiani<sup>32</sup> che si avvicinano alla famiglia marchionale, in parte sulla piattaforma, in parte salendo le scale attraverso un'anticamera<sup>33</sup>. Il primo, appoggiato al pilastro potrebbe essere Nicolò d'Este<sup>34</sup> mentre l'ultimo personaggio rappresentato sulla destra, in abito blu, potrebbe essere Caterina Gonzaga, figlia naturale del marchese Ludovico<sup>35</sup>.

Un recente studio ha creduto di identificare nelle altre figure di cortigiani gran parte della famiglia Sforza per gli importanti legami politici e dinastici che li legavano alla famiglia Gonzaga. Entrambe le dinastie governavano importanti Stati del nord Italia e avevano ambizioni politiche e territoriali, il che portò a volte a collaborazioni, a volte a conflitti. Inizialmente, le due famiglie avevano rapporti amichevoli e si allearono in diverse occasioni per affrontare minacce comuni e consolidare le loro posizioni di potere, tuttavia, nel corso degli anni, le relazioni tra le due dinastie subirono alti e bassi e, a causa delle rivalità tra le diverse potenze italiane e delle ambizioni espansionistiche, ci furono anche scontri e conflitti tra di loro. Seguendo questa lettura il primo uomo appoggiato alla sinistra del pilastro potrebbe essere Alessandro<sup>36</sup> il fratellastro di Francesco Sforza affiancato da un giovane biondo dall'aria spavalda e con lo spadino in bella evidenza identificato come Carlo<sup>37</sup> uno dei figli di Galeazzo Maria Sforza<sup>38</sup>. A destra del pilastro è possibile riconoscere Costanzo<sup>39</sup> figlio di Alessandro Sforza.

L'uomo con la veste arabescata e il suo compagno con il cappello capitaneo, che volta le spalle alla corte di Ludovico e indica ai suoi di partire, potrebbero corrispondere a Secondo e Tristano Sforza<sup>40</sup>. Di fronte a quest'ultimo il giovane dalla carnagione scura è riconoscibile come Ludovico il Moro<sup>41</sup>, futuro duca e condottiero, di cui sono diffusi molti ritratti attendibili. Infine l'uomo dietro al Moro è identificabile per l'età e per il copricapo in Sforza Maria<sup>42</sup> duca di Bari [Pasetti, Pinotti, 1999] (figg. 4.11).

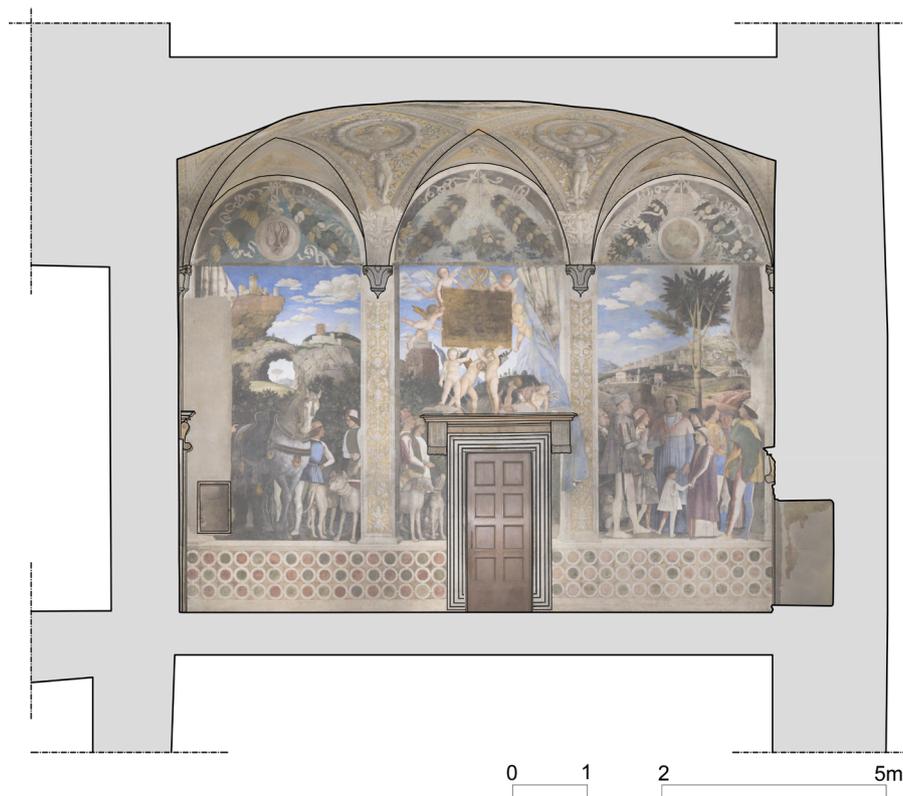


Fig. 4.12 - Parete interna ovest della Camera degli Sposi.

#### 4.2.2 La parete ovest o 'dell'Incontro'

La scena sulla parete occidentale della Camera *Picta*, nota come 'dell'Incontro', è dedicata alla glorificazione della famiglia Gonzaga, anche se l'occasione esatta della sua commissione rimane incerta, generando varie divergenze tra gli studiosi. Secondo diverse interpretazioni, la parete raffigura un incontro avvenuto a Bozzolo il primo gennaio del 1462. In quell'occasione, il marchese Ludovico Gonzaga, che ricopriva anche la carica di luogotenente generale del ducato lombardo, stava dirigendosi a Milano su richiesta di Bianca Maria Visconti<sup>43</sup> per assicurare la continuità del potere in seguito a una malattia del marito Francesco Sforza<sup>44</sup>, il cui esito era temuto fatale.

## CAPITOLO 4

Nel frattempo, i fratelli Federico<sup>45</sup> e Francesco<sup>46</sup> Gonzaga stavano tornando da Milano, dove avevano ringraziato lo Sforza per il sostegno fornito alla nomina del primo cardinale di casa Gonzaga [Marini, Marinelli, 2006]. Tuttavia, la figura matura e corpulenta di Francesco, collocato al centro della scena, non si adatta alla sua giovane età nel 1461, all'incirca 17 anni. Ciò ha portato a ipotizzare che gli affreschi potrebbero celebrare invece la visita di Sua Eminenza a Mantova nell'agosto 1472, quando si preparava a ricevere *in commendam*<sup>47</sup> la chiesa di Sant'Andrea<sup>48</sup> [Malaguti, 2018](fig. 4.12).

### 4.2.2.1 Le lunette della parete ovest

Anche la parete ovest è suddivisa in tre sezioni in corrispondenza delle lunette ed è delimitata da pilastri decorati. Nel primo e nel terzo settore si trovano i medaglioni con le imprese della famiglia Gonzaga. Nel primo settore è raffigurato 'l'anello con le ali'. Questa impresa potrebbe assumere il significato di forza e di fedeltà e consiste in due ali spiegate che afferrano con artigli da uccello rapace, ornati di sonagli, un anello<sup>49</sup>. Nel terzo settore invece è presente 'il Dragone alato', simbolo ricorrente anche in altre rappresentazioni della famiglia Gonzaga. Probabilmente è simbolo di vigilanza, perspicacia ed eloquenza, oltre che di forza [Mondini, 2023] (fig. 4.13).

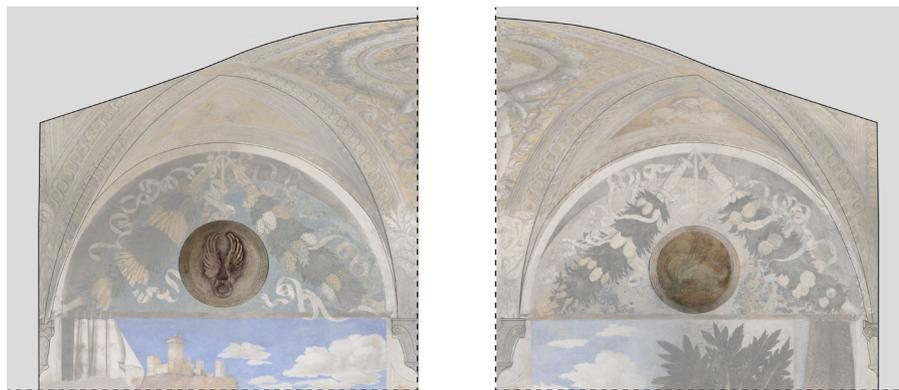


Fig. 4.13 - Identificazione degli emblemi nella prima e terza lunetta della parete ovest.

#### 4.2.2.2 Il paesaggio della parete ovest

Contrariamente alla parete nord, la parete occidentale non si limita solo alla rappresentazione dei personaggi, Mantegna infatti dedica circa la metà dell'area a un maestoso paesaggio che si estende prospetticamente, sfumando in lontananza in città ridotte a dimensioni minime e animate da piccole e laboriose figure umane. Infatti, i tre pilastri affrescati vicino ai peducci della volta incorniciano una scena ambientata all'aperto, presentando vedute panoramiche di campagne, castelli, giardini e monumenti antichi (fig. 4.14).

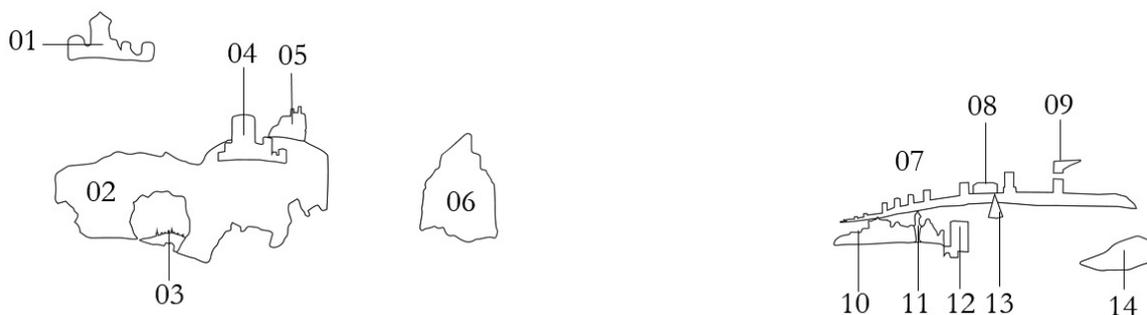
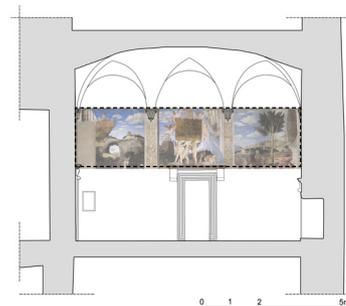


Fig. 4.14 - Il paesaggio nella parete ovest :

01) Castello Savelli Torlonia situato a Palombara Sabina; 02) Ponte di Veja; 03) la città di Tuscolo; 04) Rocca Pia di Tivoli; 05) L'acropoli di Palestrina; 06) Torre di Babele o del Castel Sant'Angelo; 07) Mura Aureliane; 08) Il Colosseo; 09) Teatro Marcello; 10) Tempio di Ercole 11) Statua colossale di Ercole; 12) Ponte Nomentano; 13) Piramide Cestia; 14) Cava di marmo.

## CAPITOLO 4



Fig. 4.15 - Dettaglio della città ideale di Roma nella parete ovest.



Fig. 4.16 - Dettaglio del ponte di Veja sulla parete ovest.

L'effetto complessivo è straordinariamente suggestivo, reso possibile grazie all'abile utilizzo delle regole prospettiche di tipo brunelleschiano, già illustrate da Leon Battista Alberti nel suo trattato *'De Pictura'*<sup>50</sup> [Nifosi, 2022].

Sulla parete destra, sovrastante l'incontro principale e dietro un albero, emerge una città 'ideale' o forse solo frutto della fantasia dell'artista; secondo alcuni studiosi, essa rappresenterebbe la visione immaginaria di Roma concepita da Mantegna. In questa rappresentazione, alcuni celebri monumenti dell'*Urbe* sono riconoscibili, come il Colosseo, la piramide di Caio Cestio, il teatro di Marcello, il ponte Nomentano e le Mura aureliane (fig. 4.15). Tuttavia, alcuni elementi risultano poco accurati o fedeli alla reale storia della città, probabilmente a causa delle limitate conoscenze geografiche dell'epoca o delle scelte artistiche e simboliche dell'artista<sup>51</sup>.

Per i marchesi, l'aspirazione a modellare Mantova sulla grandezza e il prestigio di Roma si basa su un'ideologia che mira a emulare il passato glorioso e ad affermare la continuità del proprio dominio con le antiche tradizioni. L'associazione con Roma, con la sua storia gloriosa e il suo patrimonio culturale, potrebbe servire a elevare il prestigio della corte mantovana e a consolidare il loro potere come eredi di una tradizione illustre, rafforzato anche dalla nomina cardinalizia di Francesco e, forse, come auspicio per un futuro papato per il cardinale committente.

Dall'altra parte, per Mantegna, l'ispirazione a prendere spunto dalla grandezza classica di Roma può essere vista come un'opportunità estetica per dimostrare la continuità tra il passato e il presente attraverso le opere d'arte come aveva già fatto nel 1455 nell'opera *'L'Orazione nell'orto'*<sup>52</sup>.

Sulla parete ovest, oltre alla veduta di Roma, si possono scorgere altri edifici e luoghi dell'epoca, ma identificarli non è sempre agevole, suscitando diverse interpretazioni. Nel primo settore dell'affresco, si individua una sorta di arco naturale, alcune interpretazioni lo associano al Ponte di Veja<sup>53</sup>, che incornicia la città di Tuscolo (fig. 4.16).

Inoltre, è possibile riconoscere altre città della periferia romana, come Tivoli, Palestrina e Palombara Sabina, grazie ad alcune caratteristiche presenti nell'affresco.

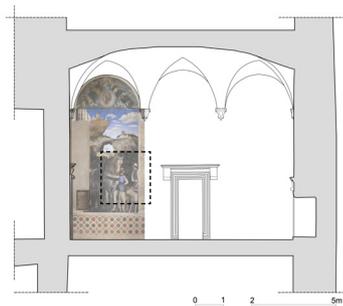
Questi paesaggi romani sottolineano la devozione dei Gonzaga alla Chiesa, e il fascino delle rovine classiche, idealizzate dall'Umanesimo, eleva culturalmente i marchesi. Inoltre, queste vedute architettoniche fornirebbero indicazioni cronologiche per datare l'evento: la fortezza in costruzione alla destra dell'arco roccioso è infatti la Rocca Pia di Tivoli, voluta da Pio II nell'agosto del 1461<sup>54</sup>, mentre più in alto si può intravedere l'acropoli di Palestrina [www.lombardiabeniculturali.it]. Sopra l'arco, è possibile riconoscere un castello che potrebbe corrispondere al castello Savelli Torlonia situato a Palombara Sabina [Borgia, 2018]. Tivoli<sup>55</sup> appare anche nella parte destra della parete, tramite un'interpretazione del Tempio di Ercole, affiancato da una statua colossale dell'eroe tebano<sup>56</sup>. Anche le cave di travertino<sup>57</sup> di Tivoli attrassero l'interesse di Mantegna, come dimostrato dall'immagine dei cavatori al centro, a destra dell'affresco. Infine, l'edificio presente nel settore centrale ha diverse interpretazioni, potrebbe trattarsi della torre di Babele o del Castel Sant'Angelo<sup>58</sup>.

Tutte queste rappresentazioni mostrano sproporzioni o mancanze, ma ciò è dovuto al fatto che Mantegna non aveva una visione diretta di questi luoghi, bensì si basò sulle descrizioni riportate nelle opere del geografo greco Strabone<sup>59</sup> e dei suoi contemporanei.

#### **4.2.2.3 I personaggi della parete ovest**

Non è stato chiarito a quale esatto episodio si riferisca l'affresco di questa parete e non tutti i personaggi ritratti sono stati riconosciuti con sicurezza. Tuttavia, l'intento celebrativo dell'intera scena è evidente. In effetti, l'opera di Mantegna testimonia in modo eloquente il ruolo sempre più rilevante che le famiglie signorili stavano assumendo nel contesto dell'arte del Quattrocento. Il mecenatismo divenne il canale preferito attraverso il quale le corti rinascimentali, in competizione tra loro, si sfidavano. Le grandi famiglie, sostenitrici dello sviluppo economico delle proprie città, desideravano rendere immortale il proprio casato e il proprio territorio, per questo commissionarono grandiose opere artistiche [Nifosi, 2022].

## CAPITOLO 4



### 4.2.2.4 Il primo settore della parete ovest

Il settore sulla sinistra è dominato dalla presenza del cavallo<sup>60</sup> di Ludovico II, decorato con simboli alchemici<sup>61</sup>, e dai cani<sup>62</sup> tenuti da quattro famigli, sottolineando la maestria di Mantegna nella rappresentazione degli animali. Infine appare una mano di un personaggio non identificabile a causa della mancanza di dettagli<sup>63</sup>. Verso Tuscolo viaggia poi la carovana dei Magi, scoperta solo nell'ultimo restauro poiché era una piccola porzione pittorica stesa a secco, che con il tempo si era ricoperta di sudiciume. Questa rappresentazione potrebbe essere stata inserita per simboleggiare la stagione invernale in cui avvenne l'incontro, sottolineata anche dall'inserimento di piante d'arancio in fiore, che avvalorano la tesi che si tratti dell'incontro avvenuto il 1° gennaio 1462 (fig. 4.17) [Rizzo, 2013].

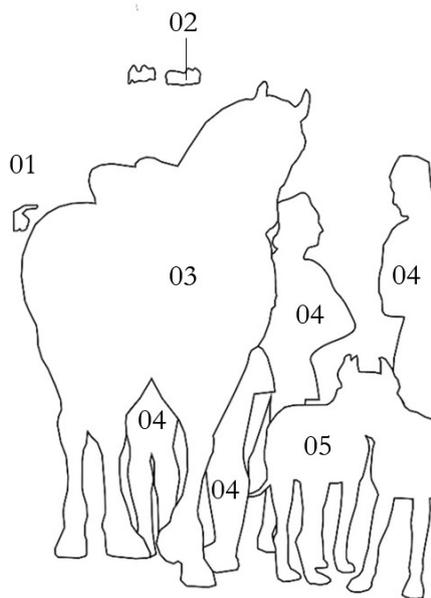
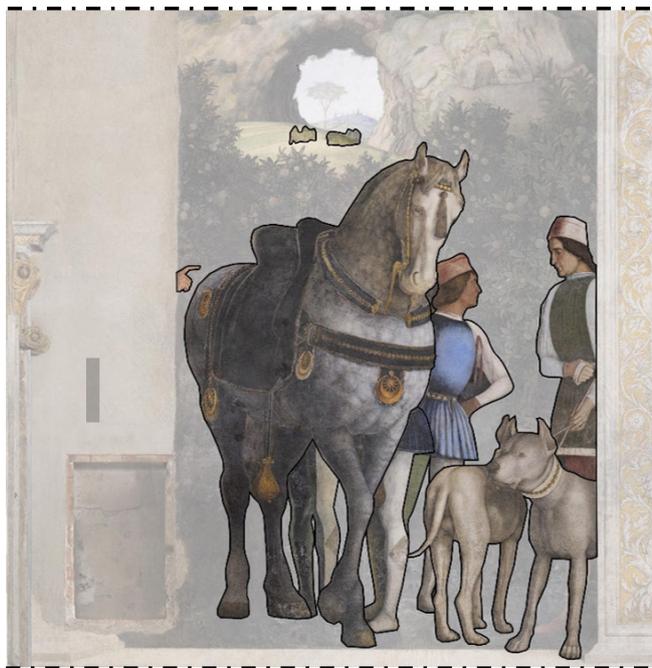


Fig. 4.17 - I personaggi del primo settore della parete ovest:

01) Mano non identificabile; 02) Re magi; 03) Cavallo di Ludovico II; 04) Famigli; 05) Cani da caccia

#### 4.2.2.5 Il secondo settore della parete ovest

Nel riquadro centrale, l'architrave della porta, posizionata in modo sfalsato rispetto al centro della parete, funge anche da supporto per gli angeli con ali di farfalla e altre creature che sostengono una grande targa di finto bronzo. Su questa targa è incisa la dedica con cui Mantegna rende omaggio della sua opera a Ludovico Gonzaga e Barbara di Brandeburgo. Questa dedica rappresenta una novità insolita per l'epoca: i marchesi non sono presentati come semplici committenti dell'opera, ma è Mantegna stesso che si permette di dedicarla a loro, instaurando un rapporto quasi paritario [Marini, Marinelli, 2006].

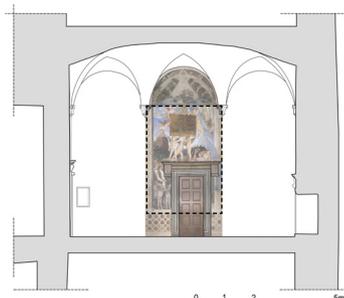
Vi si legge: "ILL. LODOVICO II M.M. / PRINCIPI OPTIMO AC / FIDE INVICTISSIMO / ET ILL. BARBARAE EJUS / CONIUGI MVLIERVM GLOR. / INCOMPARABILI / SVVS ANDREAS MANTINIA / PATAVVS OPVS HOC TENVE / AD EORV DECVS ABSOLVIT / ANNO MCCCCLXXIIII". Ovvero "All'illustrissimo Lodovico, secondo marchese di Mantova, principe ottimo e di fede insuperabile, e all'illustrissima sua moglie Barbara, incomparabile gloria delle donne, il loro Andrea Mantegna, patavino, questa piccola opera esegui, a loro onore, nell'anno 1474." Oltre alle parole di adulazione e alla firma dell'artista, che si dichiara 'padovano', vi si legge la data 1474, generalmente indicata come quella della fine dei lavori.

I due personaggi raffigurati nello spazio angusto tra il pilastro e la mensola dell'architrave della porta, potrebbero essere i reali Cristiano I di Danimarca<sup>64</sup> e Federico III d'Asburgo<sup>65</sup>, due figure che rappresentano con orgoglio i legami di parentela regale della famiglia Gonzaga (fig. 4.18).

#### 4.2.2.6 Il terzo settore della parete ovest

Nella scena dell'Incontro, che si sviluppa nel settore destro, i personaggi sono compostamente ritratti, quasi in posa, e la loro posizione di profilo esclude una caratterizzazione storica dettagliata della scena<sup>66</sup>. Il marchese Ludovico, raffigurato di profilo sulla sinistra<sup>67</sup>, è forse affiancato da Ugolotto Gonzaga<sup>68</sup>, oppure dall'omonimo Ludovico<sup>69</sup>, figlio del marchese.

## CAPITOLO 4



Il marchese Ludovico indossa una corta sopravveste militare grigia sopra una giubba rinforzata ed è armato di una daga e una spada tempestata di gemme; solleva la mano destra mentre si rivolge al cardinale Francesco, suo figlio. Sotto di loro si trovano i figli di Federico I Gonzaga, Francesco<sup>70</sup> e Sigismondo<sup>71</sup>, mentre il padre Federico<sup>72</sup> è posizionato all'estrema destra e le pieghe abbondanti del suo abito sono un stratagemma per nascondere la cifosi.

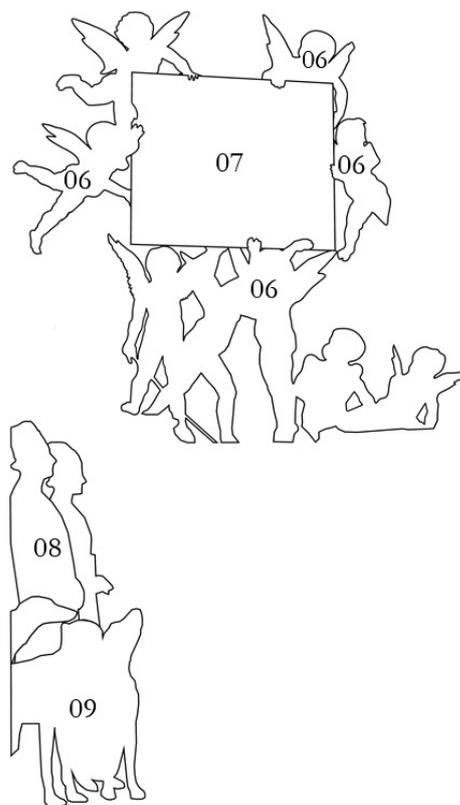


Fig. 4.18 I personaggi del secondo settore della parete ovest:

12) Angeli con ali di farfalla e altri animali; 13) Targa dedicatoria in finto bronzo; 14) Cristiano I di Danimarca e Federico III d'Asburgo; 15) Cani da caccia

Se l'evento rappresentato fosse datato intorno al 1472, il personaggio vestito di nero che osserva Francesco potrebbe essere identificato come Galeotto Pico della Mirandola<sup>73</sup>, che accompagnò Ludovico Gonzaga a Bologna in quell'anno. In questa interpretazione, il ragazzo al centro potrebbe anche essere riconosciuto come Giovanni Pico<sup>74</sup>. L'uomo di profilo alla sua destra potrebbe essere identificato come Poliziano<sup>75</sup>, poeta e studioso, che fu a lungo committente del cardinale Francesco Gonzaga [Pasetti, Pinotti, 1999]. Un'altra interpretazione, invece, suggerisce che Federico sia in colloquio con due personaggi: uno di fronte e l'altro in secondo piano, identificati come Cristiano I di Danimarca e Federico III d'Asburgo<sup>76</sup>. Il ragazzo al centro, in questa visione, potrebbe essere l'ultimo figlio maschio del marchese, il protonotario Ludovico<sup>77</sup>, che tiene per mano il

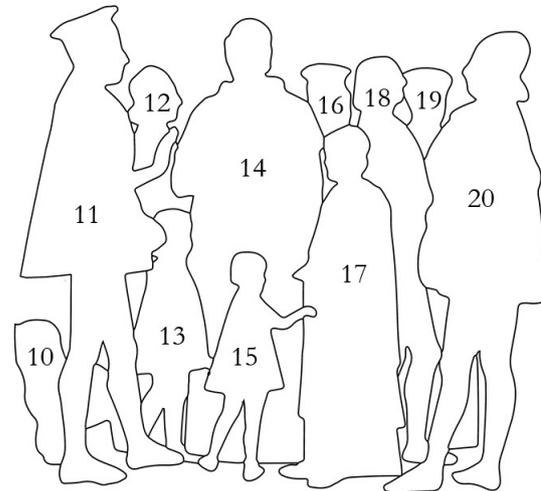


Fig. 4.19 - I personaggi del terzo settore della parete ovest:

10) Cane spinone; 11) Il marchese Ludovico II; 12) Ugolotto Gonzaga oppure l'omonimo Ludovico figlio del marchese; 13) Francesco II Gonzaga; 14) Cardinale Francesco Gonzaga; 15) Sigismondo futuro cardinale; 16) Galeotto Pico della Mirandola; 17) Giovanni Pico della Mirandola oppure il protonotario Ludovico; 18) Cristiano I di Danimarca; 19) Federico III d'Asburgo; 20) Federico I Gonzaga



Fig. 4.20 - Tendaggio e dettaglio dell'autoritratto di Mantegna sul secondo settore della parete ovest.

fratello Francesco, già cardinale, e il nipote Sigismondo<sup>78</sup>, futuro cardinale, simboleggiando il ramo della famiglia destinato alla carriera ecclesiastica. In entrambe le interpretazioni, appare un cane<sup>79</sup>, simbolo di fedeltà (fig. 4.19).

#### 4.2.2.7 Dettagli artistici della parete ovest

Nel settore centrale, un elemento interessante è l'aggiunta di profondità ottenuta mediante il movimento della tenda tirata oltre l'architrave, quasi come un esercizio di panneggio, dove si mostra il lato posteriore di colore azzurro (mentre la tenda nel terzo riquadro ha un retro grigio). Vasari, nel descrivere la *Camera Picta*, scrisse: “*Et ancora ch'egli avesse il modo del panneggiar suo crudetto e sottile, e la maniera alquanto secca, e' vi sono però cose con molto artificio e con molta bontà da lui lavorate e ben condotte*” [Vasari, 1550]. Un altro elemento di particolare interesse si trova sul pilastro tra il secondo ed il terzo settore. Qui è nascosto tra le *grisaille* un autoritratto di Mantegna sotto forma di mascherone. Questo autoritratto segreto costituisce un raffinato modo per l'artista di inserire la propria presenza nell'opera d'arte (fig. 4.20).

#### 4.2.3 La parete sud

Le pareti sud e est sono quelle meno ricche di particolari poiché viene rappresentato il tendaggio abbassato che ostruisce completamente la visuale verso l'esterno dell'ideale loggiato (fig. 4.21). Nella parete sud è situato un armadio identificabile come una cassaforte, presenta anche una porta sopra la cui architrave è dipinto uno stemma Gonzaga in stato di degrado, mentre le lunette superiori sono pressoché illeggibili. Nella prima lunetta della parete sud, nonostante il suo stato di conservazione non ottimale, è riconoscibile l'impresa dello scoglio, attribuita a Francesco I Gonzaga, Capitano del Popolo, simboleggiante fermezza d'animo e purezza infatti questo simbolo è spesso associato al motto 'AMVMOC', che significa 'senza macchia'.

Nella terza lunetta, è rappresentata l'impresa del Cane alano bianco con il guinzaglio sciolto, seduto su un prato verde su sfondo rosso, seguendo i colori araldici della famiglia Gonzaga, ispirati alle virtù teologali: Fede, Speranza, Carità. Quest'immagine è emblematica della *Fides Catholica* e della fedeltà nel servizio del signore e primo marchese di Mantova, Gianfrancesco Gonzaga. Sebbene gli esempi precedenti di questo emblema non includessero un motto, questa impresa doveva essere accompagnata dalla frase in francese antico '*Si l'aire ne me faul*' che si traduce come 'Non seguio l'aria che tira,' spiegando il significato del guinzaglio abbandonato e dell'animale che non fugge (fig. 4.22) [Amadei, 1955; Malacarne, 1992].



Fig. 4.21 - Parete interna sud della Camera degli Sposi.

## CAPITOLO 4

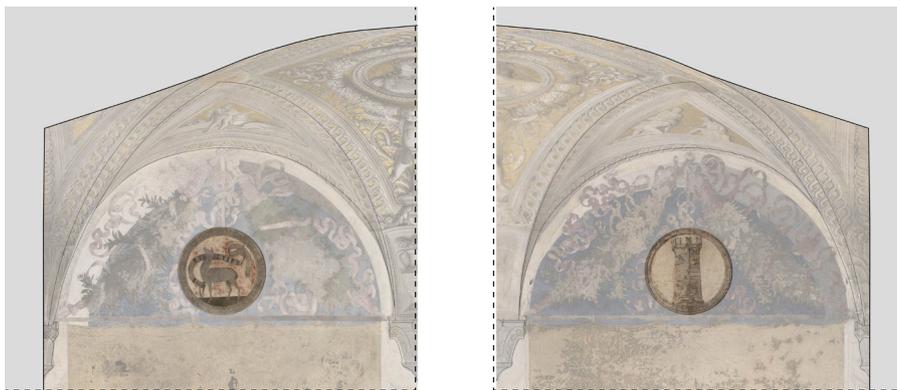
Fig. 4.22 - Identificazione degli emblemi nella prima e terza lunetta della parete sud.



### 4.2.4 La parete est

Il drappo sulla parete est è meno conservato, ma le lunette superiori presentano colori più vivaci. Anche in questo caso, sono riconoscibili due imprese della famiglia. Nella prima lunetta, si trova un simbolo di pace rappresentato da una cervetta che guarda il sole, accompagnata dal motto *'bider kraft'* o *'wider kraft'*, che significa 'contro la Forza', inteso come opposizione alla forza bruta [Sarzi Amadè, 2019]. Nell'ultima lunetta è rappresentata l'Impresa della torre, che probabilmente simboleggia la fermezza e la resistenza alle avversità (figg. 4.23, 4.24) [Negrini, 1974].

Fig. 4.23 - Identificazione degli emblemi nella prima e terza lunetta della parete est.



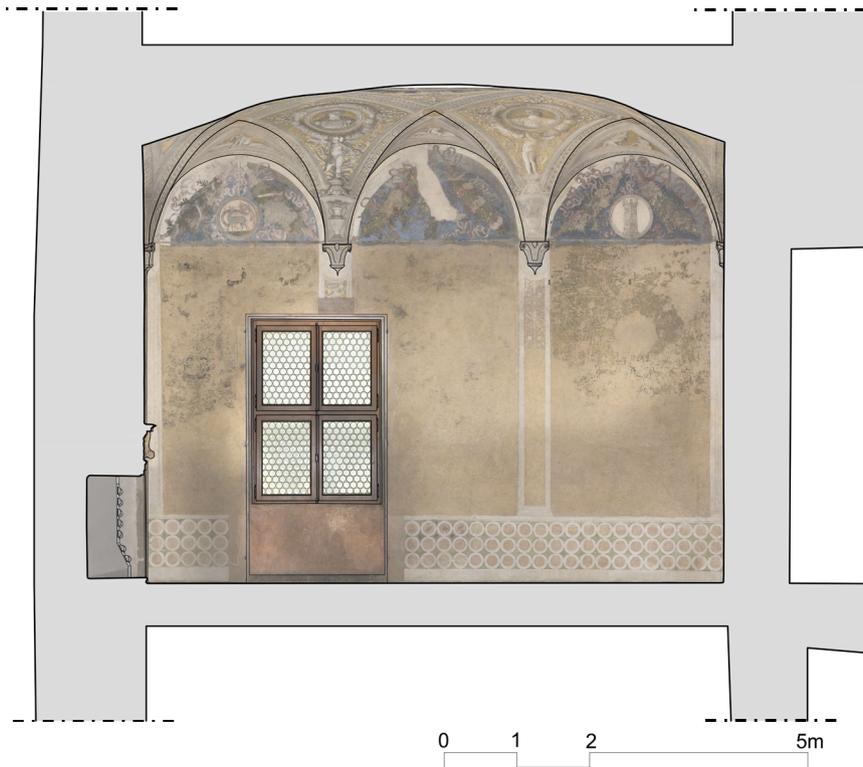


Fig. 4.24 - Parete interna est della Camera degli Sposi.

## Note

1 La Cappella Ovetari, eretta da Antonio Ovetari e fatta affrescare da Giovanni d'Alemagna, Antonio Vivarini, Niccolò Pizzolo, Ansuino da Forlì e al giovane Andrea Mantegna, all'epoca diciassettenne e allievo dello Squarcione. Il bombardamento dell'11 marzo 1944 polverizzò la Cappella Ovetari e del Mantegna oggi rimangono solo i due riquadri inferiori della parete destra della Cappella: l'Assunta nell'abside e il Martirio di San Cristoforo, che staccati verso la fine dell'800, in quanto già danneggiati, si salvarono fortunatamente dal bombardamento.

2 Che doveva ricordare il celebre oculo del Pantheon, il monumento antico per eccellenza celebrato dagli umanisti.

## CAPITOLO 4

3 Particolare tipo di scorcio prospettico, nel quale la figura è guardata dal basso in alto e non in una prospettiva orizzontale; è usato soprattutto nella decorazione di soffitti, cupole, absidi. Melozzo da Forlì fu il primo a praticare con grande successo “l’arte del sotto in su, la più difficile e la più rigorosa” [Lanzi, 1834], ottenendo quella particolare prospettiva che viene perciò detta melozziana.

4 Una dama di corte, una serva di colore, un gruppo di domestiche, una dozzina di putti, un pavone e un vaso. Il pavone forse è un riferimento agli esotici animali presenti alla corte oppure simbolo della cristianità: le sue penne che mutano ogni anno rappresentano il ciclo della liturgia, mentre la sua carne che si decompone con lentezza rappresenta vita eterna e la resurrezione [Malaguti, 2018].

5 L’identità delle donne che si affacciano dalla balaustra rimane avvolta nel mistero, ma si presume che siano personaggi legati alla corte gonzaghesca. Un’ipotesi suggerisce che una di loro possa essere una giovane sposa, poiché la sua acconciatura richiama quello della marchesa Barbara, e un’altra sembra aiutarla con un pettinino in mano. L’atmosfera nella scena è vivace e giocosa, con le donne ritratte in atteggiamenti diversi e sorrisi compiacenti, come se stessero architettando uno scherzo. Infatti il pesante vaso di agrumi è posizionato su un bastone e le ragazze intorno sembrano sul punto di farlo cadere nella stanza, creando una situazione divertente e scherzosa.

6 I putti giocosi rappresentati nella volta hanno significati simbolici legati al governo e al potere. Ognuno di loro possiede un attributo che li associa come una canna di bambù, una mela e una coroncina di alloro che richiamano rispettivamente lo scettro, il globo e la corona, simboli di autorità e regalità. I putti alati con ali di farfalla, d’altra parte, simboleggiano l’immortalità di Ludovico II e Barbara nella memoria degli uomini, mentre gli altri putti alati alludono all’immortalità del potere legittimo della dinastia gonzaghesca.

7 Una curiosità risiede nella presenza di un profilo umano nascosto nella nuvola centrale vicino al vaso sospeso nell’oculo. Si ritiene che questo possa essere un autoritratto dell’artista, abilmente mascherato e quasi sospeso nell’etere, come una firma consegnata alla fugacità della nuvola stessa. Questo particolare enigmatico aggiunge un tocco personale all’opera e invita lo spettatore a cercare e scoprire i segreti celati nella complessità della pittura [Pauli, 2001].

8 Gli imperatori sono ritratti in senso antiorario a partire da Giulio Cesare nell’angolo nord-ovest, con ciascun nome scritto all’interno del medaglione (ove presente), e le loro pose sono varie per evitare di apparire ripetitive. Gli imperatori raffigurati sono i seguenti: Giulio Cesare, Ottaviano Augusto, Tiberio, Caligola, Claudio, Nerone, Galba e Otone.

9 La tecnica pittorica a *'grisaille'*, derivante dal termine francese *'gris'* (grigio), si caratterizza per l'utilizzo esclusivo di tonalità di grigio nella creazione di opere d'arte. Questo approccio monocromatico permette agli artisti di esplorare la profondità, la forma e il contrasto senza l'impiego di colori vivaci. Originaria del Rinascimento, la *'grisaille'* è divenuta un mezzo espressivo distintivo, sottolineando la maestria tecnica attraverso l'arte sottile della sfumatura grigia.

10 Anche nelle decorazioni della volta si ritrovano riferimenti al mondo classico ma rappresentati con un gusto antiquario. Lo stile di Mantegna venne per questo definito 'classicismo archeologico'. Fu infatti il primo grande artista della sua epoca a rievocare immagini del mondo romano antico [Ado, 2018].

11 Queste virtù sono: il coraggio (mito di Orfeo), l'intelligenza (mito di Arione di Metimna) e la forza (mito delle dodici fatiche di Ercole). I dodici pennacchi rappresentano: Orfeo che incanta le forze della natura, Orfeo che incanta Cerbero e una Furia. Morte di Orfeo (Orfeo straziato dalle Baccanti), Arione che incanta il delfino, Arione portato in salvo dal delfino, Periandro che condanna i cattivi marinai, Ercole scocca una freccia verso il centauro Nesso, Nesso e Deianira, Ercole che lotta con il leone Nemeo, Ercole che uccide l'Idra, Ercole e Anteo, Ercole che uccide Cerbero.

12 Enfatizzati da motivi geometrici in grigio e oro e con decorazioni floreali nei punti di raccordo.

13 La sua formazione nella bottega di Francesco Squarcione, un maestro esperto di costruzione prospettica, influenzò il suo gusto per l'archeologia e la prospettiva. L'incontro con Donatello a Padova fu altrettanto fondamentale, poiché da lui apprese tecniche avanzate di applicazione della prospettiva, che avrebbero contribuito a trasformare il suo stile artistico in modo innovativo e distintivo [Moschin, 2022].

14 Creata dall'intersezione di 12 unghie con la volta a padiglione (Cfr. Cap. 5).

15 Il broccato è un tessuto lussuoso, spesso di seta, caratterizzato da motivi decorativi in rilievo, ottenuti tramite fili metallici o di colore contrastante, che gli conferisce un aspetto ricco e ornato. È ampiamente utilizzato per la realizzazione di tessuti pregiati destinati a abiti e arredamenti eleganti.

16 Una curiosità sta nello sguancio della finestra dove si trova un finto paramento marmoreo, solcato da venature tra le quali è celata la data '16 giugno 1465', dipinta come un finto graffito e considerata come data di inizio dei lavori (Cfr. Cap. 1).

## CAPITOLO 4

17 Secondo la tradizione infatti la tortora, fedele nella vita e anche oltre la morte, dopo la scomparsa del compagno si posa solo su rami secchi e si abbevera soltanto nell'acqua torbida per non vedere la propria immagine riflessa, che le farebbe inevitabilmente ricordare il compagno scomparso.

18 Bibliografia di riferimento:

- Bellonci, M. (1947). *Segreti dei Gonzaga*. Verona.
- Pasetti, G., Pinotti, G. (1999). *La camera in luce. La Camera degli Sposi di Andrea Mantegna in Palazzo Ducale a Mantova*. In [giovannipasetti.it](http://giovannipasetti.it)
- Signorini, R. (1985). *Opus hoc tenue. La Camera dipinta di Andrea Mantegna*. Lettura storica, iconografica, iconologica, Parma, Artegrafica Silva.

19 Ludovico II Gonzaga, nato nel 1412, fu un nobile italiano del Rinascimento e membro della celebre famiglia Gonzaga. Salì al trono come marchese di Mantova nel 1444, succedendo a suo padre Gianfrancesco I. Era detto il turco perché favorevole alla crociata degli ottomani per liberare Costantinopoli, capitale dell'impero romano d'oriente. Durante il suo regno, Ludovico II fu un appassionato mecenate delle arti e delle lettere, promuovendo una vivace corte culturale a Mantova. Ludovico II Gonzaga governò con saggezza e competenza, cercando di consolidare il potere dei Gonzaga e migliorando la prosperità della città. Il suo impegno per l'arte e la cultura, unito alle sue abilità diplomatiche, gli guadagnò il rispetto e l'ammirazione dei suoi contemporanei, facendone un'importante figura nel panorama politico e culturale del Rinascimento italiano. Morì per la peste nel 1478 [Nosari, Canova, 2019].

20 Che potrebbe essere identificato come il suo segretario Marsilio Andreasi o Raimondo Lupi di Soragna, oppure potrebbe essere il fratello del marchese, Alessandro [Andreasi, 2021].

21 Gianfrancesco Gonzaga (1446 - 1496) è stato un condottiero italiano. Figlio del marchese di Mantova Ludovico II Gonzaga e di Barbara di Brandeburgo e fu il primo conte di Sabbioneta, dal 1479 al 1496, dando origine al ramo dei 'Gonzaga di Sabbioneta' [Litta, 1835].

22 Ludovico Gonzaga (1460 - 1511) è stato un vescovo cattolico italiano, figlio di Ludovico II Gonzaga e di Barbara di Brandeburgo. Fu avviato giovanissimo alla carriera ecclesiastica e nel 1470 divenne protonotario apostolico. Nel 1471 fu nominato abate dell'abbazia di San Tommaso di Acquanegra [Brunelli, 2001].

23 Vittorino de' Rambaldoni, meglio conosciuto come Vittorino da Feltre (1373 o 1378 - 1446), fu un celebre umanista e pedagogo italiano del Rinascimento. Fu un rinomato precettore e insegnante presso la corte dei Gonzaga a Mantova. La sua filosofia educativa si basava sull'approccio umanistico, enfatizzando la formazione integrale e l'armonioso sviluppo delle abilità intellettuali e fisiche degli studenti [Signorini, 2015].

24 Barbara di Hohenzollern (1422 - 1481) fu una nobile del Brandeburgo, nipote dell'imperatore Sigismondo di Lussemburgo. Nel 1433, sposò Ludovico III Gonzaga, marchese di Mantova, diventando così marchesa di Mantova. Barbara svolse un ruolo di rilievo nella corte dei Gonzaga, mostrando interesse per l'arte e la cultura umanistica. Stimatissima dal marito, che le affidò la reggenza del Marchesato durante le sue numerose assenze, Barbara partecipò alla gestione del governo e curò personalmente l'educazione dei figli. Ella diede particolare risalto alle relazioni tra Mantova ed il Sacro Romano Impero, facendo sposare tre dei suoi figli e figlie con principi e principesse tedesche [Severidt, 2002].

25 Da notare che il suo seggio è più basso di quello del marito, per marcare la sua minore importanza nella gerarchia familiare.

26 Rodolfo Gonzaga (1452 - 1495). Signore di Castiglione delle Stiviere, Castel Goffredo, Solferino, Luzzara e Poviglio, nel 1463 venne armato cavaliere dall'imperatore Federico III d'Asburgo. Come molti altri figli cadetti del tempo, condusse la sua vita come condottiero di ventura agli ordini dell'uno o dell'altro signore [Malacarne, 2010].

27 Barbara Gonzaga (1455 - 1503) fu una nobile mantovana e duchessa consorte del Württemberg. Considerata la bella della famiglia perché l'unica della famiglia senza la cifosi.

28 Leon Battista Alberti, nato nel 1404, fu un poliedrico genio del Rinascimento italiano. Architetto, scrittore, pittore e umanista, Alberti si distinse per il suo contributo eclettico e innovativo in vari campi dell'arte e della cultura. Tra le sue opere più famose, troviamo il trattato *'De re aedificatoria'* sull'architettura, che influenzò profondamente l'arte architettonica del suo tempo. Alberti è ricordato come una delle menti più brillanti del Rinascimento, il cui lascito ha avuto un impatto duraturo sulle arti e sul pensiero umanistico [Panza, 1994].

29 Paola Malatesta (1393-1449), nota anche come 'Paola di Mantova', fu una nobile italiana e marchesa consorte di Mantova dal 1409 al 1444. Portò ai Gonzaga la

## CAPITOLO 4

tara genetica della gobba ed ebbe un ruolo di rilievo nella corte gonzaghesca, dimostrandosi donna acuta di intelletto. Dopo la morte del marito nel 1444, seguendo la richiesta di Bernardino da Siena, fondò la chiesa e il monastero di Santa Paola a Mantova.

30 Probabilmente svolge la funzione del 'festaiuolo', nei drammi sacri rappresentati durante il medioevo o rinascimento vi era spesso una figura che restava sulla scena durante lo svolgimento dello spettacolo e fungeva da tramite tra il pubblico e le vicende rappresentate spiegando cosa stesse accadendo e attirando l'attenzione degli spettatori su qualche elemento significativo. Queste figure vengono spesso utilizzate anche dai pittori e sono consigliate anche nel trattato di Leon battista Alberti. Lucia che guarda verso l'osservatore ha così il compito di attirare la nostra attenzione e concentrarla sulla scena rappresentata.

31 Il famiglio (dal latino *famulus*) era, nel Medioevo feudale, una persona compresa nel seguito del feudatario, che veniva 'adottata' nella sua famiglia e che viveva presso la sua corte. Dei famigli potevano far parte cugini trasferitisi, quindi familiari effettivi, oppure dei cavalieri o comunque persone che si erano particolarmente distinte nel servire il feudatario. Far parte della corte del feudatario era un salto di classe sociale notevole, che permetteva l'accesso ai circoli superiori. Di norma poche persone venivano aggiunte alla famiglia in questo modo, perché il legame che veniva a crearsi era di vicendevole responsabilità.

32 Si riconoscono come cortigiani di casa Gonzaga dal colore araldico delle loro braghe (rosso e bianco).

33 Da notare che gli ultimi 'entrano' nella scena discostando la tenda, dietro la quale si intravede un cortile assolato con muratori all'opera [Camesasca, 2007].

34 Figlio di Margherita sorella di Ludovico II e destinato ad essere il signore di Ferrara alla morte di Lionello. Ma lo zio Borso d'Este gli sottrasse il potere e lo cacciò. Gli Este si consideravano discendenti dei romani ed ecco che Nicolò impugna una daga [Nosari, Canova, 2003].

35 Cieca da un occhio, andata in sposa nel 1451 al condottiero Francesco Secco [Filippini, 2015].

36 Alessandro Sforza (1409 -1473) era figlio illegittimo di Muzio Attendolo Sforza e di Lucia Terzani da Torgiano ed è stato un condottiero italiano, signore di Castelnuovo, Gradara e Pesaro [Rossetti, 2018].

37 Carlo Sforza, Conte di Magenta (1461 - 1483), è stato un nobiluomo italiano del Rinascimento famoso per i suoi eccessi.

38 Galeazzo Maria Sforza, nato nel 1444 e membro della famiglia Sforza, è stato un influente personaggio nel Rinascimento italiano. Nel 1466 divenne duca di Milano, caratterizzando il suo regno con un governo autoritario e spietato. Nonostante la sua crudeltà, fu un mecenate culturale e artistico, contribuendo a trasformare Milano in un centro culturale rinomato. La sua politica autoritaria tuttavia attirò nemici e cospirazioni, culminando nel suo assassinio nel 1476 per mano dei congiunti della famiglia dei Visconti [Vaglianti, 1998].

39 Provvisto del cappello da signore, poiché nel 1474 governava Pesaro.

40 Secondo e Tristano Sforza furono due membri della famiglia nobile Sforza. Essi erano figli di Francesco I Sforza, duca di Milano, e di Bianca Maria Visconti. Entrambi ebbero una carriera politica significativa, assumendo ruoli di rilievo nella gestione del governo dello Stato e nelle alleanze tra le varie dinastie italiane.

41 Ludovico Maria Sforza detto il Moro (1452 -1508) fu un nobile e condottiero italiano del Rinascimento, divenne duca di Milano nel 1494. Ludovico Sforza era noto per il suo interesse verso le arti e per aver attirato importanti artisti, come Leonardo da Vinci, alla sua corte [Dina, 1886].

42 Sforza Maria Sforza, duca di Bari (1451 - 1479), era figlio del duca di Milano Francesco Sforza e Bianca Maria Visconti.

43 Bianca Maria Visconti (1425-1468), figura rinascimentale e membro della potente famiglia Visconti di Milano. Sposò Francesco I Sforza, divenuto Duca di Milano, rafforzando il dominio della dinastia Sforza sulla città. Dotata di intelligenza e abilità diplomatiche, fu una fervente mecenate delle arti e della cultura, contribuendo allo sviluppo del Rinascimento milanese [Santoro, 1999].

44 Francesco Sforza (1401-1466), condottiero e politico italiano, fu il fondatore della dinastia Sforza a Milano. Dopo aver sposato Bianca Maria Visconti, divenne Duca di Milano, consolidando il potere della sua famiglia sulla città. Abile stratega militare, Francesco riuscì a conquistare diverse città italiane, ampliando il suo dominio [Nicodemi, 1951].

45 Federico I Gonzaga (1441-1484) Nobile italiano del Rinascimento e primo marchese di Mantova della dinastia Gonzaga. Rinomato per il suo mecenatismo e il suo amore per le arti, Federico I Gonzaga fu un mecenate di artisti e letterati dell'epoca, contribuendo a rendere Mantova un importante centro culturale [Braglia, 2002].

## CAPITOLO 4

46 Francesco Gonzaga (1444-1483) figlio di Ludovico II Gonzaga, marchese di Mantova, e di sua moglie Barbara di Brandeburgo. Dopo aver compiuti gli studi a Padova, passò all'Università di Pisa ove si laureò per poi essere nominato dal febbraio del 1454 alla carica di protonotario apostolico. Procuratore della chiesa di Mantova, durante gli anni giovanili condusse una vita ampiamente laicale malgrado avesse ormai intrapreso chiaramente la carriera ecclesiastica [Salvarani, 2014].

47 La commenda designava un beneficio ecclesiastico affidato a un secolare usufruttuario che la gestiva e ne godeva la rendita. Da ciò si deduce che la rendita fosse connessa a un grado ecclesiastico o a un grado cavalleresco assimilato.

48 La basilica concattedrale di Sant'Andrea è la più grande chiesa di Mantova. Opera di Leon Battista Alberti nello sviluppo dell'architettura rinascimentale, venne completata molti anni dopo la morte dell'architetto, con modi non sempre conformi ai progetti originali.

49 Questa antica impresa potrebbe rappresentare un logoro, lo strumento utilizzato dai falconieri per addestrare i rapaci alla caccia.

50 *'De pictura'* di Leon Battista Alberti è un'opera rinascimentale fondamentale sull'arte della pittura. Scritta nel XV secolo definisce principi prospettici e teorie artistiche. Il testo esalta la pittura come una disciplina intellettuale e accademica, sottolineando l'importanza di una preparazione culturale e matematica per gli artisti. *'De pictura'* influenzò notevolmente l'arte rinascimentale e il modo in cui gli artisti interpretavano la realtà visiva.

51 Inoltre non la poteva conoscere direttamente perché Mantegna visitò Roma solo nel 1488 su richiesta di papa Innocenzo VIII, il quale lo incaricò di affrescare la cappella del nuovo edificio del Belvedere in Vaticano.

52 Tempera su tavola (63 x 80 cm), di Andrea Mantegna, databile al 1455 circa e conservato nella National Gallery di Londra.

53 Il Ponte di Veja è un'antica formazione geologica situata nella regione della Lessinia, in provincia di Verona. Si tratta di un arco naturale di origine carsica, formato da una grande grotta sotterranea il cui tetto è crollato, creando un ponte naturale. Fonte accreditata anche dal fatto che Mantegna si era recato a Verona nel 1456 per stipulare il contratto di commissione della Pala di San Zeno con l'abate Gregorio Correr e con l'occasione potrebbe aver visitato la Lessinia.

54 La costruzione della rocca nel 1461 metteva fine ad un periodo caratterizzato da forti conflittualità di vario genere per la città di Tivoli; lacerata dai contrasti tra partito guelfo e partito ghibellino, nonché dalle lotte intestine tra i discendenti della casa Colonna e della casa Orsini, la città si trovò costretta a metà del XV secolo a sopire le sue secolari aspirazioni d'indipendenza comunale e ad assoggettarsi infine al potere papale [Pierattini, 1982].

55 “A Tiburi sono un tempio di Ercole, ed una cataratta formata dall’Anio, fiume navigabile che da una grande altezza precipita giù in una valle profonda e boscosa vicino alla detta città” [Strabone, 7 a.C.].

56 Per indicare il santuario tiburtino Mantegna ne ha rappresentato la divinità dedicataria collocando in evidenza, a destra dell’edificio, il colosso di Ercole, con sulle spalle la pelle del leone nemeo, sopra un basamento cilindrico.

57 La rarità del marmo nella corte dei Gonzaga spinse l’artista a produrre delle grisaglie negli ultimi anni della sua carriera, con cui diede l’impressione di bassorilievi marmorei.

58 Il Mausoleo di Adriano, conosciuto come una costruzione rotonda che s’innalza su una serie di basamenti concentrici poggianti su un grosso cubo su cui si apre un portale-arco di trionfo [Marini, Marinelli, 2006].

59 Strabone è stato un importante geografo e storico greco del I secolo a.C. La sua opera principale, ‘Geografia’, è un’enciclopedia geografica in diciassette libri, che descrive dettagliatamente paesi e regioni conosciute dell’antichità. Grazie ai suoi viaggi e alla ricerca accurata, le descrizioni di Strabone hanno contribuito a preservare la conoscenza geografica e storica del mondo antico. La sua opera è stata fondamentale per lo sviluppo della geografia come disciplina scientifica e ha avuto un’influenza duratura su generazioni di studiosi e cartografi.

60 I Gonzaga furono da sempre appassionati di caccia e per questo prediligevano tra gli animali i cavalli, i falconi e i cani. Li troviamo rappresentati in molti affreschi e in numerosi dipinti

61 La rappresentazione del Sole e della Luna simboleggia l’unione degli opposti e il percorso verso la trasmutazione spirituale e la conoscenza segreta.

62 Cane corso e alano. Segno di ricchezza sono pronti all’inseguimento di qualcosa o qualcuno in difesa del marchese di Mantova. Una curiosità è quella che vede due cani

## CAPITOLO 4

appoggiare la zampa sopra il finto zoccolo, aumentando ancora di più la sensazione di tridimensionalità data dalla tecnica della prospettiva applicata da Mantegna [Cecchin, 2021].

63 Nello scomparto sinistro, manca una lunga fascia laterale, che era stata coperta da una ridipintura settecentesca. I restauri hanno confermato la completa perdita delle pitture.

64 Cristiano I di Danimarca (1426 -1481) è stato un monarca danese, re dell'Unione di Danimarca, Norvegia e Svezia. In visita alla città di Mantova, insignì nel 1474 il marchese Ludovico Gonzaga dell'onorificenza dell'Ordine dell'Elefante, un antico e prestigioso ordine cavalleresco danese [Malacarne, 1992].

65 Federico III d'Asburgo (1415 -1493) è stato Re dei Romani, eletto quale successore di Alberto II nel 1440. Una testimonianza del legame che c'era tra Ludovico Gonzaga e l'imperatore è scritta nel dialogo '*De pedestribus certaminibus*' [Pallotti, 2022].

66 La scelta di rappresentare i Gonzaga di profilo, ispirandosi alla rigida postura dei modelli classici delle antiche medaglie, conferisce ai personaggi un'aura aulica e quasi sacrale.

67 È l'unico personaggio a comparire sia sulla parete ovest che sulla parete nord.

68 Figlio del fratello defunto Carlo [Filippini, 2015].

69 Ludovico Gonzaga (1460- 1511) è stato un vescovo cattolico italiano, figlio di Ludovico II Gonzaga, marchese di Mantova e di Barbara di Brandeburgo.

70 Francesco II Gonzaga (1466 -1519) Nobile italiano del Rinascimento e signore di Mantova. Secondo figlio di Ludovico III Gonzaga e Barbara di Brandeburgo, Francesco dimostrò abilità militari e diplomatiche fin da giovane, guadagnandosi il titolo di capitano generale della Repubblica di Venezia. Fu un governante energico e riformatore, impegnato a rafforzare il potere e l'influenza dei Gonzaga. Francesco sposò Isabella d'Este, celebre figura del Rinascimento e un'abile diplomatica e mecenate [Salvarani, 2014].

71 Sigismondo Gonzaga (1469 -1525) è stato un cardinale italiano. Terzogenito dei sei figli di Federico I Gonzaga, marchese di Mantova, e di Margherita di Baviera, venne ben presto avviato alla carriera ecclesiastica al punto da ricevere già nel 1479 la tonsura [Tamalio, 2001].

72 Federico I Gonzaga (1441-1484), nobile italiano della famiglia Gonzaga, fu il primo Duca di Mantova e uno dei grandi mecenati rinascimentali. Sotto il suo governo, Mantova divenne un centro culturale e artistico di rilievo, attirando artisti, poeti e intellettuali dell'epoca. La sua passione per le arti e la cultura contribuì alla creazione di una splendida corte rinascimentale [Murgia, 1972].

73 Galeotto I Pico (1442 - 1499) fu un nobile e condottiero italiano, signore di Mirandola e conte di Concordia dal 1467 alla morte. Figlio di Giovan Francesco Pico, signore della Mirandola, e di Giulia, zia del poeta Matteo Maria Boiardo [Marek, 2002].

74 Giovanni Pico dei conti della Mirandola e della Concordia, noto come Pico della Mirandola (1463 -1494) è stato un umanista e filosofo italiano.

75 Agnolo Ambrogini (1454 -1494), noto con lo pseudonimo di Poliziano, è stato uno dei più importanti letterati e umanisti italiani del periodo rinascimentale. Dimostrò fin da giovane un talento eccezionale per le lingue classiche e la letteratura. Sotto la protezione di Lorenzo de' Medici, influente sovrano e mecenate delle arti, Poliziano divenne professore presso l'Università di Firenze. Fu una figura di spicco negli ambienti intellettuali e culturali dell'epoca rinascimentale [Rosa, 2009].

76 Gli stessi personaggi anche indicati nel settore centrale della parete ovest.

77 Ludovico Gonzaga (1460-1511) è stato un vescovo cattolico italiano, figlio di Ludovico II Gonzaga, marchese di Mantova e di Barbara di Brandeburgo. Fu avviato giovanissimo alla carriera ecclesiastica e nel 1470 divenne protonotario apostolico [Brunelli, 2011].

78 Sigismondo Gonzaga (1469-1525) Terzogenito dei sei figli di Federico I Gonzaga venne ben presto avviato alla carriera ecclesiastica al punto da ricevere già nel 1479 la tonsura. Ebbe anche modo di distinguersi nella carriera militare comandando le truppe di suo fratello Francesco in assistenza dell'imperatore Massimiliano I d'Asburgo. [Salvarani, 2014].

79 Di questo cane conosciamo la razza ma non il nome: si tratta di uno spinone, probabilmente in una delle sue prime rappresentazioni in pittura. Anche questo doveva essere uno dei cani preferiti dal marchese visto che lo accompagna in un viaggio così importante come quello verso Milano.



## CAPITOLO 5

### Modelli 3D per la fruizione virtuale del Patrimonio Artistico

La modellazione 3D è un campo in rapida espansione che ha rivoluzionato l'industria della *computer grafica*, aprendo la strada alla creazione di ambienti virtuali sempre più realistici. Un modello virtuale di un bene può avere diversi valori (scientifici, educativi, storici) a seconda delle informazioni che fornisce, e può essere utilizzato anche per valutare l'evoluzione dell'ambiente rilevato sovrapponendo ricostruzioni 3D fatte in momenti diversi della vita dell'oggetto, utili a confrontare presente e passato, e valutare e quantificare i cambiamenti causati dal tempo.

Ogni bene racchiude una ricca storia sulla sua evoluzione, sui materiali, sulla costruzione e sulla composizione, pertanto, è essenziale creare documentazioni aggiornate per comprenderne appieno il significato. Attualmente, c'è una crescente tendenza a rendere queste informazioni accessibili, grazie alle tecnologie digitali che consentono la documentazione, il monitoraggio e lo studio del patrimonio culturale.

La digitalizzazione del manufatto consente infatti letture critiche e interpretative nello spazio virtuale del *computer*, permettendo di esplorare aspetti non immediatamente visibili ma significativi per la comprensione del bene. Nello specifico, le tecnologie *reality-based* consentono di acquisire dati dettagliati, riducendo l'impatto sull'opera e garantendone una conoscenza approfondita (Cfr. Appendice A).

Il modello 3D derivato da un rilievo digitale si propone dunque di rappresentare con precisione gli oggetti reali, analizzandone le caratteristiche geometriche, colorimetriche e morfologiche. La sua resa visiva realistica

facilita notevolmente la comunicazione e la comprensione delle informazioni tridimensionali e l'integrazione di diverse tecniche ottimizza il processo di acquisizione e modellazione.

In tale contesto, l'obiettivo principale è quello di creare un modello che rappresenti un oggetto il più fedelmente possibile in tutte le sue caratteristiche. Tra le soluzioni più utilizzate vi sono i modelli poligonali triangolari o quadrangolari, che si rivelano particolarmente adatti per descrivere in modo accurato le peculiarità del costruito storico e garantire un dettaglio ottimale delle superfici. La digitalizzazione, le piattaforme di dati e le animazioni ridefiniscono il rapporto tra l'opera d'arte e l'utente e le tecnologie virtuali offrono un'esperienza dinamica e coinvolgente, consentendo una gestione diversa del patrimonio culturale. Queste tecnologie permettono un dialogo più intimo con il bene, favorendo la creazione virtuale di scenari storici o di ipotesi ricostruttive.

Va detto che la creazione di una *mesh* dalla nuvola di punti non può limitarsi a un processo automatico e superficiale. Infatti, per ottimizzare l'esperienza virtuale, è necessario sottoporre il modello a operazioni di semplificazione avanzate, tra cui la decimazione, il filtraggio, la pulizia e lo *smoothing* per garantire una visualizzazione fluida e dettagliata (Cfr. Appendice C).

Le *mesh* realizzate a partire da una nuvola di punti fotogrammetrica o *laser scanner* possono costituire un ottimo punto di partenza e, a seconda della qualità del post processamento, possono essere classificate come *low poly* o *high poly*<sup>1</sup> in base al numero di poligoni che le compongono. Per ottenere il massimo beneficio da entrambe le tipologie di modelli, si può integrare l'aspetto realistico dei modelli *high poly* con la velocità ed efficienza dei modelli *low poly*, utilizzando mappe normali<sup>2</sup> per aggiungere dettagli alla versione semplificata senza comprometterne le prestazioni<sup>3</sup>. Questa strategia ottimizza le risorse computazionali, garantendo al contempo un miglioramento delle prestazioni di *rendering* in tempo reale e una rappresentazione accurata degli oggetti di maggiore interesse nella scena virtuale.

Infine la scelta di applicare *texture* fotogrammetriche ad alta risoluzione conferisce ulteriore dettaglio agli elementi<sup>4</sup>, evidenziando l'importanza di una gestione equilibrata tra la complessità dei modelli e le esigenze di resa

grafica all'interno del contesto della realtà virtuale. Questo approccio non solo restituisce un elevato grado di fedeltà visiva, ma aggiunge anche un livello di profondità e definizione che arricchisce notevolmente l'esperienza dell'utente.

### 5.1 Dati integrati per il modello della Camera degli Sposi

Per ottenere un modello digitale tridimensionale della Camera degli Sposi destinato alla comunicazione e alla fruizione virtuale nonché per colmare eventuali lacune e integrare in un unico modello i dati provenienti da scansioni *laser scanner* e fotogrammetria, è stata adottata la piattaforma *software RealityCapture*<sup>5</sup>. Questo *software* consente la gestione simultanea dei dati provenienti da entrambe le metodologie<sup>6</sup>, importando i dati delle scansioni precedentemente elaborati e registrati mediante il *software Leica Cyclone* (Cfr. Cap. 3) e i *frame* fotogrammetrici, e allineando automaticamente tutti i dati tra loro<sup>7</sup> (fig. 5.1).

L'unione tra i due sistemi di acquisizione porta a grandi miglioramenti: la ricostruzione tridimensionale del modello *mesh* in questo modo non si basa solo sui punti calcolati dalle fotografie, ma basa principalmente la sua morfologia sui punti *laser scanner*, geometricamente più affidabili, e integra i dati mancanti e la *texture* con i dati provenienti dalla fotogrammetria.

La corretta sovrapposizione delle due modalità di acquisizione, coadiuvata da punti di controllo topografici, ha consentito la realizzazione di un modello completo, strutturato e ad alta risoluzione della Camera degli Sposi (fig. 5.2). Il modello risultante, esportato in formato *.obj*, presentava un numero di facce pari a 341.421.549 e un peso di 19 GB.

Ovviamente le sue dimensioni hanno reso impraticabile l'importazione all'interno di *software* dedicati alla realtà virtuale e pertanto è stato necessario procedere con la semplificazione del modello, mirando a ridurre la complessità e mantenendo al contempo una rappresentazione visiva soddisfacente. Questa ottimizzazione si è rivelata essenziale per garantire una fruizione virtuale fluida e responsiva, senza tralasciare l'equilibrio tra dettaglio visivo e prestazioni del sistema.

## 5.2 Ottimizzazione del modello per la fruizione virtuale

La semplificazione del modello è stata condotta con attenzione al fine di ottimizzare la sua geometria. Questo processo ha coinvolto una decimazione planare<sup>8</sup>, che ha ridotto i dettagli su forme principalmente costituite da superfici piane. Questa scelta si è dimostrata particolarmente efficace nel caso delle pareti, mostrandosi come la soluzione ottimale poiché capace di eliminare gli elementi impropri che formavano irregolarità sulle superfici (fig. 5.3).

L'obiettivo è stato quello di assicurarsi che eventuali strati o piccole imperfezioni indesiderate presenti sulla parete fossero smussate o eliminate. In questo modo, la semplificazione non solo ha ottimizzato la struttura geometrica complessiva, ma ha anche garantito una rappresentazione uniforme delle superfici.



*Fig. 5.1 - Allineamento in un'unica nuvola di punti dei dati laser scanner e fotogrammetrici in RealityCapture. A sinistra: nuvola di punti completa vista dall'esterno; a destra: zoom su un punto interno della nuvola. Il cerchio nero corrisponde ad un punto di stazione, le piramidi corrispondono alle diverse prese fotografiche.*



*Fig. 5.2 - Visualizzazione dall'esterno del modello mesh in RealityCapture. In alto: visualizzazione solida; in basso: visualizzazione texturizzata.*

## CAPITOLO 5

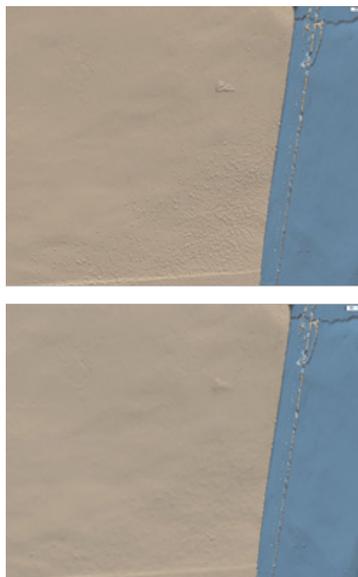


Fig. 5.3 - Dettaglio dell'angolo tra la parete Sud e la parete Ovest. Prima e dopo la decimazione planare.

Successivamente, sono state implementate ulteriori ottimizzazioni al modello tridimensionale. In particolare, si è proceduto con semplificazioni mirate nei punti specifici in cui le superfici mostravano particolare rugosità. Identificando con precisione le aree di interesse, si è scelto di applicare una tecnica di *smoothing*, mirata a rendere le superfici più omogenee, lisce e leggere. Questo intervento si è concentrato solo sulle porzioni del modello che necessitavano di una maggiore uniformità, ottenendo una superficie coerente, eliminando eventuali asperità e dettagli eccessivi che potevano risultare superflui o compromettere la qualità visiva complessiva del modello (fig. 5.4).

Una ulteriore semplificazione è stata fatta mediante l'utilizzo dell'applicativo *Instant Meshes*<sup>9</sup>, che ha permesso di trasformare le *mesh* triangolari in *mesh* quadrangolari, dimezzando il numero complessivo di poligoni sulla superficie. Questa operazione ha apportato notevoli vantaggi e ha migliorato l'efficienza complessiva nella modellazione (fig. 5.5).

Va detto che la conversione del modello in una *mesh* quadrangolare ha comportato una perdita eccessiva di dettaglio nelle parti dei peducci e dei fregi sopra alle porte e al camino, caratterizzate da forme articolate in uno spessore minimo. Data la delicatezza di tali dettagli architettonici, è stato deciso di mantenere l'intera struttura triangolare per preservare la precisione visiva di queste specifiche aree. Dunque, sebbene la scelta di utilizzare la *mesh* quadrangolare fosse ottimale per le pareti e per altre sezioni meno complesse geometricamente, è stata preferita l'adozione di una struttura uniformemente triangolare per evitare possibili complicazioni durante la fase di texturizzazione. La decisione di mantenere l'intero modello con una struttura triangolare è stata guidata da una strategia che bilanciava la gestione delle perdite di dettaglio con le esigenze pratiche della texturizzazione, assicurando al contempo un risultato finale visivamente accurato e coerente.

Il modello semplificato con decimazione planare e *smoothing*, ottenuto attraverso *RealityCapture*, è quello definitivo, esportato nel formato *.obj*. La versione attuale presenta un notevole miglioramento in termini di gestione delle risorse, con un totale di 9.754.900 facce e un peso di 542,857 *megabyte*.



Fig. 5.4 - Dettaglio della porta nella parete Ovest. Prima e dopo lo *Smoothing* di alcune porzioni.

Questo rappresenta una riduzione significativa di circa il 35% rispetto alla *mesh* originale. La considerevole riduzione del peso del modello non solo ottimizza le prestazioni in ambienti di realtà virtuale, ma rappresenta anche un notevole risparmio di spazio di archiviazione. Tale processo di semplificazione riflette un equilibrio efficace tra la necessità di garantire un'esperienza virtuale efficiente e la conservazione dei dettagli visivi cruciali per un'esperienza di alta qualità.

### 5.3 *Texture* e personalizzazione per la realtà virtuale

Come ultimo passaggio, prima di inserire il modello in un *software* per la realtà virtuale, è stata esportata la *texture* associata al modello *mesh*. La *texture* è stata mappata sulla *mesh* utilizzando coordinate specifiche, come ad esempio le coordinate UV<sup>10</sup>. Durante questo processo, il *software* di

## CAPITOLO 5

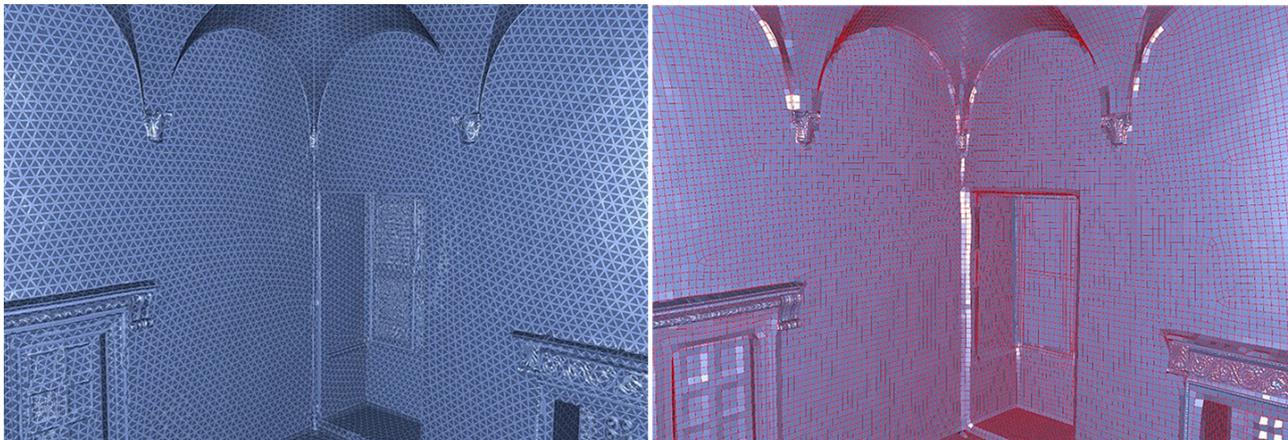


Fig. 5.5 - Semplificazione tramite l'applicativo *Instant meshes*, che ha consentito di trasformare le *mesh* triangolari in quadrangolari, dimezzando il numero dei poligoni della superficie.

modellazione 3D associa le informazioni di *texture* ai vertici della *mesh* in modo che possano essere correttamente visualizzate sulla superficie del modello. Generalmente, il *software* offre opzioni di esportazione che consentono di salvare la *texture* in formati comuni come .jpeg, .png o .tiff. Nel corso del processo di esportazione, è possibile personalizzare diverse impostazioni relative alla *texture*, tra cui la qualità, il formato del *file* e altri parametri<sup>11</sup> (fig. 5.6). Dopo queste regolazioni, la *texture* viene salvata come un *file* separato, ed è pronta per essere integrata con altri modelli o utilizzata in vari *software* di grafica 3D. In questo specifico caso, l'immagine è stata esportata nel formato .png con una risoluzione di 16384 x 16384 *pixel*, mirando a garantire un'alta definizione al modello texturizzato (fig. 5.7).

Queste impostazioni risultano cruciali per una *texture* fotogrammetrica ad alta risoluzione, evidenziando l'importanza delle immagini fotografiche nel fornire una descrizione accurata delle qualità materiche e cromatiche degli oggetti [Merlo *et al.*, 2013].

Questo è particolarmente rilevante quando si tratta di ambienti affrescati, dove la precisione visiva è essenziale per catturare dettagli e sfumature con elevata fedeltà.

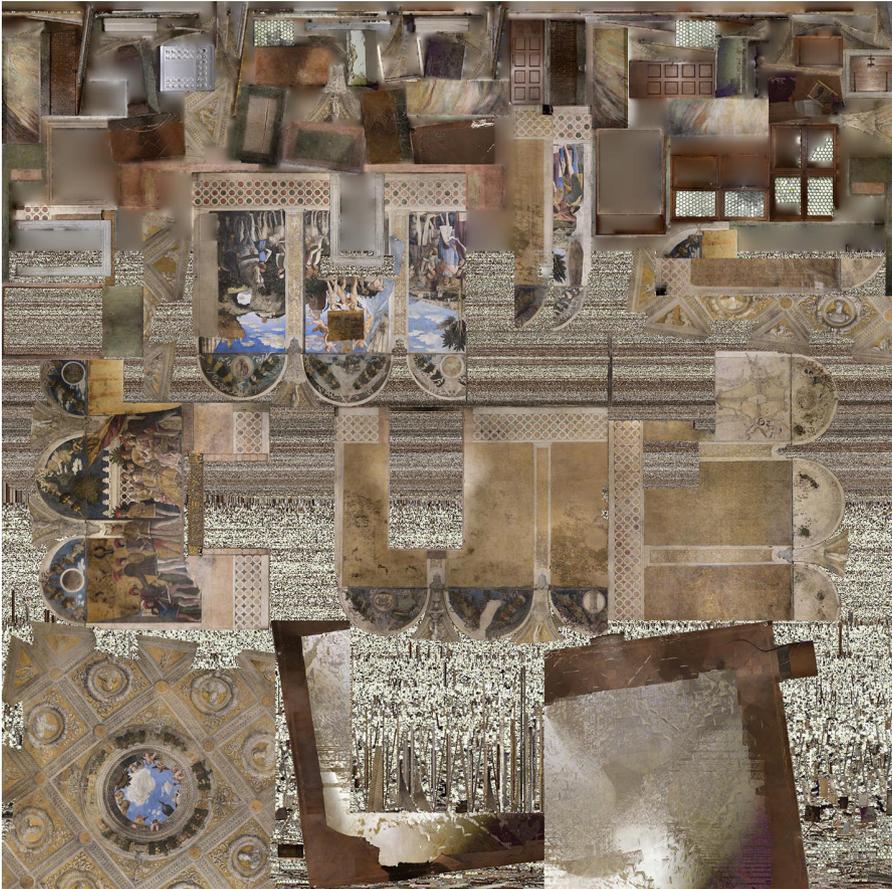


Fig. 5.7 - Texture della Camera degli Sposi esportata in formato .png da RealityCapture.

## Note

1 Le *mesh low poly* presentano un numero ridotto di poligoni e dettagli, creando una rappresentazione semplificata dell'oggetto, al contrario dei modelli *high poly* che offrono maggiore complessità e dettaglio visivo. Tuttavia questi ultimi richiedono maggiori risorse di elaborazione e possono essere meno adatti per l'ambiente VR in tempo reale.

2 Le mappe normali sono immagini utilizzate nel campo della *computer grafica* e della modellazione 3D per simulare dettagli superficiali su oggetti senza dover aumentare significativamente la complessità della geometria. Queste mappe contengono informazioni sulla direzione e l'intensità delle normali alla superficie di un oggetto tridimensionale.

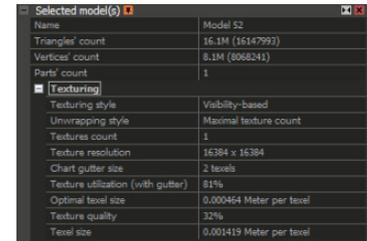


Fig. 5.6 - Parametri associati alla texture su RealityCapture.

## CAPITOLO 5

Nella modellazione 3D, la normale rappresenta la direzione perpendicolare alla superficie in ogni punto. Le mappe normali contengono dettagli di superficie aggiuntivi sotto forma di colori, che indicano le variazioni nella direzione della normale. I colori corrispondono a informazioni sulla variazione di elevazione della superficie, consentendo di simulare dettagli come rughe, pieghe, o altri dettagli microscopici.

3 All'interno di un progetto di realtà virtuale, entrambi i tipi di modelli svolgono un ruolo cruciale: i modelli *low poly* per rappresentare la geometria statica, come edifici e alberi, e i modelli *high poly*, principalmente per i personaggi o altri elementi in primo piano.

4 Il *software RealityCapture* è un'applicazione avanzata utilizzata per la creazione di modelli 3D e la ricostruzione di ambienti tridimensionali da dati provenienti da diverse sorgenti come immagini digitali o punti di scansione *laser*. Offre un set di strumenti per processare, elaborare e manipolare grandi quantità di dati provenienti da diverse fonti, consentendo agli utenti di creare modelli dettagliati e realistici del mondo fisico [www.capturingreality.com]

5 Questo è possibile perché i dati *laser* possono essere assimilati ai *frame*, ogni scansione può essere considerata come una vista panoramica che viene scomposta in un cubo (6 *frame*) [Bigongiari, Lumini, 2022].

6 La 'decimazione planare' dissolve la geometria che forma angoli tra le superfici con un limite angolare impostato a 5°.

7 *Instant Mesbes* è un *tool* di *remeshing* automatico, sviluppato dal gruppo di ricerca Interactive Geometry Lab dell'università ETH Zurich. È stato presentato durante conferenza SIGGRAPH del 2015. Questo programma, in grado di elaborare sia *mesh* molto dense sia nuvole di punti, è in grado di generare *mesh* quadrangolari e triangolari in breve tempo [Jakob *et al.*, 2015].

8 Le coordinate UV sono un sistema di coordinate bidimensionale utilizzato nella grafica 3D per mappare *texture* su modelli tridimensionali. Contrariamente alle coordinate XYZ, che rappresentano i punti tridimensionali nello spazio, le coordinate UV sono associate alle superfici della *mesh* e definiscono la posizione di un punto sulla *texture* applicata a quella superficie.

Le coordinate UV sono chiamate così perché corrispondono a due dimensioni, analogamente alle coordinate XY su un piano bidimensionale. La 'U' rappresenta la coordinata orizzontale lungo l'asse orizzontale della *texture*, mentre la 'V' rappresenta la coordinata verticale lungo l'asse verticale della *texture*.

9 È possibile definire la risoluzione delle *texture* importate e vari parametri che influenzano il processo di texturizzazione e colorazione. Questi includono la risoluzione predefinita delle *texture* per i modelli importati, l'algoritmo di texturizzazione, lo stile di colorazione, la *layer* dell'immagine utilizzato per la colorazione e la texturizzazione, la riduzione delle dimensioni delle immagini, e la compensazione automatica delle differenze di colore e luminosità tra le immagini. Altri aspetti includono la gestione delle parti non colorate o non texturizzate e la ricolorazione automatica del modello dopo la texturizzazione.

## CAPITOLO 6

Sistemi voltati e lunette: indagine tra morfologia, struttura e ricostruzione 3D

### 6.1 Analisi morfologica, dinamiche strutturali e classificazioni

I sistemi voltati caratterizzano in modo specifico l'architettura storica, delineando morfologicamente una categoria di superfici tridimensionali, contraddistinta dalla presenza di almeno una sezione principale con un profilo curvo<sup>1</sup>.

Nell'esaminare le volte<sup>2</sup> dal punto di vista statico e compositivo, emerge una varietà tipologica che, nonostante le differenze, si riconosce sotto l'identità di un sistema strutturale spingente e resistente per forma. Qui, i conci, comunemente realizzati in pietra o laterizio, svolgono un ruolo cruciale nel trasferire il carico della struttura sui piedritti.

Questo processo avviene in modo equilibrato, considerando le componenti verticali e orizzontali delle forze in gioco. La resistenza delle volte, infatti, è strettamente connessa alla loro forma caratteristica, che consente una distribuzione ottimale del carico<sup>3</sup>. Queste strutture mostrano una straordinaria capacità di gestire le forze verticali e orizzontali, rendendole particolarmente adatte a coprire ampie luci e a garantire stabilità strutturale.

Nonostante la natura spingente e resistente delle volte, la diversità tipologica è evidente e offre una vastità compositiva che contribuisce a arricchire il patrimonio costruito nel corso del tempo.

L'evoluzione della trattatistica architettonica ha portato a diverse classificazioni, ognuna focalizzata su specifiche caratteristiche distintive,

## CAPITOLO 6

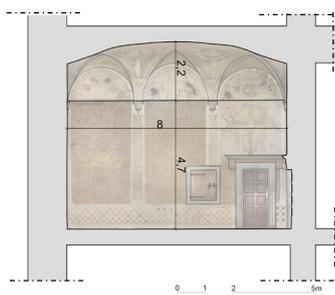


Fig. 6.1 - Quota della linea di imposta e di chiave effettuata in una sezione in mezzeria della volta.

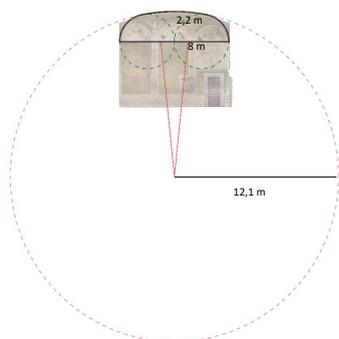


Fig. 6.2 - Studio ricostruttivo della geometria della volta ribassata policentrica.

rendendo la comprensione della loro genesi geometrica fondamentale per un approccio analitico completo<sup>4</sup>. Questa prospettiva consente di cogliere le sfumature geometriche e le dinamiche strutturali che caratterizzano ciascun tipo di volta, fornendo così una base solida per il processo di studio e di rappresentazione. La descrizione sistematica si concentra sulla nomenclatura e la classificazione delle volte, mirando a stabilire un linguaggio condiviso come chiave interpretativa nella comprensione di tali strutture<sup>5</sup>.

### 6.2 Analisi geometrica e ricostruzione 3D della volta

L'analisi morfologica e strutturale dei sistemi voltati offre una profonda comprensione delle caratteristiche distintive di tali strutture. Nel caso specifico della Camera degli Sposi, si evidenzia una connessione pratica con l'applicazione di queste nozioni all'analisi geometrica e alla ricostruzione tridimensionale della volta. L'utilizzo di dati digitali e la definizione dettagliata delle caratteristiche geometriche forniscono una base solida per una ricostruzione fedele e accurata di questa complessa struttura architettonica.

Infatti, a partire dal rilievo *reality-based* della Camera degli Sposi è stato possibile analizzare i dati digitali attraverso dei piani di sezione e le estrazioni di profili in punti specifici. Questa metodologia ha consentito un'indagine dettagliata sulla conformazione geometrica del sistema voltato con l'obiettivo di estrarne le regole per una ricostruzione tridimensionale il più possibile aderente al reale.

Nel contesto specifico, l'ambiente si presenta con una pianta quadrata di 8 m di lato, la cui copertura è caratterizzata da una volta a padiglione<sup>6</sup> polilunettata alta circa 6,90 metri in chiave e 4,70 metri all'imposta (fig. 6.1).

Dallo studio della sezione in mezzeria è possibile dedurre che si tratti di una volta a padiglione ribassata. Infatti, i fusi sono formati da superfici cilindriche con curva direttrice in un ovale<sup>7</sup> a tre centri<sup>8</sup> (fig. 6.2).

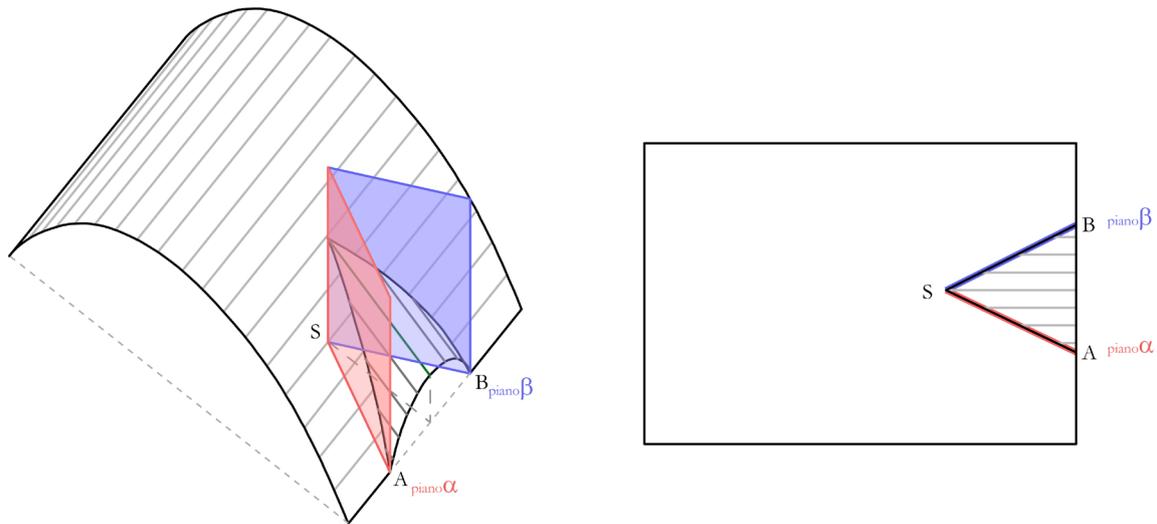


Fig. 6.3 - Generazione di una lunetta cilindroidica in assonometria e in pianta.

### 6.3 La volta polilunettata

Per una panoramica più completa della volta, sono state esaminate anche le lunette<sup>9</sup> posizionate al di sopra dell'imposta della struttura, contribuendo così a una comprensione più approfondita delle loro peculiarità geometriche. Nel caso specifico, le lunette presentano la chiave dell'arco frontale a una quota inferiore rispetto a quella della chiave di volta<sup>10</sup>.

Questa configurazione particolare conferisce loro una superficie a curvatura multipla di tipo cilindroidico<sup>11</sup>, definendo un profilo distintivo che caratterizza sia la loro estetica che la loro funzionalità (fig. 6.3).

Nonostante le proiezioni in pianta evidenzino una forma triangolare con basi uguali (fig. 6.4), in ogni parete è possibile notare che si trovano due lunette identiche, con un diametro di 2,4 metri (la prima e la terza), affiancate da una lunetta centrale che condivide l'imposta di 2,4 metri, ma presenta una freccia di 1,35 metri, conferendo un elemento distintivo al complesso (figg. 6.5, 6.6).

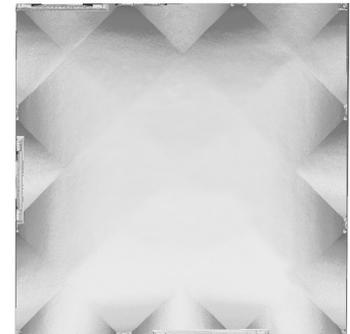


Fig. 6.4 - Vista dal basso del modello di Agisoft Metashape in cui è evidente la forma triangolare delle lunette

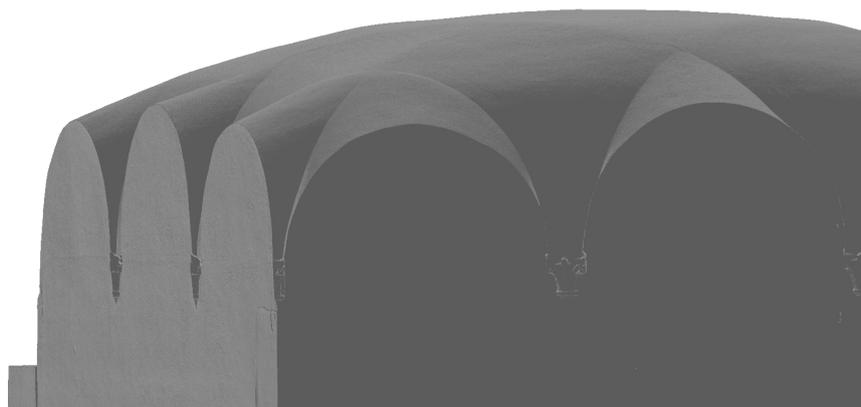
## CAPITOLO 6



*Fig. 6.5 - Misurazione e confronto delle lunette.*

Sezionando in mezzeria entrambe le tipologie di lunette si nota che sono rampanti con un angolo di  $24^\circ$  per quelle più esterne e di  $18^\circ$  per quella centrale (fig. 6.7).

La fase successiva si è concentrata sul processo di modellazione, che si è basato sul riconoscimento accurato della primitiva geometrica, della direttrice e della proiezione orizzontale di ogni singola lunetta [Spallone, 2018].



*Fig. 6.6 - Vista del modello di Agisoft Metashape in cui è evidente la diversa forma e pendenza delle lunette.*

L'obiettivo principale è stato quello di avvicinare il modello costruito il più possibile al modello digitale ottenuto attraverso il rilievo *reality-based*, garantendo così un'accuratezza e una fedeltà della struttura reale. Questo studio ha permesso di categorizzare e delineare la copertura della Camera degli Sposi in una forma chiara e distintiva: una volta a padiglione ribassata su base quadrata, arricchita da tre lunette cilindroidiche per ogni lato, di cui la prima e la terza lunetta sono uguali, mentre la seconda si distingue per una freccia maggiore (fig. 6.8).

L'analisi approfondita e la modellazione dettagliata rappresentano un passo significativo per conoscere e preservare la complessità architettonica della Camera degli Sposi. Questo approccio, basato su un'integrazione accurata di dati *reality-based* e modellazione geometrica, fornisce una base solida per ulteriori studi e contribuisce alla conservazione di un patrimonio culturale di grande rilevanza (fig. 6.9).

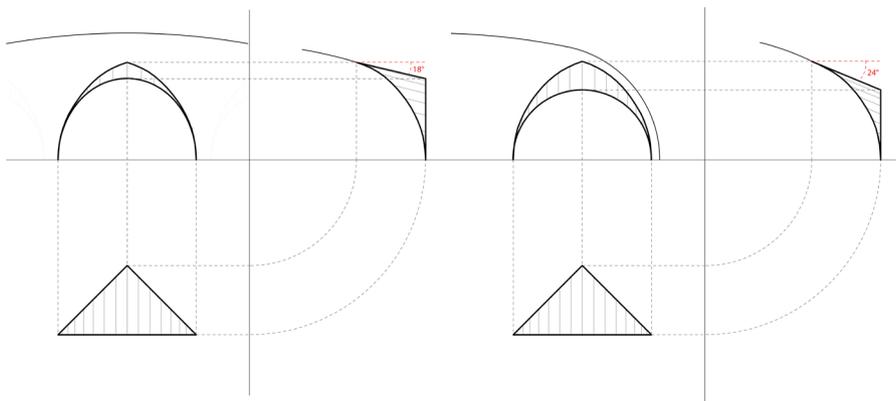


Fig. 6.7 - Le due varianti di lunetta cilindroidica con pendenza di  $24^\circ$  e  $18^\circ$  in proiezioni ortografiche.

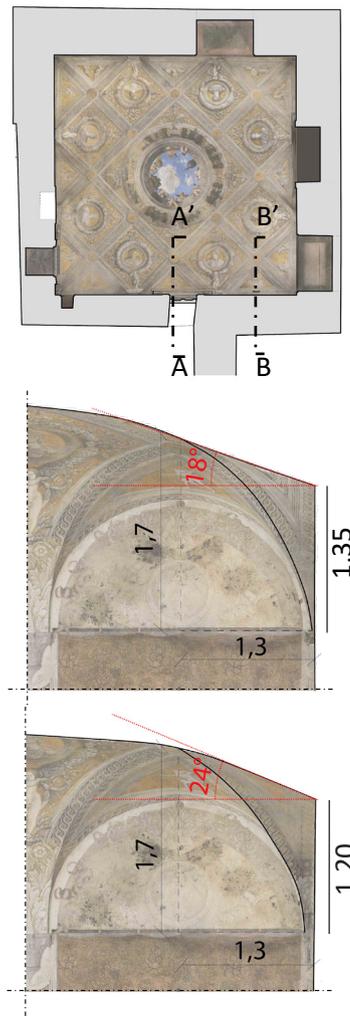


Fig. 6.8 - In alto: sezione A-A' in mezz'opera della lunetta centrale, evidenzia una pendenza di  $18^\circ$ . In basso: sezione B-B' sulla terza lunetta, evidenzia una pendenza di  $24^\circ$ .

## CAPITOLO 6

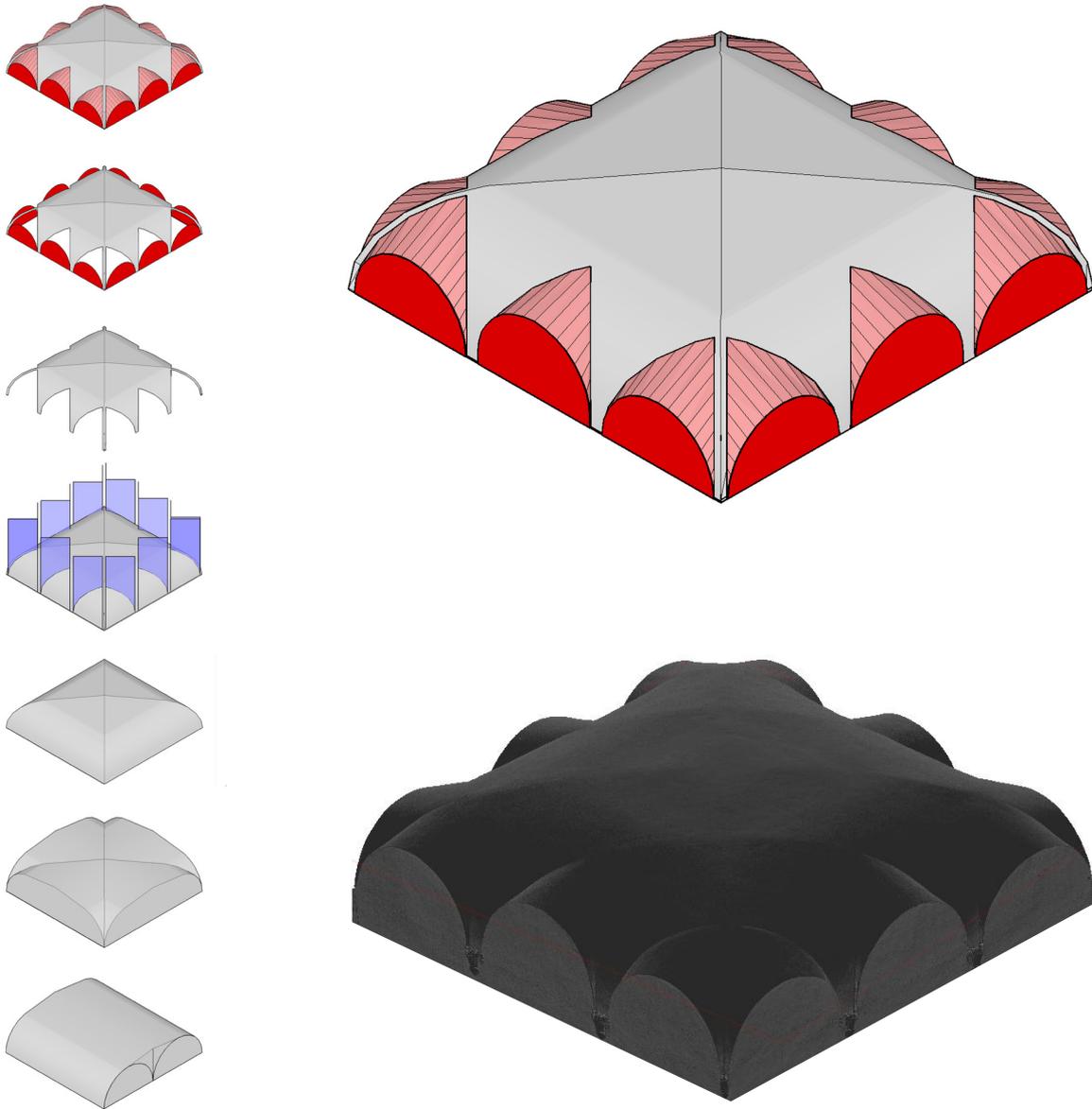


Fig. 6.9 - Costruzione geometrica della volta lunettata e confronto con il modello di Agisoft Metashape.

## Note

1 Per lo studio delle volte si rimanda alla all'ampia letteratura sull'argomento:

- Bonfigli, C., Braggio C.R. (1987). *Geometria Descrittiva e Prospettiva*. Milano, Hoepli.
- Breyman, G.A. (2003). *Costruzioni in pietra e strutture murali* (Vol I) Roma: Dedalo.
- Capone, M. (2010). *La genesi dinamica della forma. Applicazioni di Geometria descrittiva nell'era informatica*. Napoli:Fridericiana.
- Crescenzi, C. (1999). *Superfici a semplice e doppia curvatura. Le ragioni geometriche delle coperture voltate in architettura*. Firenze.
- Dell'Aquila, M. (1999). *Il luogo della geometria*. Napoli: Arte Tipografica.
- De Rubertis, R. (1994). *Il disegno dell'architettura*. Roma: Carocci Editore.
- Docci, M., Maestri, D. (2009). *Scienza del Disegno*. Torino: UTET.
- Docci, M., Migliari, R. (1992). *Scienza della rappresentazione*. Roma: Carocci Editore.
- Donghi, D. (1925). *Manuale dell'architetto*. (Vol. I). Torino: UTET.
- Giordano, A. (1999). *Cupole, volte e altre superfici. La genesi e la forma*. Torino: UTET.
- Margani, L. (2009). *Archi e volte in muratura*. Caltanissetta: Edizioni Lussografica.
- Migliari, R. (2009). *Geometria Descrittiva*. Novara: Città Studi Edizioni.
- Palladio, A. (1570). *I quattro libri dell'Architettura*. Venezia: Domenico de' Franceschi. Copia anastatica, Milano: Hoepli, 1990.
- Sgrosso, A. (1996). *La rappresentazione geometrica dell'architettura*. Torino: UTET.
- Tucci, F. P., Cadolini, G. (1832). *Della misura delle volte rette ed oblique. Trattato teorico-pratico*. Roma: Angelo Monti.

2 Si definisce volta un particolare tipo di superficie posta a copertura di uno spazio delimitato da muri o da pilastri composta da un insieme di elementi che reagiscono ad un unico tipo di sollecitazione, e tale che la sezione in almeno una delle direzioni principali sia una linea curva. La volta è un elemento tridimensionale dato dallo sviluppo di una superficie nello spazio, più precisamente dalla traslazione o rotazione di una curva direttrice lungo una retta generatrice.

3 Le volte possono essere sostenute da elementi verticali, le cui caratteristiche variano a seconda del tipo di volta (setti portanti, pilastri, ecc.).

4 Ai fini della definizione della forma, ciascuna volta viene ricondotta ad una superficie geometrica che va considerata senza spessore.

5 Tra i principali elementi di questa nomenclatura troviamo i conci, i filari, i letti, i cervelli, le spalle, il piano d'imposta, la corda, la freccia e il sesto [Docci, Migliari, 1992]. La classificazione si estende infatti anche alla forma del profilo, distinguendo strutture a tutto sesto, ribassate, rialzate, a sesto incompleto e a sesto acuto, oltre a considerare la simmetria che porta a

## CAPITOLO 6

differenziare strutture rette, oblique, rampanti e zoppe. In particolare, si distinguono le volte semplici, costituite da una sola superficie o falda, dalle volte composte, formate dalla giustapposizione di più falde, e dalle speciali, caratterizzate da una geometria particolarmente complessa [Margani, 2009].

6 La volta a padiglione si ottiene componendo quattro o più fusi cilindrici impostati sui lati dell'ambiente da voltare. Nel caso di un ambiente quadrato la volta si costruisce componendo quattro fusi derivati dalla sezione di un cilindro rotondo che ha per diametro il lato del quadrato.

7 La complessità dell'ovale è direttamente proporzionale al numero dei suoi centri e maggiore è il numero di centri utilizzati nella sua costruzione, maggiore è la sua somiglianza all'ellisse.

8 Tale caratteristica gli conferisce la denominazione di curva policentrica, indicando la presenza di più centri lungo il suo percorso. La transizione fluida tra le diverse parti è garantita poiché la curva ovale ammette la stessa tangente nei punti di giunzione.

9 La porzione di muratura verticale che costituisce la faccia dell'arco è chiamata 'lunetta', e lo stesso termine si applica anche alla superficie di connessione. Le lunette costituiscono un elemento ampiamente presente nell'architettura medievale e rinascimentale, svolgendo un ruolo significativo sia per le loro qualità decorative che per la capacità di conferire rigidità ai gusci strutturali, rendendoli staticamente più efficienti e utili anche nella creazione di aperture. Analogamente agli archi e alle volte, la configurazione geometrica delle unghie o delle lunette può variare in relazione alle caratteristiche delle curve principali che le compongono [Fallavollita, 2009].

10 La modellazione delle lunette sarà influenzata dalla curva di imposta e dalla determinazione delle curve ottenute dall'intersezione dei piani con la volta e la distinzione tra le diverse tipologie dipenderà dall'approccio specifico utilizzato nella creazione della sua superficie.

11 I parametri essenziali per la costruzione geometrica delle lunette includono: la tipologia e l'altezza della curva di imposta, il piano di appartenenza, la tipologia delle curve diagonali e la curva in mezzzeria [Scandurra, 2020]. Le lunette cilindroidiche sono caratterizzate da superfici rigate, ottenute dall'unione dei punti della curva di imposta con i punti delle curve diagonali. Al contrario, le lunette sferoidiche sono costituite da una curva direttrice. In questo contesto, le estremità e il punto chiave di tale curva si muovono lungo direzioni non rette, senza che il raggio della curva rimanga costante. La costruzione delle unghie cilindroidiche o sferoidiche dipenderà quindi dalla curva di imposta passante per l'arco verticale e dall'individuazione delle curve ottenute dall'intersezione dei piani verticali con la volta principale.

## CAPITOLO 7

Illusionismo prospettico: dal realismo pittorico alle ipotesi ricostruttive

### 7.1 Le prospettive architettoniche tra illusione e realtà

“Le prospettive architettoniche sono un ponte che collega l’arte alla scienza, e la scienza all’arte; e questo ponte l’ha costruito la Storia” [Migliari, 2016]. Queste rappresentazioni, sfruttando la prospettiva lineare o aerea<sup>1</sup> e altre tecniche, inducono lo spettatore a percepire una profondità che supera i confini delle superfici murarie, dilatando lo spazio fino agli estremi dello sguardo.

Questa capacità di rendere visivamente ‘reale’ ciò che è solo una rappresentazione è stata una innovazione nel mondo dell’arte a partire dall’invenzione della prospettiva da parte di Filippo Brunelleschi<sup>2</sup>, segnando così un cambiamento decisivo nella teoria e nella pratica della rappresentazione dello spazio<sup>3</sup>. La scoperta delle capacità illusorie della prospettiva offre infatti agli artisti rinascimentali la possibilità di rappresentare una voluta profondità in uno spazio dimensionalmente inferiore, o addirittura su fondali piani [Pagliano, 2002]. Tra questi artisti, Andrea Mantegna, Baldassarre Peruzzi e Andrea Pozzo hanno perfezionato l’arte di combinare prospettiva, anamorfosi<sup>4</sup> e tecniche pittoriche, creando opere che offrono una fenomenale illusione di profondità e tridimensionalità, ingannando l’occhio dello spettatore e invitandolo a immergersi in un mondo immaginario e coinvolgente<sup>5</sup>. Per questo motivo gli autori delle prospettive architettoniche prestano particolare attenzione alla composizione scenografica

## CAPITOLO 7

delle opere, creando effetti tridimensionali che coinvolgono e interagiscono con chi li osserva<sup>6</sup>. L'evoluzione della prospettiva è intrinsecamente legata alla comprensione della visione umana e alla sua trasposizione in regole matematiche e artistiche<sup>7</sup> [Valenti, 2016] e le prospettive architettoniche si sviluppano come strumento di progetto nell'architettura e nella pittura, utilizzando rappresentazioni illusorie per ampliare le dimensioni degli ambienti sfruttando regole geometriche per una virtuale dilatazione dello spazio.

Le tecniche più utilizzate per creare l'illusione di uno spazio tridimensionale su superfici piane, semicurve o curve sono quella 'quadratura'<sup>8</sup> e del 'sotto in su' applicate su soffitti o volte e avendo come oggetto architetture, statue e decorazioni a stucco illusorie.

La 'quadratura' si concentra principalmente sulla rappresentazione illusionistica di spazi architettonici, mentre il 'sotto in su' sfrutta l'inversione prospettica per esplorare visioni creative innovative. Entrambe dimostrano la maestria artistica nella manipolazione della percezione visiva e nella creazione di mondi fantastici, contribuendo in modo significativo all'evoluzione dell'arte visiva nel corso dei secoli. La tecnica del 'sotto in su' dà vita a spazi scenici coinvolgenti, con una particolare attenzione alla composizione di insieme, rivelando un'evoluzione nella comprensione e nell'applicazione delle regole prospettiche nel corso dei secoli e approcci differenziati nei punti di vista, nei centri di proiezione e nei metodi di trasferimento del disegno.

### 7.2 L'illusionismo prospettico di Mantegna

Il Rinascimento italiano è stata un'epoca di straordinario progresso artistico, caratterizzato da un fervore creativo e da innovazioni senza precedenti. La prospettiva non era più semplicemente uno strumento di misurazione delle dimensioni, ma un affascinante mezzo di coinvolgimento emotivo [Pipitone, 2011]. Infatti, grazie all'abile utilizzo della prospettiva, gli artisti del Cinquecento riuscirono a

suscitare partecipazione intellettuale ed emozionale negli spettatori, trasformando la pittura illusionistica in un veicolo unico di esperienza visiva [Pascariello, 2005].

Mantegna, in particolare, si distinse per la sua profonda comprensione delle potenzialità illusionistiche della prospettiva, messe in campo nella decorazione della Camera degli Sposi dove conferisce un effetto illusionistico che dissolve la superficie delle pareti e del soffitto, richiamando la tecnica utilizzata da Masaccio nella ‘Trinità’ [Catastini, Ghione, 2004].

L’approfondimento dell’analisi prospettica, congiunto a una indagine sulla configurazione geometrica delle coperture nella Camera degli Sposi, è stato fondamentale ai fini dell’esplorazione e della ricostruzione della prospettiva del Mantegna. Attraverso l’utilizzo delle ortofoto (Cfr. Cap. 4) e del modello tridimensionale frutto del rilievo della Camera, è stato possibile creare una rappresentazione dettagliata dell’ambiente. Durante il processo di studio, ha preso forma il loggiato simulato, scandito da pilastri che, oltre alla loro funzione strutturale, contribuiscono a plasmare la percezione visiva dello spettatore. I tendaggi, che si dipartono proprio dai pilastri, aprono e chiudono la vista al paesaggio esterno, dando luogo ad una coinvolgente narrazione visiva. In questo contesto, la prospettiva si trasforma in uno strumento attraverso il quale l’artista guida attivamente l’esperienza visiva dello spettatore.

Infine nello studio della volta della Camera, ed in particolare dell’oculo, una specifica attenzione è stata dedicata alla balaustra cilindrica, composta da quattro *file* di anelli concatenati. Questa raffigurazione, posta sopra il loggiato, sottolinea la volontà del Mantegna di creare un connubio tra elementi architettonici e decorativi e, con l’aggiunta di figure di giovani donne e putti affacciati dalla balaustra<sup>9</sup>, aggiunge ulteriore profondità e vivacità alla composizione.

In sintesi, l’analisi prospettica integrata dall’approfondimento geometrico delle componenti architettoniche ha permesso la

comprensione della complessità e della ricchezza visiva della Camera degli Sposi, sottolineando il genio del Mantegna nella rappresentazione dello spazio prospettico.

### **7.3 L'indagine tra rappresentazione pittorica e realtà materiale**

Le rappresentazioni pittoriche della Camera degli Sposi sono state considerate come architetture realmente costruite, diventando oggetto di un'indagine e di un approfondimento specifico.

Gli affreschi e l'architettura materiale, sono indissolubilmente legati, e attraverso l'impiego del rilievo fotogrammetrico e del *laser scanner*, è stato possibile condurre un'analisi dettagliata recuperando dati geometrici di fondamentale importanza<sup>10</sup>. L'architettura così rilevata si è caratterizzata come il fulcro di una nuova rappresentazione, di cui sono stati indagati i rapporti e l'impianto compositivo. Ciò ha permesso di stabilire relazioni profonde tra lo spazio dipinto e l'architettura reale, facendo affidamento su procedure geometrico-proiettive che hanno garantito la verifica accurata di ogni operazione compiuta durante l'analisi.

Nel caso specifico, la volta della Camera degli Sposi si distingue per una prospettiva da 'sott'insù', la quale può essere approfondita e ipotizzata mediante uno studio prospettico a quadro orizzontale visto dal basso. Questo approccio consente di esaminare dettagliatamente la rappresentazione analizzando le sue caratteristiche prospettiche e ipotizzando la dimensione che avrebbe la balaustra cilindrica se esistesse realmente.

### **7.4 Applicazione e verifica dell'idea configurativa**

Per analizzare in dettaglio l'affresco sulla volta della Camera degli Sposi al fine di ricostruire un modello rappresentativo degli elementi architettonici immaginati dal Mantegna è necessario individuare gli

enti proiettivi che governano l'immagine al fine di realizzare una restituzione prospettica e ricavarne metricamente e geometricamente gli elementi architettonici.

Per trasformare un'immagine prospettica di un oggetto nella sua rappresentazione mongiana, si adotta un piano di riferimento su cui tutti gli elementi vengono proiettati, seguito da un processo di omologia di ribaltamento per effettuare la restituzione. Si è deciso perciò di lavorare sull'immagine piana dell'affresco, ovvero sulla proiezione della porzione interessata dall'affresco prospettico del dipinto. Per questa analisi la balaustra è stata assimilata ad un cilindro dal diametro di 1,76 m, assumendo quale piano geometrico<sup>11</sup> il piano

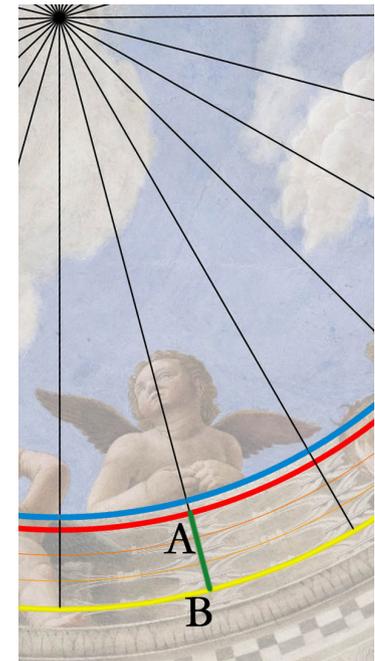
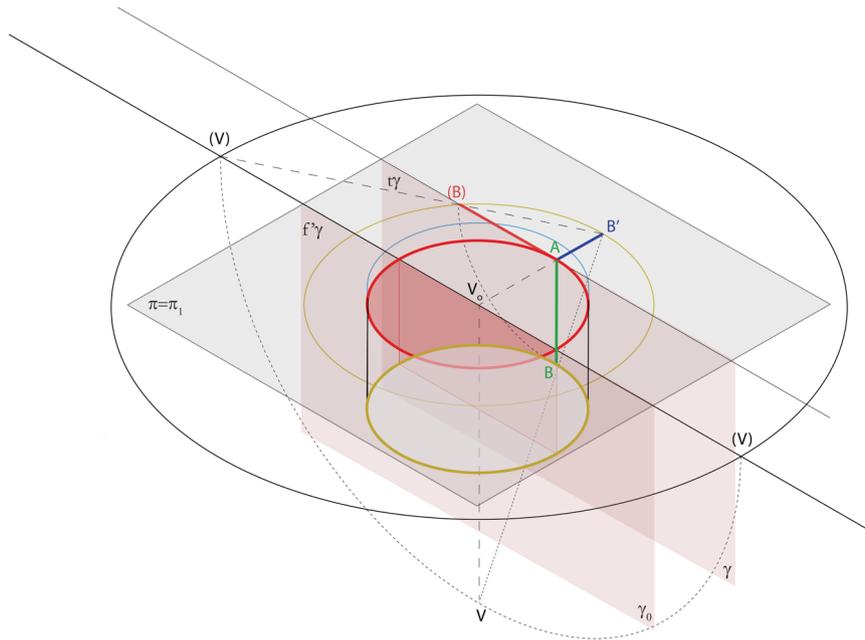


Fig. 7.1 - Schema della prospettiva da 'sott'insu' con individuazione della circonferenza appartenente al piano geometrico (linea rossa) e del segmento AB (linea verde). AB - Segmento di riferimento;  $\pi$  - Quadro o piano della rappresentazione;  $\pi_1$  - Piano geometrico/piano orizzontale di riferimento;  $V_0$  - Punto principale/proiezione ortogonale di  $V$  su  $\pi$ ;  $\gamma_0$  - Piano verticale passante per  $V_0$ ;  $f'\gamma$  - Fuga del piano;  $AB'$  - Immagine prospettica del segmento;  $V$  - Centro di proiezione o punto di vista;  $(V)$  -  $V$  ribaltato/ribaltamento del punto  $V$  sul quadro;  $\gamma$  - Piano visuale principale parallelo a  $\gamma$ ;  $(B)$  -  $B$  ribaltato.  $A(B)$  ha la stessa lunghezza di  $AB$ ;  $\tau\gamma$  - Traccia del piano.

## CAPITOLO 7

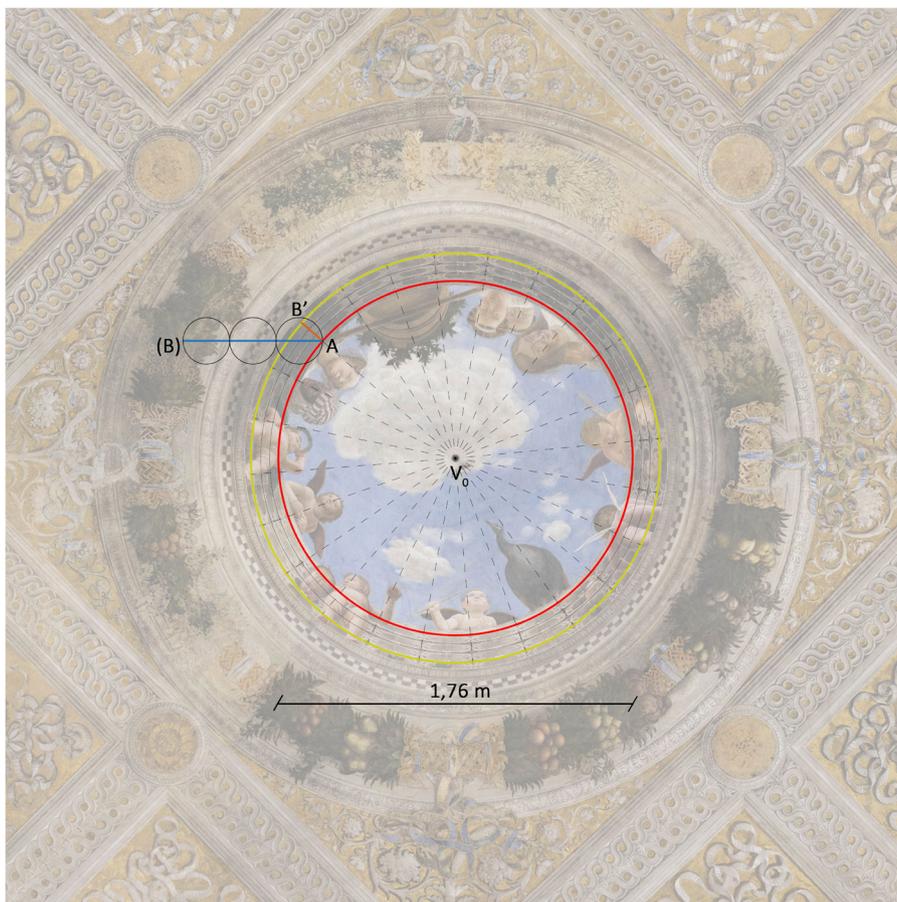
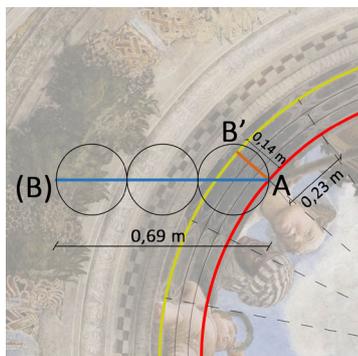
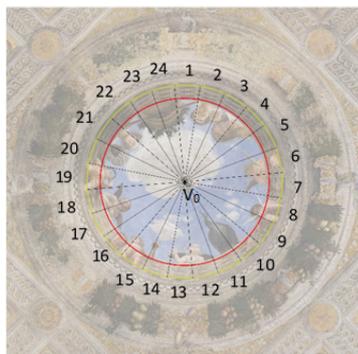


Fig. 7.2 - In alto: individuazione del punto  $V_0$  dove convergono le rette verticali dell'immagine prospettica. Evidenziazione dei diversi moduli da cui è composta la balaustra. Rappresentazione prospettica  $AB'$  e ribaltata  $A(B)$  del segmento  $AB$  composto da 3 circonferenze di diametro  $0,23$  m.

condotto per il limite superiore degli anelli concatenati con la parte terminale della balaustra (fig. 7.1). Il punto  $V_0$ <sup>12</sup> è facilmente deducibile come punto in cui convergono tutte le rette verticali contenute nell'immagine prospettica. In questo caso il punto  $V_0$  coincide con il centro della circonferenza del cilindro. La prospettiva analizzata, come detto precedentemente, è di tipo 'da sott'insù', il che significa che il punto di vista  $V$  è posto al di sotto del piano orizzontale.

In questa situazione, si è considerata la circonferenza coincidente con la fine dei quattro filari di cerchi concatenati, come appartenente al piano geometrico. Di conseguenza, tutte le dimensioni degli elementi appartenenti a questo piano non subiscono deformazioni e sono uguali a quelle reali e si può dunque considerare il diametro pari a 1,76 m e il perimetro della circonferenza di 5,54 m. Per determinare l'altezza della balaustra, è necessario conoscere il diametro degli elementi circolari di cui è composta.

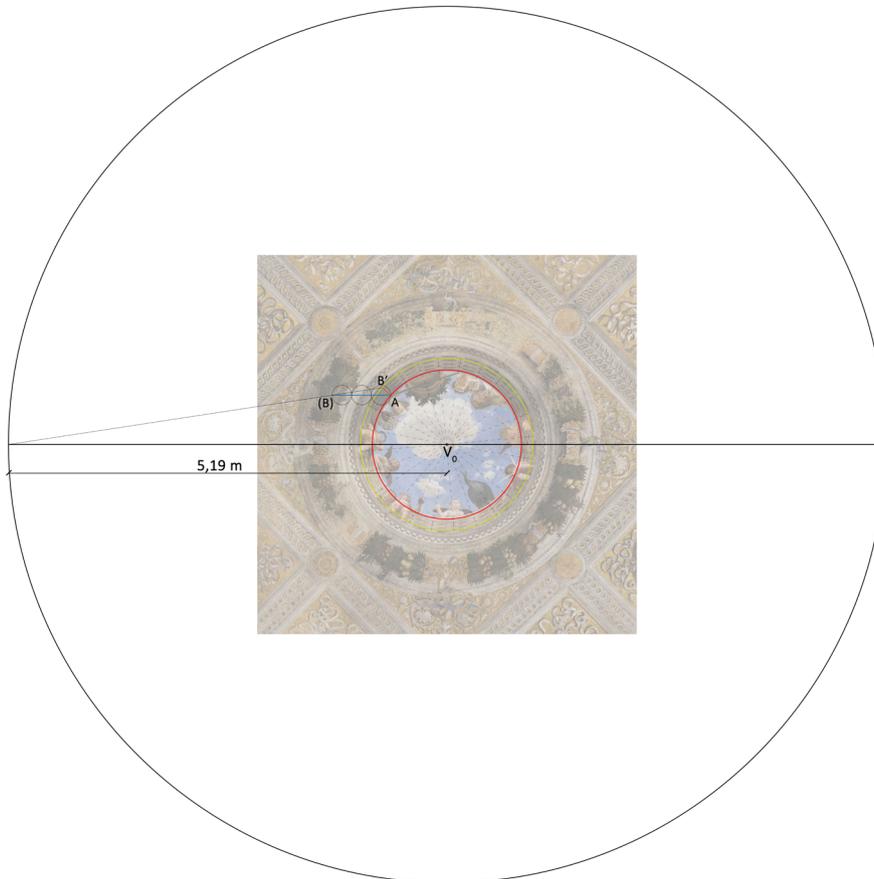


Fig. 7.3 - Individuazione del punto ( $V$ ) e di conseguenza del cerchio delle distanze.

## CAPITOLO 7

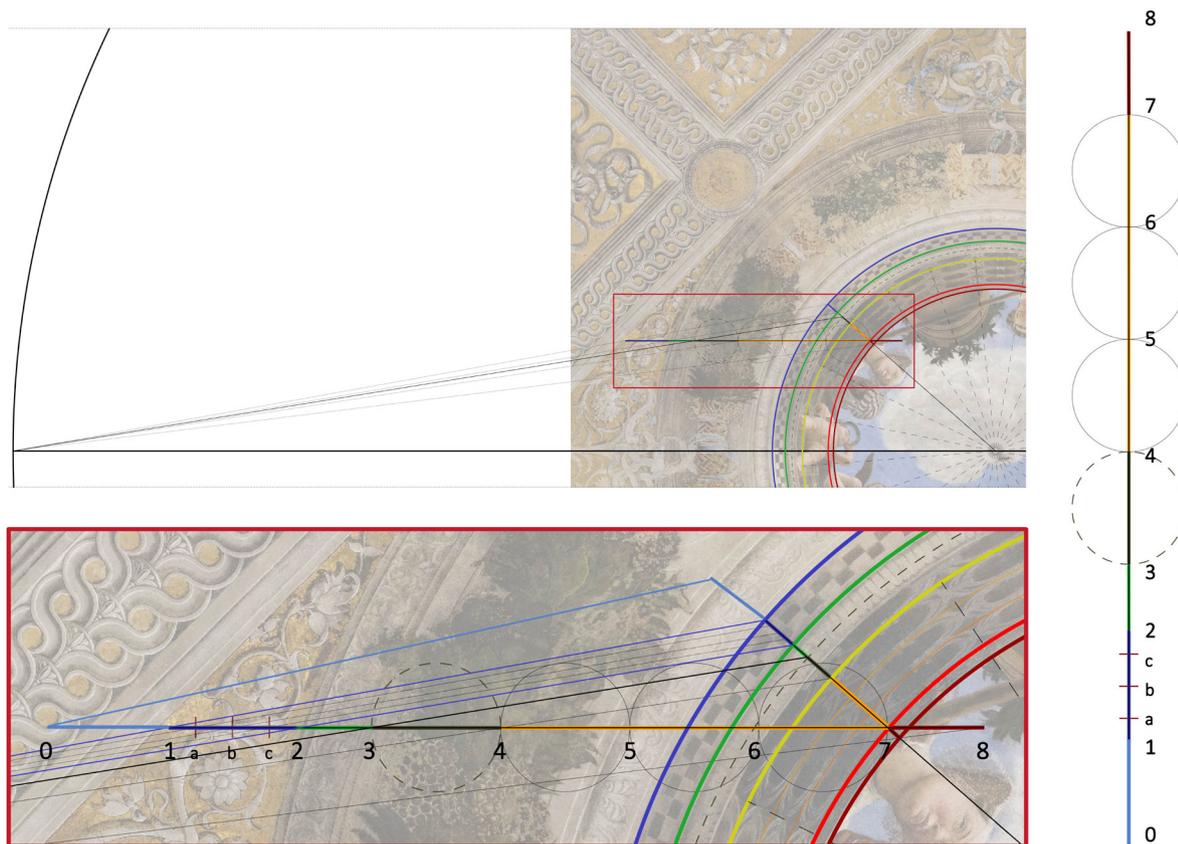


Fig. 7.4 - Ipotesi del profilo della balaustra a partire dalla sua rappresentazione prospettica.

A tale scopo, è stata divisa la circonferenza per il numero di moduli che la compongono, ottenendo così la misura dell'arco sotteso a ciascun elemento. Con 24 moduli totali, si può dedurre che ogni arco misuri circa 0,231 m (5,54 m/24). Di conseguenza, mediante un'approssimazione, è possibile determinare il diametro di ciascuna circonferenza e quindi l'altezza della balaustra, almeno per i tre moduli completamente visibili (fig. 7.2).

Considerando il segmento AB, corrispondente alle tre circonferenze sovrapposte, nota la sua lunghezza prospettica AB' (0,14 m) si ricava la lunghezza reale A(B) (0,69 m), corrispondente all'immagine ribaltata dello spigolo verticale. Per determinare il ribaltamento di V e, di conseguenza, il cerchio delle distanze (fig. 7.3), si è tracciata una retta passante per i punti B' e (B). Nel contesto specifico, dopo aver individuato (V) ad una distanza di 5,19 m da  $V_0$ , è stato possibile far convergere tutti i punti significativi che attraversano l'asse contenente AB'. L'intersezione di questi punti con la traccia  $t\gamma$  corrisponderà alle loro dimensioni reali (fig. 7.4). Naturalmente, essendo una balaustra articolata, non tutti gli elementi che la compongono si collocano sulla superficie interna del cilindro. Il profilo è stato inizialmente disegnato identificando i punti noti sulla superficie e successivamente formulando ipotesi per gli altri punti.

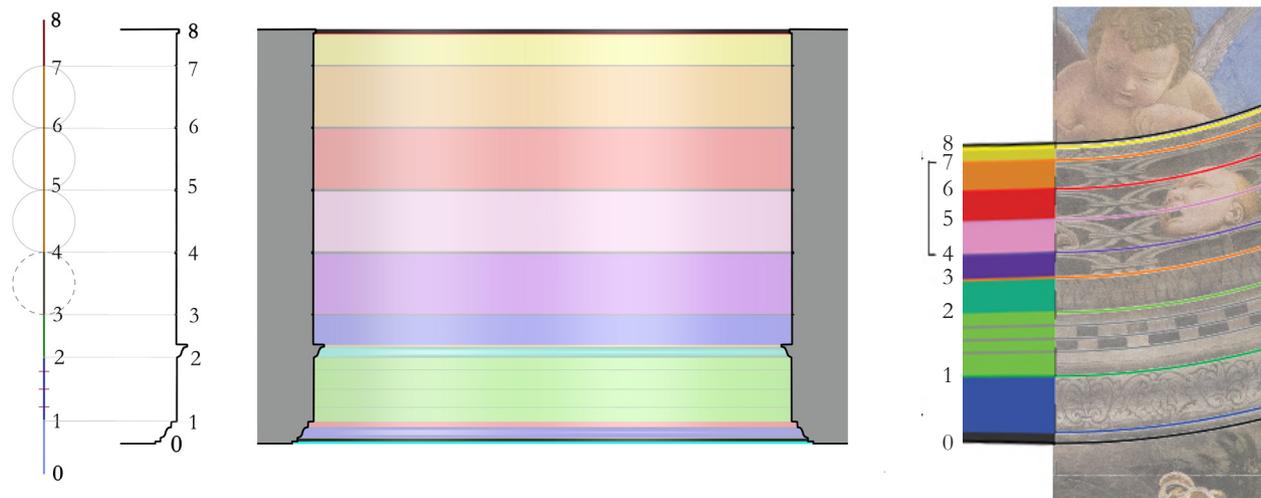
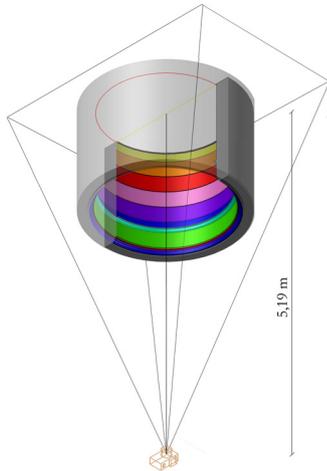
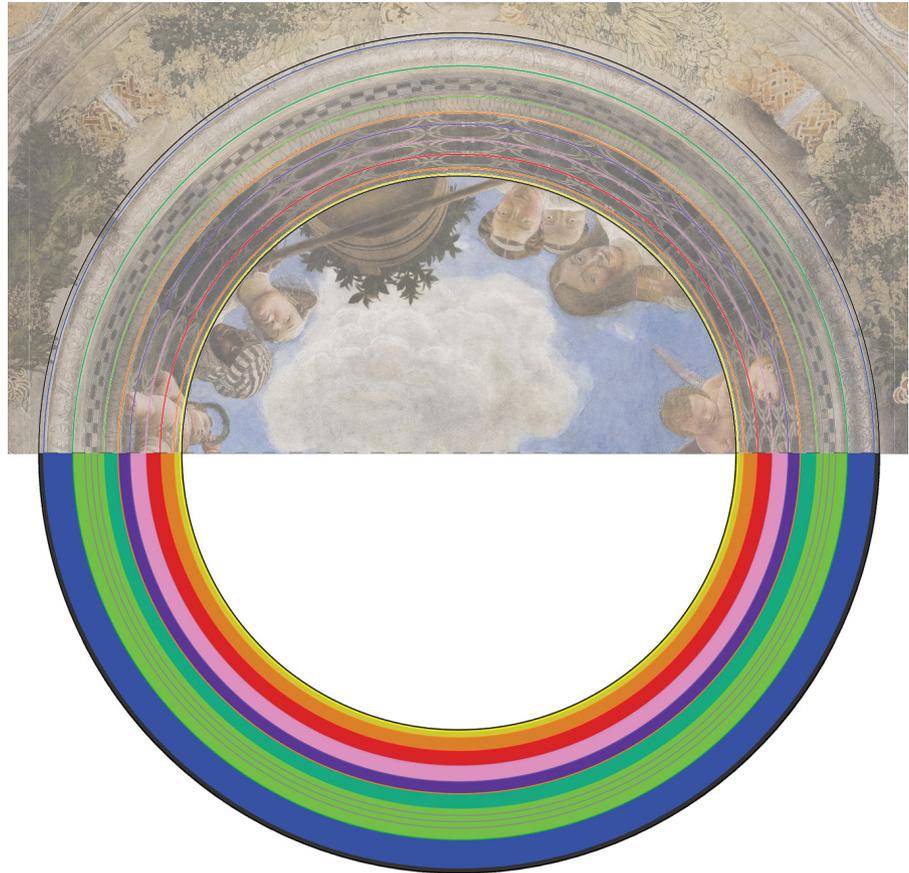


Fig. 7.5 A sinistra: modellazione semplificata divisa per fasce colorate a seconda degli oggetti e delle rientranze; a destra: divisione in fasce colorate in corrispondenza di elementi diversi: 0-1) rientranza; 1-2) fascia verticale decorata; 2-3) oggetto; 3-4) quarta circonferenza in parte coperta; 4,5,6,7) tre fasce di circonferenze sovrapposte; 7-8) fascia terminale e rompigoccia.

## CAPITOLO 7



*Fig. 7.6 - In alto: posizionamento di una camera a distanza 5,19 da  $V_0$ ; a destra: vista prospettica dal punto di presa confrontato con l'affresco di Mantegna.*



### 7.5 Verifica e modellazione delle ipotesi ricostruttive della balaustra

Dall'osservazione dell'affresco sono state formulate diverse ipotesi sulla sua sezione. La più verosimile, in ultima analisi, prevede una parte superiore rettilinea con un rompigoccia. Sotto le quattro circonferenze che caratterizzano gli elementi costitutivi della stessa, si distinguono una parte rettilinea e una sporgente con una gola dritta. La suddetta striscia è chiaramente sporgente, poiché dalla prospettiva dal basso si nota che

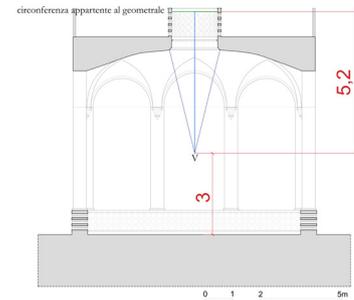
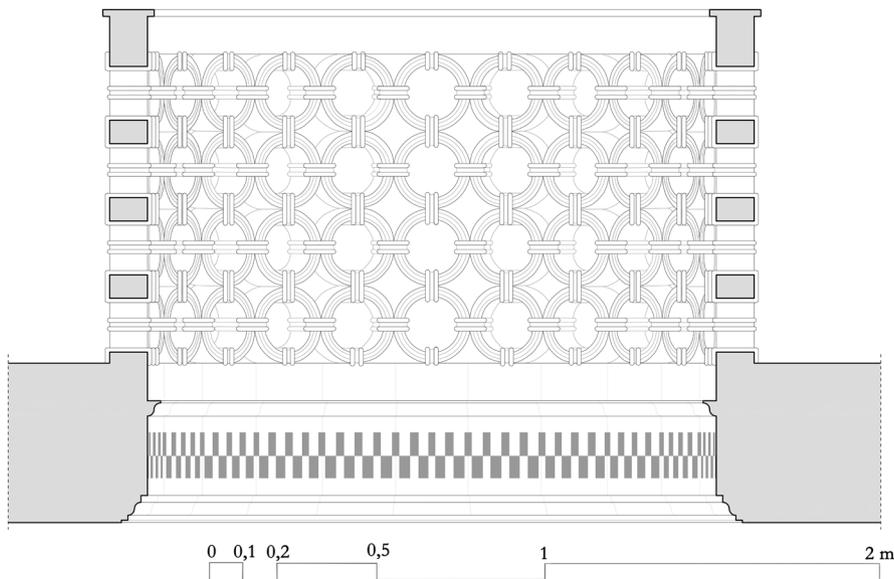


Fig. 7.7 - In alto: individuazione del punto di vista  $V$  della prospettiva da 'sott'insù' dell'oculo; a sinistra: ipotesi della sezione centrale della balaustra.

copre parzialmente la quarta circonferenza, condizione sottolineata dal fatto che alcuni putti poggiano i piedini su di essa. Al di sotto, si osserva una fascia liscia decorata a scacchiera, seguita da una parte arretrata sempre con una gola dritta (fig. 7.5). Il profilo ipotizzato è stato verificato creando un modello di un cilindro schematico dal diametro di 1,76 m, incorporando gli aggetti e le rientranze e distinguendo ogni fascia con colori differenti. Al fine di verificare la correttezza della restituzione prospettica è stata posizionata una camera a una distanza di  $5,20 \text{ m}^{10}$  da  $V_0$  e, attraverso la vista prospettica dal basso, è stato osservato che gli elementi del modello corrispondono a quelli dipinti dal Mantegna sulla volta della Camera degli Sposi poiché le fasce coincidono con un margine di errore massimo di 3 mm (fig. 7.6). Il punto di vista della prospettiva, determinato tracciando rette passanti per gli elementi verticali, risulta quindi essere unico e collocato a 5,19 m dal piano geometrico. In relazione al reale spazio architettonico della stanza, risulta che il punto di vista si pone a 3 m di altezza rispetto al piano (fig. 7.7).

## CAPITOLO 7

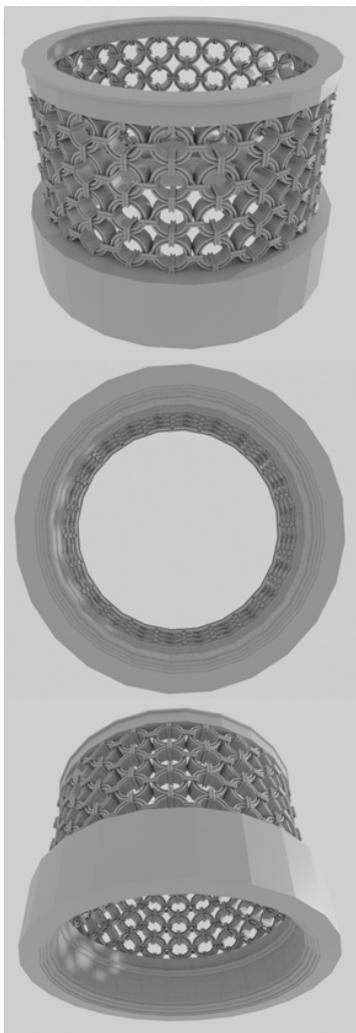


Fig. 7.8 - Modellazione balaustra su Blender a partire dall'affresco di Mantegna.

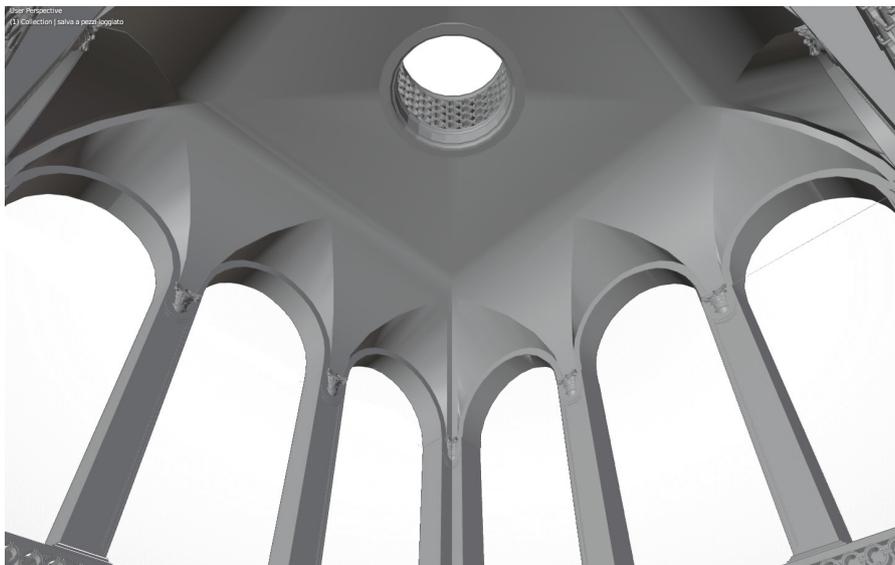
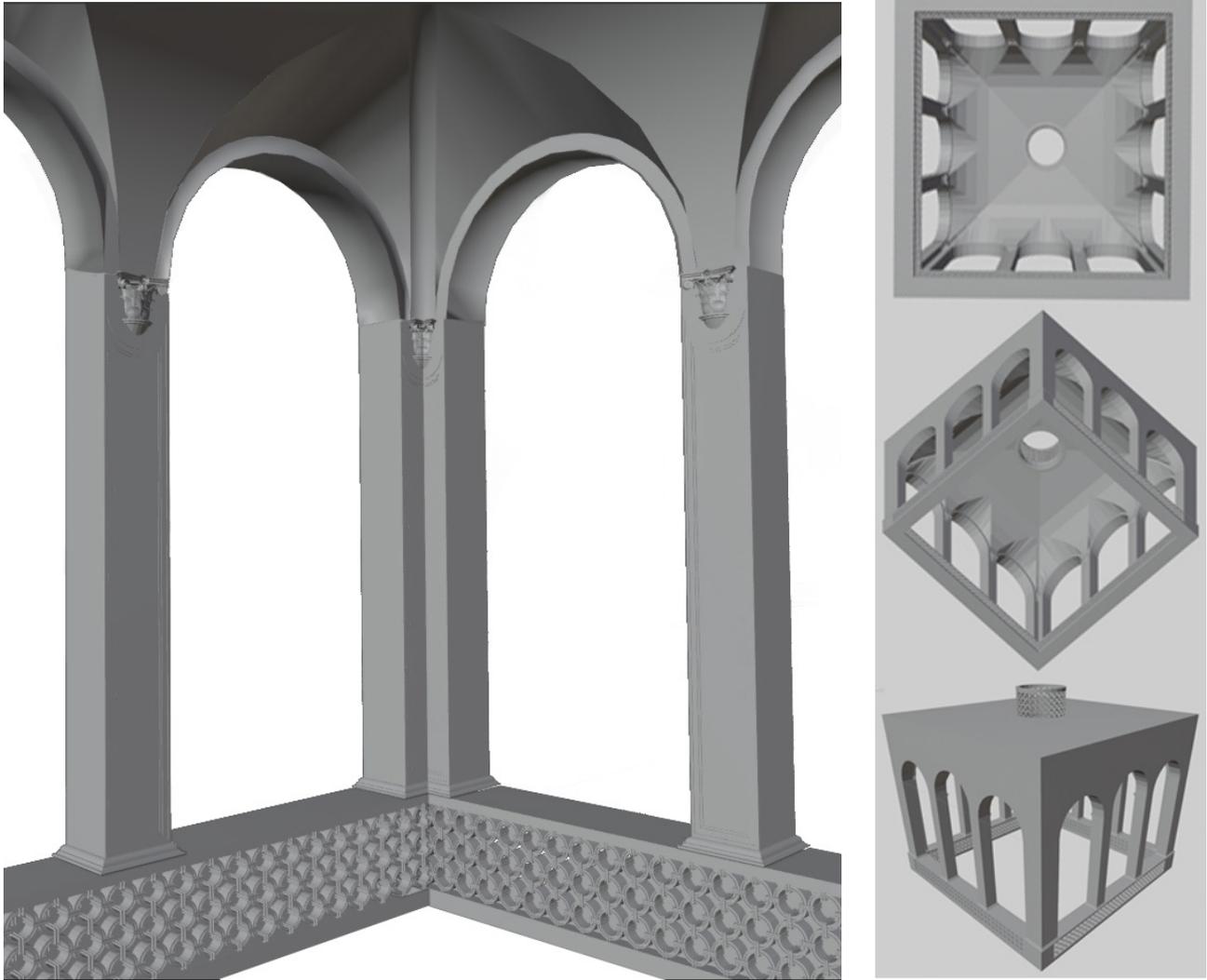


Fig. 7.9 - Modellazione loggiato su Blender a partire dall'affresco di Mantegna. Evidenziazione dei pilastri e dei peducci in rilievo.

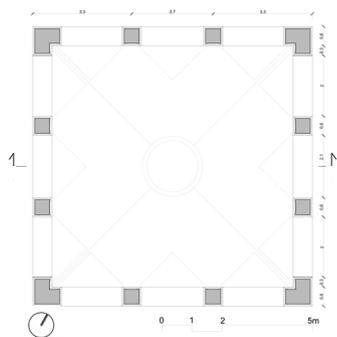
Dopo aver verificato la sezione della balaustra è stato realizzato un modello 3D ipotizzando uno spessore di circa 13 cm per il parapetto (fig. 7.8). Analogamente, è stata data forma al loggiato affrescato dal Mantegna. Questo loggiato si distingue per la presenza di due pilastri su ciascun lato e quattro pilastri angolari. Ogni lato ha una larghezza di 8 metri, e ogni pilastro, ipotizzato a base quadrata, misura circa 50 centimetri per lato e raggiunge un'altezza di 3,80 metri. Ogni pilastro è dotato alla base di un toro, una scozia e un plinto, mentre nella parte superiore presenta un peduccio in rilievo (fig. 7.9).

Su ciascun lato, al di sotto dei pilastri, si estende una fascia basamentale alta 90 cm, che è decorata con lo stesso motivo presente nella balaustra centrale, caratterizzato da circonferenze interconnesse. Tuttavia, in questo caso, la ripetizione in altezza avviene per tre volte anziché quattro (figg. 7.10, 7.11).

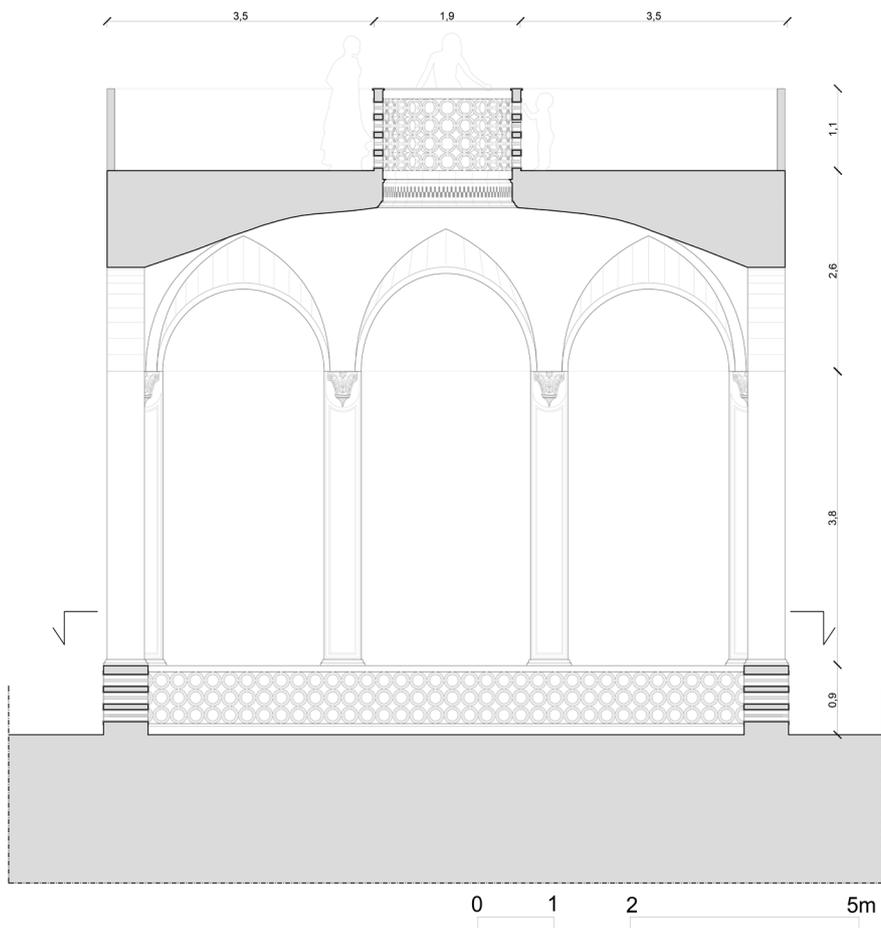


*Fig. 7.10 - Modellazione del loggiato su Blender a partire dall'affresco di Mantegna. Evidenziazione balastrina circolare superiore e fascia basamentale.*

## CAPITOLO 7



*Fig. 7.11 - Pianta e sezione del loggiato costruito a partire dall'affresco di Mantegna.*



### Note

1 La prospettiva aerea è un principio artistico utilizzato per rappresentare la profondità in un'opera d'arte, simulando gli effetti ottici che si verificano quando l'aria interposta tra l'osservatore e gli oggetti crea una graduale perdita di dettagli, intensità dei colori e contrasto. Questo fenomeno è particolarmente evidente nelle distanze notevoli, dove gli oggetti lontani tendono a sfumarsi e ad assumere tonalità più chiare rispetto a quelli vicini.

2 Brunelleschi, nonostante non fosse un pittore, comprese che l'uso prospettico avrebbe aperto nuovi orizzonti nella rappresentazione artistica. Dopo la sua morte nel 1446, il suo biografo Antonio Manetti così descrisse, nella Vita, la prospettiva da lui inventata negli anni della sua giovinezza: "e' misse innanzi ed in atto, lui proprio, quello ch'è dipintori oggi dicono prospettiva, perché ella è parte di quella scienza che è in etto porre bene e con ragione le diminuzioni ed acrescimenti che appaiono agli occhi degli uomini delle cose da lungi e da presso: casamenti, piani e montagne e paesi d'ogni regione, ed in ogni luogo le gure e l'altre cose di quella misura che s'appartiene a quella distanza che le si mostrano di lungi; e da lui è nato la regola, che è l'importanza di tutto quello che di ciò s'è fatto da quel tempo in qua" [Mainetti, 1976].

3 Pur essendoci già prova di conoscenza prospettica tra gli artisti precedenti, testimonianze di spazialità irreali infatti sono già evidenti nelle decorazioni parietali degli antichi popoli come gli egizi, i cretesi e gli etruschi, dove i pittori ideavano composizioni più o meno complesse rappresentanti immaginari aperture squarci ad inquadrare, rappresentazioni ieratiche ed effigi altamente stilizzate e geometrizzate di paesaggi [Palomba, 2010].

4 L'anamorfose è una tecnica artistica utilizzata per deformare o alterare un'immagine in modo che possa essere compresa correttamente solo da una determinata posizione o attraverso un mezzo ottico specifico. Può essere applicata in diverse forme, tra cui prospettive deformate, distorsioni geometriche o immagini che appaiono astratte da una certa angolazione ma assumono forma e senso da una prospettiva specifica.

5 Su tale argomento si rimanda all'ampia bibliografia e studi:

- Capone, M. (2005). *Prospettiva e misura*. Napoli: Edizioni Arte Tipografica.
- Migliari, R. (a cura di). (1999). *La costruzione dell'architettura illusoria*. Roma: Gangemi Editore.
- Pagliano, A. (2002). *Il disegno dello spazio scenico. Prospettive illusorie ed effetti luminosi nella scenografia teatrale*. Milano: Hoepli.
- Pozzo, A. (1693). *Prospettiva de' pittori e architetti d'Andrea Pozzo della Compagnia di Gesù* (Parte I). Roma.
- Valenti, G. M. (a cura di). (2015). *Prospettive architettoniche. Conservazione digitale, divulgazione e studio*. Roma: La Sapienza Università Editrice.

6 Questa dimensione scenica e narrativa delle prospettive architettoniche rivela una profonda connessione con la pratica teatrale, in cui l'uso degli accorgimenti prospettici si traduce in effetti suggestivi e coinvolgenti [Alberti, Tedeschi, 2016].

7 Francesco Algarotti, nella sua opera 'Saggio sopra la Pittura' sottolinea il valore matematico della prospettiva, spiegando come le conoscenze tecniche dell'epoca

## CAPITOLO 7

avessero permesso di riprodurre le caratteristiche dell'occhio umano. Questo approccio scientifico alla prospettiva ha contribuito a perfezionare la scienza degli scorci, sia dell'architettura dipinta che della figura umana.

8 Genere pittorico consistente nella realizzazione di quadrature, cioè di architetture dipinte entro una rigorosa intelaiatura prospettica e illusionistica. Originaria dalla rinomata scuola di quadraturisti di Bologna, guidata da Girolamo Curti, noto come 'il dentone', con allievi come Agostino Mitelli e Angelo Michele Colonna [Cassoli, 1985].

9 Sia le figure che l'architettura sono state radicalmente scorciate per preservare la sensazione dello spettatore di osservare dall'alto verso il basso. I putti, posizionati in piedi sulla balaustra che circonda l'apertura, sono ritratti da un punto di vista non convenzionale, evidenziando l'attenzione di Mantegna per il dettaglio naturalistico e la sua predisposizione a esplorare nuovi orizzonti, sia visivamente che concettualmente. Pur mantenendo una tonalità della pelle e una forma abbastanza naturalistiche, in linea con le convenzioni dell'epoca, l'angolazione della visione li distacca dai graziosi putti del passato, obbligando lo spettatore a riconoscere la manipolazione dello spazio e l'interpretazione della forma corporea adottate da Mantegna [Hunt, 2002].

10 Quali l'orientazione interna, la retta dell'orizzonte, la proiezione sul quadro del centro di vista e il cerchio delle distanze

11 Nel metodo della prospettiva da 'sotto in su', è il piano di riferimento orizzontale e perpendicolare al quadro ossia al piano sul quale si vuole rappresentare la prospettiva di un oggetto; è detto anche piano stazione perché, per lo più, è il piano sul quale l'oggetto poggia.

12 Proiezione ortogonale del punto di vista V sul piano geometrico.

13 Pari al raggio del cerchio delle distanze.

## CAPITOLO 8

Fruizione virtuale per la valorizzazione della Camera degli Sposi

### 8.1 La virtualizzazione del Patrimonio Storico

La virtualizzazione del patrimonio storico-architettonico sta vivendo un periodo di notevole interesse grazie all'uso di simulazioni realistiche per scopi educativi e divulgativi. Questa attenzione è alimentata dalla crescente integrazione di tecniche di *game engines*<sup>1</sup> e *computer graphics and animation*<sup>2</sup> nelle fasi operative (Cfr. Appendice D). L'adozione di applicazioni di realtà aumentata e realtà virtuale sta creando nuovi metodi per documentare e fruire i beni culturali poiché permettono di collegare oggetti reali alle loro rappresentazioni virtuali, offrendo esperienze immersive, interattive e multisensoriali. L'obiettivo è quello di ridurre la perdita di quantità e qualità delle informazioni, preservando accuratezza e tracciabilità anche in questi usi non convenzionali del dato, e, al contempo, facilitare la visualizzazione di contenuti complessi per utenti meno esperti migliorando l'esperienza di fruizione del bene. Per questo motivo la scelta delle tecnologie appropriate è cruciale nel settore dell'intrattenimento, dove bisogna considerare attentamente i dispositivi in base ai requisiti specifici di ogni progetto. Fattori come la qualità grafica, i tempi di renderizzazione e il *target* di utenti di riferimento sono essenziali per assicurare il successo e la diffusione del progetto. Tali aspetti ovviamente riguardano anche i dispositivi di visualizzazione, di *tracking*<sup>3</sup> e di *input*<sup>4</sup>, e l'individuazione del *software* di riferimento, che riveste un ruolo fondamentale per la creazione e personalizzazione dell'esperienza di fruizione [Pulcrano, 2021].

### 8.2 Un approccio immersivo per la valorizzazione

L'obiettivo di questa ricerca si inserisce nel contesto della realtà virtuale e nell'ambito della specifica sperimentazione con finalità divulgative, educative e orientate alla valorizzazione del patrimonio culturale, con l'intento di verificare la possibilità di andare oltre la mera presentazione visiva, cercando di offrire un'esperienza interattiva che consenta agli utenti di relazionarsi con un ambiente virtuale e, nello specifico, di esplorare la Camera degli Sposi a vari livelli.

A tal fine si è scelto di integrare all'interno di un singolo progetto VR i dati derivanti dalle campagne di rilievo (Cfr. Cap. 3) con le informazioni bibliografiche, geometriche e ricostruttive raccolte per consentire una comprensione approfondita del bene.

In particolare, la proposta si focalizza su un'esperienza coinvolgente e realistica, consentendo agli utenti di immergersi completamente all'interno di modelli opportunamente strutturati, con la libertà di muoversi e osservare a 360° l'ambiente circostante, creando così la sensazione di trovarsi fisicamente sul posto.

Oltre all'aspetto visivo, un altro elemento chiave dell'esperienza è l'interazione con i contenuti inseriti nella VR attraverso pannelli informativi *pop-up*<sup>5</sup> e oggetti 3D per approfondire la comprensione delle scene.

In particolare, il progetto si articola su tre livelli chiave che verranno esaminati in dettaglio in questo capitolo: il modello rilevato, l'indagine iconografica delle pareti e della volta affrescata, e il modello ricostruito del loggiato.

Complessivamente, l'obiettivo della proposta è creare un'esperienza coinvolgente e autentica, offrendo agli utenti la possibilità di spostarsi agilmente tra le scene esplorando e interagendo con l'arte e l'architettura in modo realistico e informativo e su più livelli.

### 8.2.1 Scelta strategica di *software* e dispositivi per applicazioni VR accessibili

La selezione del *software* è fondamentale nello sviluppo di applicazioni di realtà virtuale, poiché impatta direttamente sulla qualità, flessibilità ed efficienza del processo. Tra le diverse opzioni a disposizione, la scelta di adottare motori di gioco è finalizzata ad ampliare le opportunità di azione del modello. Questi motori, non solo permettono una personalizzazione avanzata della programmazione sia delle singole scene, sia de progetto VR nella sua totalità. Inoltre l'interazione diretta con gli elementi della piattaforma utilizzata, contribuisce a un coinvolgimento più profondo dell'utente anche dal punto di vista psicologico.

Tra questi, *Unity*<sup>6</sup> si distingue come una piattaforma vantaggiosa per molteplici ragioni, configurandosi come strategica e versatile nell'ambito della VR. In particolare, offre un ambiente di sviluppo integrato (IDE)<sup>7</sup> estremamente intuitivo e *user-friendly*<sup>8</sup>; consente di supportare una vasta gamma di piattaforme VR<sup>9</sup>, è compatibile con molti dispositivi e facilita la distribuzione su diversi sistemi, ampliando così la portata dell'applicazione VR sviluppata<sup>10</sup>. Inoltre, in termini di grafica e *rendering*, è noto per la sua potente *engine* che permette la creazione di ambienti VR sorprendentemente realistici e coinvolgenti. La capacità di gestire effetti di illuminazione avanzati, materiali complessi e animazioni fluide contribuisce in modo significativo all'immersione dell'utente nella realtà virtuale e la sua capacità di ottimizzare le performance senza compromettere la qualità grafica è essenziale per garantire un'esperienza fluida e senza interruzioni, dove la latenza<sup>11</sup> e la reattività sono critiche per l'efficacia dell'applicazione. I progetti creati con *Unity* possono tuttavia presentare dimensioni di *file* considerevoli richiedendo una significativa quantità di spazio di archiviazione sui dispositivi VR. In aggiunta, il frequente rilascio di nuove versioni e aggiornamenti, sebbene possa portare a miglioramenti e nuove funzionalità, comporta altresì la necessità di investire tempo ed energie per mantenere i progetti aggiornati e assicurare la piena compatibilità con le versioni più recenti del *software*.



Fig. 8.1 - Menu principale che consente la navigazione tra i vari livelli tramite gli UI Button.

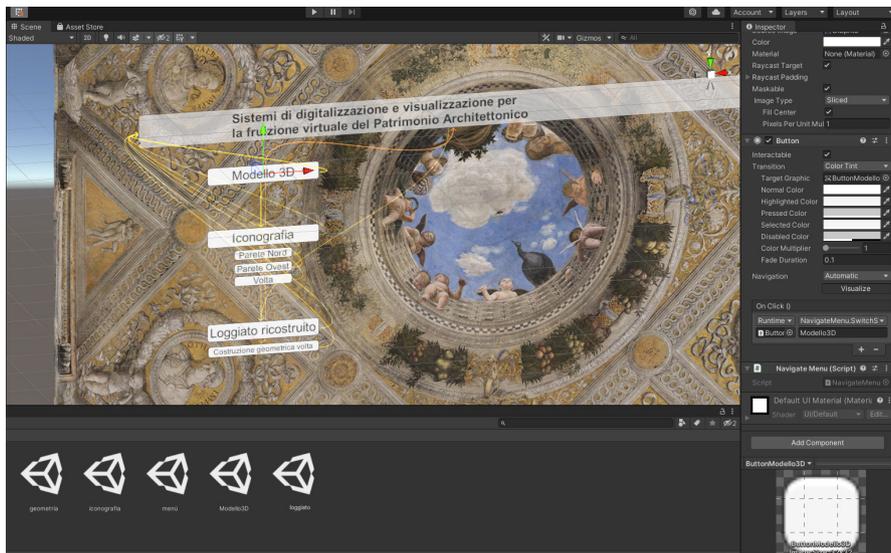
In ogni caso, per la presente sperimentazione, è stato stabilito di usare *Unity* per la versatilità<sup>12</sup>, le avanzate capacità grafiche e l'efficiente gestione delle risorse. Per quanto riguarda il visore VR è stato adottato l'*Oculus Quest 2*<sup>13</sup>. Il sistema di tracking del movimento di *Oculus Quest 2* e i suoi *controller*<sup>14</sup> offrono infatti un'esperienza di gioco immersiva e precisa, consentendo una maggiore interazione con l'ambiente virtuale. Inoltre presenta una configurazione relativamente semplice, rendendo l'esperienza VR accessibile anche per i meno esperti.

Si è scelto di sviluppare il progetto anche in modalità *desktop*, garantendo così l'accessibilità su *computer* tradizionali senza l'obbligo di possedere un visore VR<sup>15</sup>. La realizzazione degli *script*<sup>16</sup> quindi è progettata in modo da garantire la fruizione fluida e ottimizzata sia attraverso l'utilizzo su un *desktop* tradizionale che tramite il visore *Oculus Quest 2*. Ciò implica che gli *script* siano scritti con attenzione per garantire la compatibilità e le prestazioni su entrambe le piattaforme.

Nella pratica, questo include l'ottimizzazione delle risorse e delle interazioni per adattarsi alle specifiche tecniche e ai requisiti di *input* di ciascuna piattaforma, garantendo un'esperienza coerente e di alta qualità sia per gli utenti *desktop* che per coloro che utilizzano il visore.

### 8.3 Analisi delle scene e delle modalità di interazione

Nel contesto della progettazione di esperienze di realtà virtuale, questa ricerca propone un approccio articolato basato su tre scene distintamente definite, caratterizzate da gradi di interazione e approfondimento informativo differente. Tale approccio permette di interpretare la Camera degli Sposi su vari livelli, rendendola accessibile a un ampio spettro di utenti<sup>17</sup>. Le scene sono concepite come livelli progressivi all'interno dell'applicazione di realtà virtuale, ciascuna focalizzata su aspetti specifici della Camera. Si spazia da un livello di fruizione statico, ma ricco di informazioni iconografiche, a una rappresentazione



```
1 using System.Collections;
2 using System.Collections.Generic;
3 using UnityEngine;
4 using UnityEngine.SceneManagement;
5
6 [Script Unity (0 riferimenti ad asset) | 0 riferimenti]
7 public class NavigatoreMenu : MonoBehaviour
8 {
9     0 riferimenti
10     public void SwitchScene(string scenename)
11     {
12         SceneManager.LoadScene(scenename);
13     }
14 }
```

Fig. 8.2 - Menu principale e script che consente lo switch tra le diverse scene a partire dal click sugli UI Button.

## CAPITOLO 8

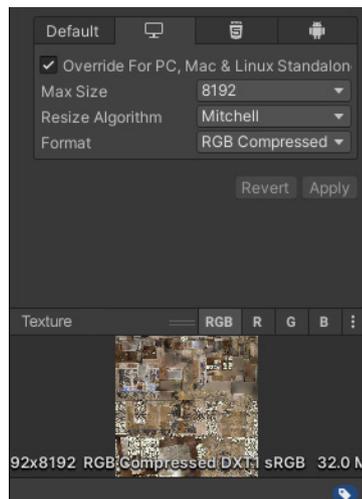


Fig. 8.3 Caratteristiche della texture esportata da RealityCapture e associata al modello in Unity.

dinamica e semplificata del modello 3D, fino a raggiungere un'esperienza del loggiato ricostruito. L'interfaccia iniziale dell'applicazione funge da menu principale e guida l'utente nella navigazione tra i vari livelli - ovvero nella selezione delle varie ambientazioni disponibili - consentendo una personalizzazione dell'esperienza in base ai propri interessi e al livello di interazione desiderato (fig. 8.1). Questa struttura non solo rende l'applicazione intuitiva, ma permette anche una grande flessibilità nell'esplorazione dei contenuti virtuali. Il menu rappresenta dunque la prima esperienza visiva che l'utente sperimenta all'avvio dell'applicazione. Gli elementi che lo connotano sono esclusivamente costituiti da *GameObjects2D*<sup>18</sup> (testi, immagini e pulsanti<sup>19</sup>) integrati nell'Interfaccia Utente<sup>20</sup>.

Operativamente il processo di ricostruzione del menu prende avvio con la creazione di un *GameManager*<sup>21</sup>, ovvero un *GameObject* vuoto che serve da contenitore per i componenti essenziali al funzionamento della scena. A questo *GameManager* è associato un codice in C#, che regola la selezione dei diversi livelli della VR, avvia il percorso esplorativo e assicura una transizione omogenea tra le diverse ambientazioni. Nello specifico, il *GameManager* risponde agli *input* dell'utente, come il movimento del *mouse* o del *controller*, attivando o disattivando gli *UI Button*<sup>22</sup> (fig. 8.2).

La selezione di un *UI Button* determina l'esecuzione della scena correlata e all'interno di ogni livello è stato inserito un pulsante che permette di tornare facilmente al menu principale, rendendo l'esperienza utente intuitiva, flessibile e agevolmente navigabile.

### 8.3.1 L'esplorazione del modello 3D

La prima scena, incentrata sul modello 3D ottenuto dal rilievo della Camera degli Sposi (Cfr. Cap. 3), offre un'esperienza immersiva che, pur essendo limitata in termini di interattività, permette all'utente di muoversi e ruotare liberamente nello spazio virtuale, quasi come se fosse fisicamente presente all'interno dell'ambiente reale.

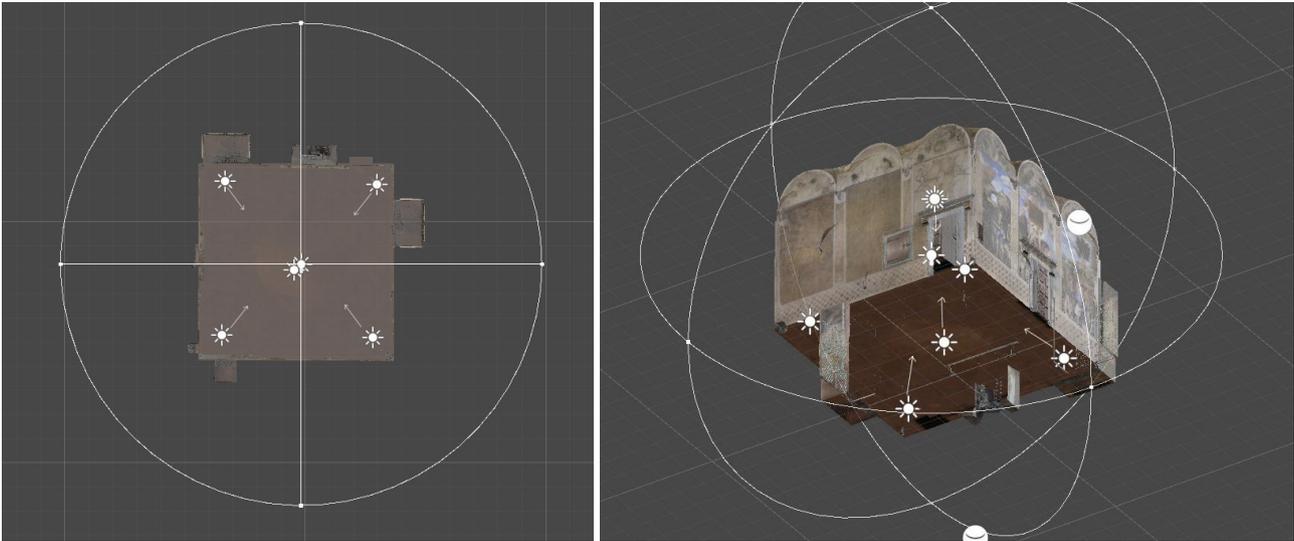


Fig. 8.4 - Posizionamento delle luci all'interno di Unity. Vista dall'alto e assonometrica.

L'acquisizione di conoscenza in questa fase è strettamente legata a ciò che viene visualizzato, per questo la creazione di un ambiente visivamente accattivante e ottimizzato rappresenta un passaggio chiave per garantire un'esperienza coinvolgente. Il processo di creazione ha inizio con l'importazione della *mesh* decimata e smussata in formato .obj (Cfr. Cap. 5) e l'applicazione di una *texture* ad alta risoluzione<sup>23</sup> (fig. 8.3).

L'illuminazione è stata calibrata per evocare un'atmosfera realistica tramite una strategia per prevenire zone troppo scure o eccessivamente illuminate, introducendo quattro *directional light*<sup>24</sup> agli angoli della scena, ciascuna con un'intensità di 0.5 e colore bianco. Vengono aggiunte poi luci dirette verso la volta e il pavimento, con le stesse caratteristiche, e una *point light*<sup>25</sup> al centro della scena per mitigare le ombre. Questa configurazione luminosa assicura una rappresentazione visiva equilibrata e dettagliata all'interno dell'ambiente *Unity* (fig. 8.4). Successivamente, si è proceduto all'implementazione della *MainCamera*<sup>26</sup>, che svolge un ruolo fondamentale agendo come gli occhi virtuali dell'utente nella scena.

## CAPITOLO 8

Durante questa fase, si è puntato a definire con precisione la prospettiva e l'esperienza visiva volute, integrando degli *script* specifici per il movimento e la rotazione completa a 360 gradi, garantendo così un'esperienza di spostamento fluida e una visione panoramica completa dell'ambiente. Inoltre, per simulare il comportamento derivato dagli *input* esterni, è stato creato un *player*<sup>27</sup> associando a un *GameObject* vuoto la *MainCamera* per la visualizzazione, un *collider*<sup>28</sup>, un *rigid body*<sup>29</sup> e uno *script* di programmazione<sup>30</sup> (fig. 8.5).

Tale configurazione ha permesso di riprodurre fedelmente il movimento dell'utente all'interno della scena, offrendo così un'esperienza di navigazione realistica e immersiva.

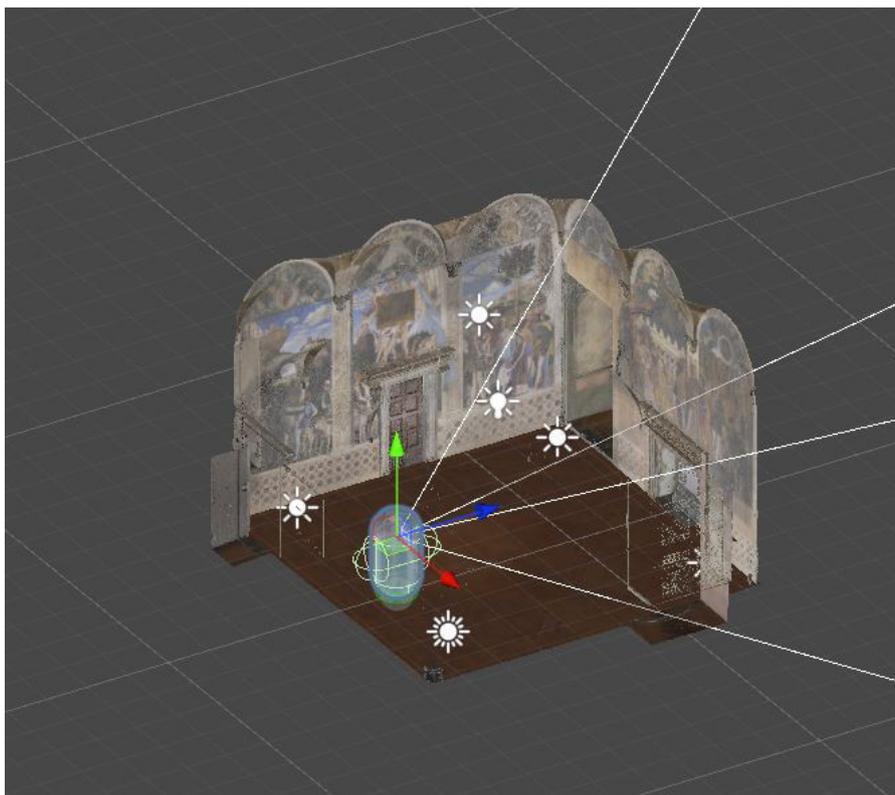
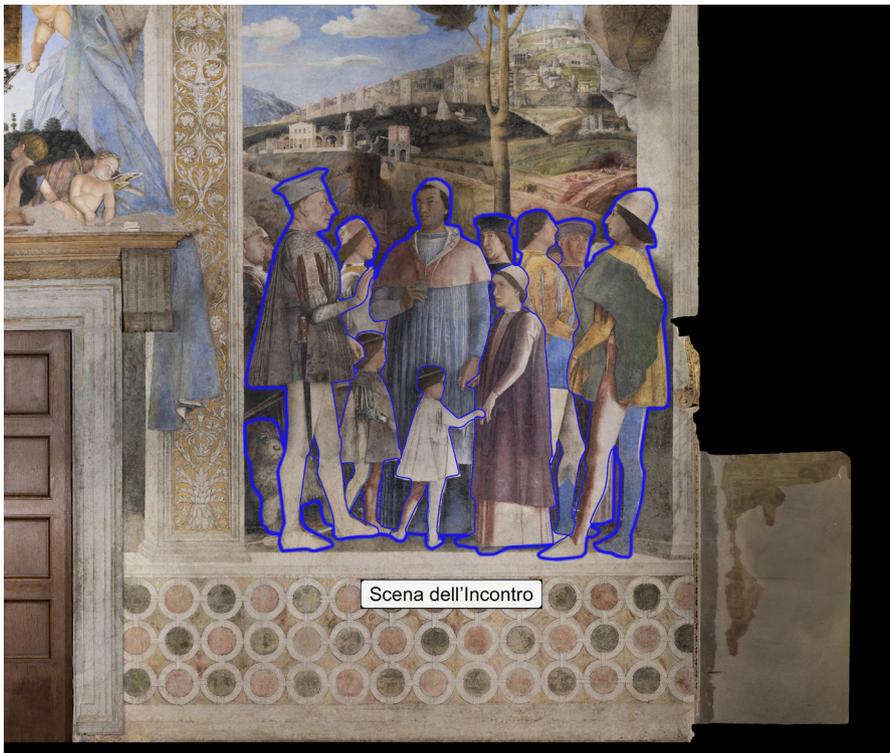


Fig. 8.5 Posizionamento della *MainCamera* all'interno di una capsula per simulare i comportamenti del fruitore.

### 8.3.2 Esplorazione iconografica in realtà virtuale

La seconda scena si concentra sull'analisi iconografica, offrendo la possibilità di interagire con i singoli personaggi e paesaggi rappresentati negli affreschi, sia attraverso *desktop* che tramite visore. Questa opzione del sistema apre le porte all'esplorazione e alla descrizione dettagliata degli episodi specifici sulla volta e sulle pareti nord e ovest, visualizzati staticamente tramite ortofoto<sup>31</sup> (Cfr. Cap. 4).

Questa scena permette due livelli di lettura, uno globale che si attiva tramite gli *UI Button*, ed un altro più specifico che si attiva cliccando su ogni singolo componente o personaggio. I pulsanti, situati al di sotto degli episodi principali danno accesso al contenuto descrittivo.



*Fig. 8.6 - Pulsante posizionato sotto alla scena dell'Incontro nella parete ovest. Al passaggio del mouse i personaggi si illuminano di blu.*

## CAPITOLO 8



Fig. 8.7 - Selezione di uno dei busti presenti sulla volta tramite controller. Al passaggio del raggio il busto si illumina di bianco.

La loro selezione mette in risalto i personaggi principali della narrazione colorandoli di blu ed attiva delle schede *pop-up* in cui sono descritte le vicende storiche associate alla scena selezionata, aggiungendo, di fatto, un nuovo strato narrativo alla rappresentazione (fig. 8.6).

Questo elemento interattivo permette agli utenti di esplorare in profondità le varie scene dell'affresco, guidati da una presentazione dettagliata.

Nel secondo livello di interazione, si ha la possibilità di esaminare più in dettaglio i particolari. Al passaggio del *mouse* o del *controller*, i personaggi si illuminano di rosso, il paesaggio di verde e i dettagli minuti di giallo.

Questa modalità si applica anche ai busti degli imperatori romani e alle lunette della volta, che si tingono rispettivamente di bianco e arancione (fig. 8.7). Mediante uno *script* progettato *ad hoc*, cliccando su un elemento si attiva una finestra *pop-up* che mostra didascalie esplicative, arricchendo ogni componente dell'opera con informazioni minuziose (Cfr. Cap. 4).

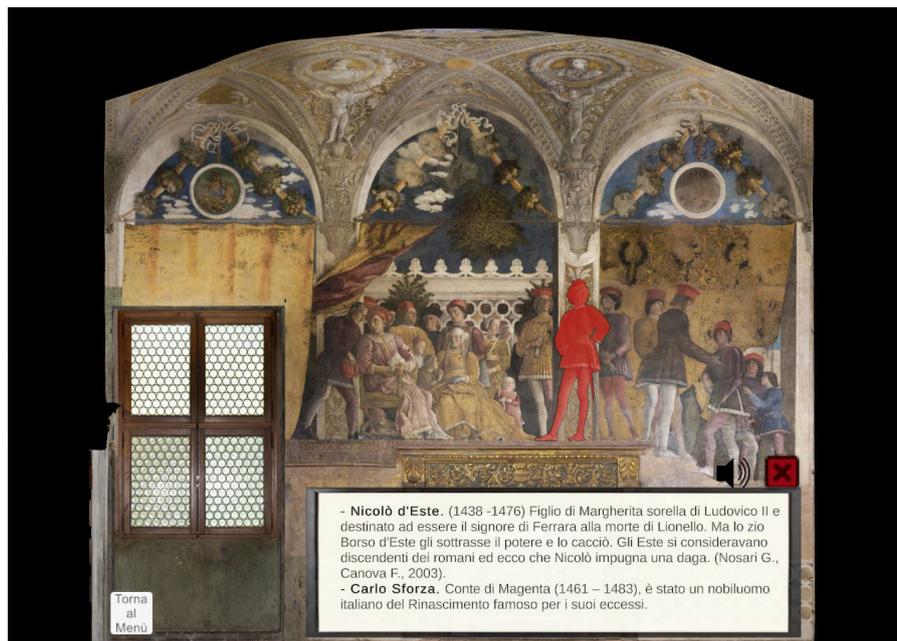


Fig. 8.8 - Pop-up che si apre al click su un personaggio. Nel caso di dubbia identità sono elencate le diverse attribuzioni con le relative fonti.

Selezionando un soggetto, la sua *silhouette* resta evidenziata fino a quando non si chiude la finestra *pop-up* (fig. 8.8). È stata inoltre integrata la funzionalità di ascolto delle descrizioni tramite un pulsante dedicato. Questa metodologia multilivello fornisce un'esperienza interattiva dettagliata, favorendo una comprensione immersiva e completa delle opere d'arte esposte.

### 8.3.3 Ricostruzione 3D del loggiato e analisi degli affreschi

La terza opzione offre la transizione dalla visualizzazione della *mesh* texturizzata alla ricostruzione in 3D del loggiato di Mantegna. Attivabile tramite un pulsante dedicato presente nel menu o direttamente dalla prima scena, questa funzionalità 'teletrasporta' virtualmente l'utente nel loggiato, consentendo di passare senza sforzi da una scena all'altra. Qui, gli utenti possono esplorare in dettaglio la struttura tridimensionale ricostruita, arricchendo così l'esperienza con un ulteriore livello di approfondimento. Il loggiato è stato caratterizzato dall'utilizzo di *texture* ottenute direttamente dagli affreschi<sup>32</sup> (fig. 8.9).

Per analizzare e interpretare in modo più approfondito gli affreschi, si è scelto di superare la 'semplice' superficie bidimensionale, procedendo



Fig. 8.9 - Vista sulle pareti sud-est del loggiato ricostruito nella terza scena.

## CAPITOLO 8

a una destrutturazione degli stessi per esplorare i diversi livelli e la profondità delle rappresentazioni.

Una prima lettura ha quindi permesso di identificare gli oggetti rappresentati nell'affresco, quali alberi, montagne, edifici e figure umane e di classificarli sulla base delle dimensioni presentate, dando luogo ad una gerarchia visiva chiara.



*Fig. 8.10 - In alto: vista della parete nord; in basso: vista della parete ovest a partire dal centro del loggiato ricostruito.*

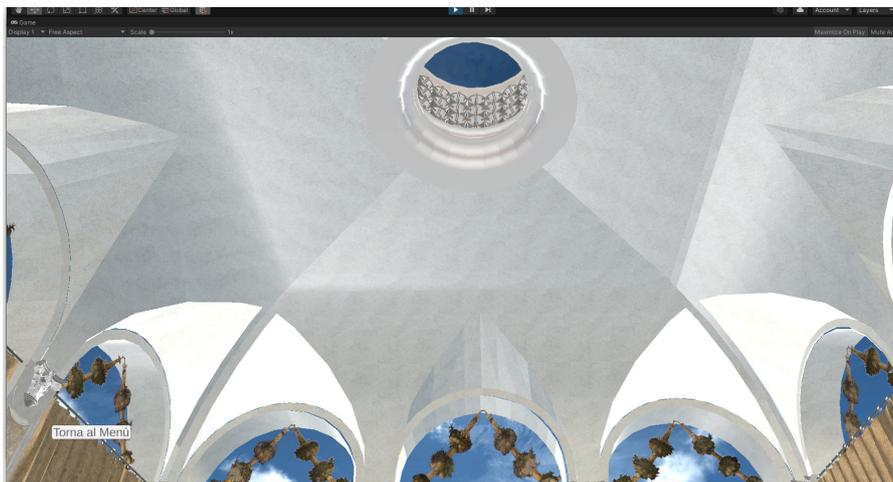


*Fig. 8.11 - Vista del loggiato ricostruito all'interno della sky box e con l'affresco strutturato in diversi livelli.*

Tale gerarchia è stata in seguito riproposta nella scena 3D creando diversi piani di profondità ed organizzando i vari elementi digitali omologhi agli oggetti affrescati affinché la vista risultante dal centro della scena simulasse la percezione visiva reale dell'affresco. Dall'analisi delle ortofoto si evince chiaramente che tutte le pareti sono unite da raffinate ghirlande, collocate all'altezza delle lunette e sovrastate da un cielo azzurro punteggiato da nuvole leggere. Sotto di esse, sulle pareti sud e est, è ritratta una tenda chiusa, mentre sulle altre due pareti e sulla volta sono presenti affreschi ricchi di personaggi e dettagli (Cfr. Cap. 4). Nel caso della parete nord è evidente la divisione in tre livelli: un primo piano con le figure<sup>33</sup>, un secondo piano con la vegetazione e la parete verticale, e infine un terzo livello con l'albero che spicca nella zona centrale. La parete ovest invece si distingue per una stratificazione più articolata, con la vegetazione e il paesaggio<sup>34</sup> che si dispiegano su molteplici livelli dietro le figure rappresentate (fig. 8.10).

## CAPITOLO 8

Fig. 8.12 - Vista della copertura del loggiato ricostruito con la balaustra semicircolare. In basso a sinistra è presente il pulsante per passare alla scena con le varie fasi della costruzione geometrica della volta.



Per garantire un cielo continuo attraverso tutte le aperture, è stata implementata una *skybox*<sup>35</sup> che avvolge l'intero modello. Questa *skybox* presenta un cielo azzurro e alcune nuvole, simulando lo sfondo dell'affresco.

La posizione esterna della fonte di luce, che emula la posizione del sole, assicura un'illuminazione realistica con fasci di luce che penetrano attraverso il loggiato, enfatizzando dettagli e *texture* mediante un suggestivo gioco di luci e ombre (fig. 8.11).

La scena descritta è dinamica e questo consente una visione panoramica dell'ambiente circostante e permette di ammirare la balaustra cilindrica, attentamente ricostruita sulla base delle teorie precedentemente esposte (Cfr. Cap. 7), che aggiunge un ulteriore livello di dettaglio e autenticità alla scena. Diversamente dalle scene precedenti, accanto al pulsante che consente di ritornare al menu principale, si trova un secondo *Ui Button* dedicato all'esplorazione geometrica della volta.

Al *click* del pulsante si attiva una schermata statica dove emergono le sequenze costruttive della volta (Cfr. Cap. 6); questa funzionalità non solo arricchisce l'esperienza visiva, ma fornisce anche un contesto educativo che approfondisce la comprensione dell'architettura della volta (fig. 8.12).

Interagendo con i pulsanti situati nella parte bassa dello schermo, che rappresentano le varie fasi, si apre il modello semplificato corrispondente. Ogni modello si allinea perfettamente con quello precedente, evidenziando con immediatezza ogni modifica apportata. Gli elementi sono interattivi: possono essere afferrati, spostati e ruotati, offrendo un'analisi dettagliata sia in modalità *desktop* che tramite i *controller* del visore VR<sup>36</sup> (fig. 8.13).

Questa funzionalità consente agli utenti di immergersi nella complessità architettonica e di comprendere più a fondo il processo costruttivo della volta.

La manipolazione e la rotazione degli elementi arricchiscono l'esperienza, incrementando il livello di coinvolgimento e apprendimento, e permettendo di valorizzare la complessità e la maestria ingegneristica della struttura.

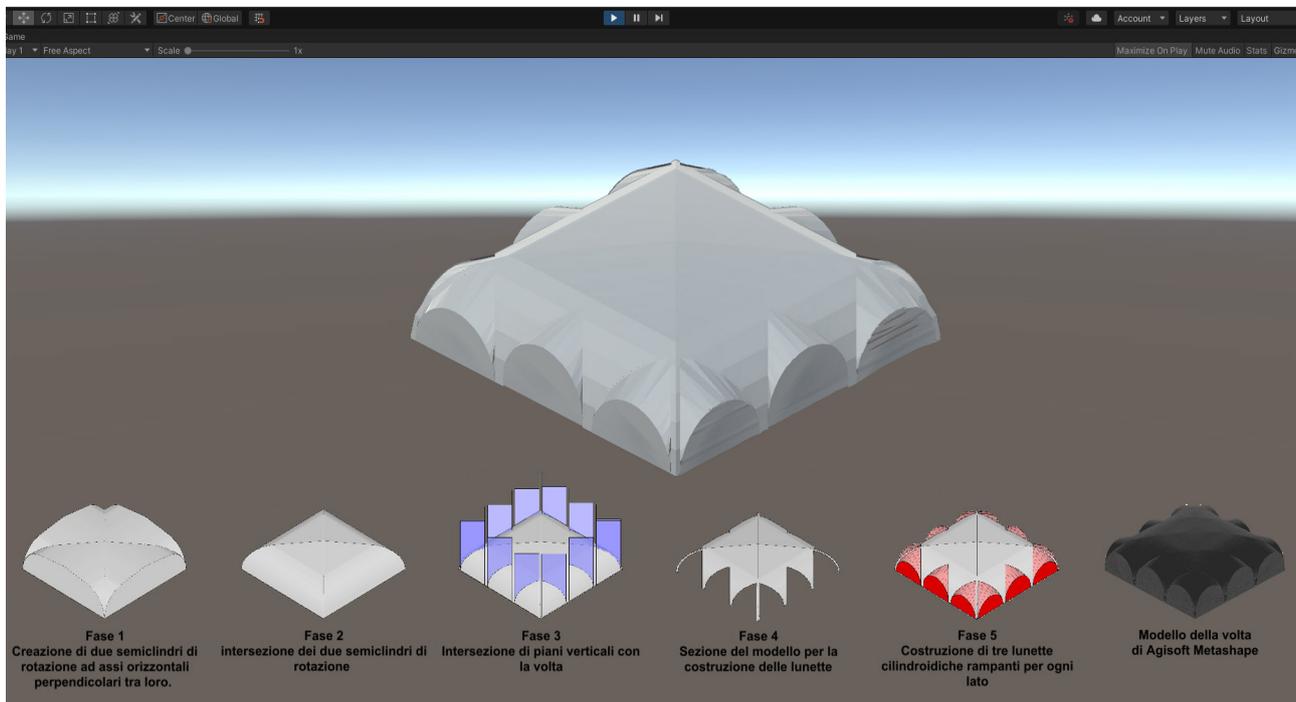


Fig. 8.13 - Pulsanti delle diverse fasi della costruzione geometrica che attivano i modellini ruotabili e afferrabili.

## CAPITOLO 8

Questa terza scena arricchisce notevolmente l'esperienza complessiva, fornendo un'opportunità unica di esplorare e comprendere il loggiato di Mantegna in modo dettagliato e coinvolgente.

L'analisi multidimensionale degli affreschi paesaggistici, con una particolare attenzione alla divisione dei livelli e alla gerarchia visiva, si traduce in un'esperienza interattiva più ricca.

Questa opzione consolida l'approccio educativo e la profondità interpretativa, elevando l'esperienza virtuale a una vera e propria immersione nel mondo dell'arte rinascimentale.

Vivere l'esperienza della realtà virtuale attraverso un modello ricreato da affreschi prospettici offre un vantaggio ineguagliabile, permettendo di immergersi in un mondo altrimenti inaccessibile.

La trasposizione in un ambiente virtuale consente agli utenti di esplorare in modo completo le opere d'arte, interagendo in modo dinamico e scoprendo dettagli che non esistono nella realtà.

Questo sistema consente di esplorare dettagli minuziosi o aree altrimenti poco visibili a occhio nudo, permettendo approfondimenti puntuali della scena.

L'adozione di questa applicazione per le visite al Palazzo Ducale promuoverebbe una comprensione più approfondita della Camera, migliorando notevolmente anche la gestione del flusso di persone. Attualmente vincolato da restrizioni di tempo e da un numero massimo di partecipanti, il flusso di visitatori potrebbe beneficiare della tecnologia, consentendo ai visitatori di esplorare in modo autonomo e approfondito, parallelamente alla visita sul posto.

Questo approccio potrebbe ridurre la dipendenza da restrizioni rigide, migliorare l'esperienza complessiva dei visitatori e favorire una maggiore accessibilità culturale.

## Note

1 *Game engine* (motore di gioco) è un *software* progettato per semplificare e accelerare il processo di sviluppo di videogiochi, simulazioni o altre applicazioni interattive in tempo reale. Questo tipo di *software* fornisce un insieme di strumenti e funzionalità predefinite che consentono agli sviluppatori di creare, progettare e implementare giochi senza dover costruire tutto da zero.

2 La *computer graphics and animation* si occupa della creazione, manipolazione e rappresentazione visiva di immagini digitali attraverso l'uso di *software* e algoritmi. Include la progettazione grafica, l'animazione di oggetti e personaggi, contribuendo a sviluppare visivamente contenuti interattivi, videogiochi, film d'animazione e simulazioni virtuali.

3 Il *tracking* nell'ambito della realtà virtuale è un processo mediante il quale il movimento e la posizione di un dispositivo o di un utente vengono rilevati e registrati in tempo reale. Questa tecnologia è fondamentale per garantire un'esperienza immersiva e interattiva nella realtà virtuale.

4 *Input* si riferisce alle interazioni dell'utente con il gioco o applicazione. Possono provenire da diverse sorgenti, come tastiere, *mouse*, *controller* di gioco, *touch screen* o dispositivi di realtà virtuale come *Oculus Touch* per *Oculus Quest 2*. *Unity* fornisce una serie di API e strumenti per gestire gli *input* in modo da poter rispondere alle azioni dell'utente.

5 I 'pannelli *pop-up*' sono elementi grafici che compaiono dinamicamente sopra il contenuto principale di un'interfaccia utente, fornendo informazioni aggiuntive o opzioni interattive. Solitamente appaiono in risposta a un'azione dell'utente, offrendo dettagli contestuali senza compromettere l'esperienza visiva principale.

6 *Unity* è un motore grafico multiplatforma sviluppato da *Unity Technologies* che consente lo sviluppo di videogiochi e altri contenuti interattivi, quali visualizzazioni architettoniche o animazioni 3D in tempo reale.

7 Un *software* che fornisce un ambiente unificato per la scrittura, la modifica, la compilazione e il *debugging* del codice sorgente di un'applicazione, semplificando il processo di sviluppo *software* per gli sviluppatori. Incorpora strumenti come editor di codice, compilatori, *debugger* e gestione del progetto in un'unica interfaccia.

## CAPITOLO 8

8 La sua interfaccia grafica semplifica il processo di creazione, consentendo agli sviluppatori di concentrarsi maggiormente sulla realizzazione delle idee senza dover affrontare ostacoli complicati legati alla programmazione.

9 Visori *Oculus Rift*, *HTC Vive*, o piattaforme mobile come *Oculus Quest*.

10 Un altro punto cruciale è la comunità attiva di sviluppatori e il vasto ecosistema di risorse online fornito da *Unity*. La possibilità di accedere a *forum*, *tutorial*, e documentazione dettagliata semplifica il processo di risoluzione dei problemi e l'apprendimento continuo, accelerando lo sviluppo e consentendo agli sviluppatori di rimanere aggiornati sulle ultime tecniche e *best practices*.

11 Il periodo di tempo che intercorre tra l'*input* dell'utente (come un movimento o un'azione) e la percezione della risposta nell'applicazione VR. La riduzione della latenza è cruciale per garantire che l'esperienza virtuale sia fluida e reattiva, poiché la presenza di un ritardo può compromettere l'immersione dell'utente e la qualità complessiva dell'applicazione.

12 Il *software* può efficacemente soddisfare una varietà di esigenze su diverse piattaforme.

13 Un visore VR *stand-alone*, il che significa che non richiede cavi o connessioni a un PC o a una *console*. Questa caratteristica offre maggiore libertà di movimento durante l'esperienza VR, rendendo l'applicazione più flessibile e accessibile.

14 I *controller* sono dotati di sensori di tracciamento che consentono di rilevare il movimento e la posizione delle mani dell'utente nello spazio virtuale. Ogni *controller* dispone di pulsanti, grilletti e sensori di *input* tattile, offrendo un'interazione intuitiva e immersiva con l'ambiente virtuale. Gli utenti possono utilizzare i *controller Oculus Quest 2* per navigare, interagire con gli oggetti virtuali e partecipare attivamente alle esperienze di realtà virtuale.

15 La modalità *desktop* di un progetto VR rappresenta un'opzione consigliabile, soprattutto considerando che alcune persone possono avvertire malessere utilizzando il visore (la cinetosi è ciò che più comunemente chiamata *Motion Sickness* è causata da un conflitto di più segnali sensoriali: il sistema visivo fa percepire un movimento corporeo, ma il senso dell'equilibrio no). Attivare questa modalità non solo offre un'alternativa confortevole per chi soffre di nausea virtuale, ma amplia anche l'accessibilità del progetto, consentendo a un pubblico più ampio di fruirne senza dover indossare un visore VR.

16 Lo *script* è un *file* di testo scritto in un linguaggio di programmazione supportato, come C# o *JavaScript*. In questo caso sono utilizzati per definire il comportamento degli oggetti nell'ambiente di gioco e gestire le interazioni. Questi *script* contengono funzioni, variabili e logica di controllo del flusso che consentono di creare comportamenti personalizzati per gli elementi presenti. Gli *script* sono quindi collegati agli oggetti specifici nella scena e vengono eseguiti durante l'esecuzione del gioco.

17 L'analisi delle scene evidenzia un punto fondamentale: l'importanza della connessione tra l'ambiente virtuale, il profilo dell'utente, le sue aspettative, le conoscenze pregresse e l'apertura verso le nuove tecnologie. Si pone particolare attenzione alla differenza tra utenti esperti e neofiti, poiché questa distinzione è decisiva nel determinare se privilegiare aspetti più tecnici o divulgativi nelle scene. Una comprensione approfondita di questi elementi è essenziale per creare un'esperienza su misura e immersiva per l'utente.

18 Un *GameObject* è un elemento fondamentale nel motore di gioco *Unity*, rappresentante un oggetto virtuale all'interno dello spazio di gioco. Essi possono contenere componenti che definiscono comportamenti, aspetti grafici e interazioni all'interno dell'ambiente di gioco.

19 Durante la fase di creazione, questi elementi principali governano le funzioni fondamentali dell'esecuzione della scena, principalmente tramite l'utilizzo di *UI Button* e *script* di programmazione.

20 L'Interfaccia Utente (UI) di *Unity* è l'ambiente grafico e interattivo che consente agli sviluppatori di progettare e gestire gli elementi visivi del loro gioco o applicazione. *Unity* fornisce strumenti intuitivi per creare bottoni, finestre, testo e altri elementi, facilitando la creazione e la personalizzazione dell'esperienza utente.

21 Il *GameManager* è un componente cruciale nei giochi, gestendo l'organizzazione e il controllo generale della logica di gioco. Si occupa di coordinare eventi, gestire le risorse e controllare lo stato del gioco, contribuendo a garantire una coerenza e fluidità nell'esperienza di gioco.

22 *UI Button* è un componente dell'interfaccia utente che fornisce un elemento cliccabile in un'applicazione, spesso utilizzato per attivare azioni o cambiare lo stato dell'*App* in risposta all'interazione dell'utente.

## CAPITOLO 8

23 Per associare la *texture* viene creato un materiale apposito che abbia come immagine la *texture* esportata da *RealityCapture*. Per ottenere una resa visiva realistica sono state impostate le seguenti caratteristiche:

- *Max Size 8192*: Questa specifica indica la dimensione massima consentita per il materiale, espressa in *pixel*. In questo caso, il materiale non deve superare le dimensioni di 8192 x 8192 *pixel*.

- *Resize Algorithm Mitchell*: L'algoritmo di ridimensionamento 'Mitchell' è un metodo utilizzato per scalare un'immagine o una *texture*. L'algoritmo Mitchell è progettato per ottenere un buon bilanciamento tra la nitidezza dei dettagli e la morbidezza dei bordi durante il ridimensionamento.

- *Format RGB Compressed*: indica il formato di compressione dei colori utilizzato per rappresentare l'immagine. Il formato RGB compressed suggerisce che i dati dei colori sono compressi per ridurre lo spazio di archiviazione senza perdita significativa di qualità visiva. La compressione RGB di solito conserva le informazioni sui canali di colore rosso, verde e blu. Queste specifiche mirano a ottimizzare l'utilizzo delle risorse grafiche, fornendo un buon equilibrio tra qualità e prestazioni all'interno di un'applicazione *Unity*.

24 È un tipo di illuminazione, che emette la luce in una specifica direzione, simile alla luce solare. Questo tipo di illuminazione crea ombre sulla scena e influenza l'aspetto generale dell'ambiente virtuale.

25 È una luce che si trova in un punto della scena ed emette luce in tutte le direzioni equamente [[www.Unity3d.com](http://www.Unity3d.com)].

26 È la telecamera principale nel contesto di una scena di gioco o applicazione. Essa rappresenta il punto di vista predeterminato attraverso il quale gli oggetti della scena vengono visualizzati e può essere personalizzata per gestire aspetti come la prospettiva e l'illuminazione.

27 Può essere un personaggio, un veicolo o qualsiasi altro oggetto interattivo nell'ambiente di gioco. In molti casi, è associato a una telecamera che rappresenta il punto di vista del giocatore nel mondo virtuale.

28 Componente associato a un *GameObject* che definisce la sua forma e la sua area di rilevamento per interazioni fisiche con altri oggetti nella scena di gioco. Possono avere forme diverse, come scatole, sfere, capsule, *mesh* personalizzate, e aiutano a determinare quando due oggetti entrano in contatto o si sovrappongono nello spazio virtuale del gioco.

29 Componente associato a un *GameObject* che consente di applicare la fisica ai suoi movimenti. Quando un *GameObject* ha un *Rigidbody*, risponde alle forze esterne come la gravità, le collisioni e le forze applicate dallo *script*.

30 Al fine di prevenire la caduta della telecamera al di sotto del pavimento o l'uscita oltre i limiti delle pareti, è stato applicato un ulteriore *script collider* all'intera *mesh*.

31 La configurazione della scena prevede un punto di vista statico, con la *MainCamera* posizionata in modo fisso, garantendo efficacia nell'analisi sia delle facce del modello che delle ortofoto dei prospetti. La decisione di utilizzare le ortofoto in questa scena è guidata dalla volontà di ottimizzazione e dalla necessità di immagini ad altissima risoluzione, ideali per l'indagine iconografica.

32 I materiali associati ad ogni elemento del loggiato sono stati creati a partire da campioni di materiale presi direttamente dall'affresco e associati come immagine alla proprietà principale del materiale.

33 Il primo piano è ulteriormente suddiviso in piani distinti che ricreano la gerarchia delle figure, posizionate davanti o dietro ai pilastri.

34 L'analisi degli edifici raffigurati, pur non essendo sempre certi nelle proporzioni, ha reso possibile stimare la loro distanza dal punto focale di osservazione, consentendo così di delineare una prospettiva spaziale precisa.

35 Una *skybox* è una tecnica di *rendering in computer grafica* che simula il paesaggio circostante a un ambiente tridimensionale. È composta da sei immagini panoramiche, generalmente formando un cubo virtuale, che creano un'illusione di uno sfondo realistico e continuo.

36 Il tutto reso possibile da *script* dedicati che ne migliorano l'interattività e l'usabilità.



## CONCLUSIONE

L'indagine condotta ha dimostrato come le tecniche di rilievo digitale, integrate con strumenti di modellazione e ambienti immersivi, possano costituire un valido supporto per la conoscenza, la documentazione e la valorizzazione del Patrimonio Storico-Architettonico. L'applicazione alla Camera degli Sposi ha permesso di sperimentare un processo metodologico che, partendo dall'acquisizione dei dati, giunge fino alla costruzione di un'esperienza interattiva in realtà virtuale, in grado di restituire in modo accessibile e coinvolgente la complessità del manufatto. Il valore di questo percorso non risiede soltanto nei risultati ottenuti, ma soprattutto nella possibilità di individuare linee guida replicabili, capaci di integrare dati metrici e iconografici, informazioni storiche e modelli interattivi. Tale approccio si propone come strumento non solo per gli studiosi e gli specialisti, ma anche per un pubblico più ampio, contribuendo a una fruizione del patrimonio che supera i confini tradizionali e si apre a modalità partecipative. L'uso della realtà virtuale, se da un lato introduce nuove opportunità di accesso e di disseminazione, dall'altro impone una riflessione critica sulle questioni di sostenibilità tecnologica, di obsolescenza dei dispositivi e di progettazione dell'esperienza. In questo equilibrio tra potenzialità e limiti si colloca la sfida futura: sviluppare sistemi capaci di unire affidabilità scientifica e capacità comunicativa, rispettando i valori intrinseci dei manufatti e, al contempo, amplificando la loro accessibilità.

## CONCLUSIONE

La ricerca presentata non intende proporsi come punto di arrivo, ma come tappa intermedia di un percorso che richiede ulteriori sperimentazioni, confronti e verifiche. Le prospettive aperte dall'integrazione tra rilievo digitale, modellazione 3D e realtà virtuale delineano infatti un campo di indagine ancora in espansione, destinato a incidere profondamente sulle pratiche di documentazione e valorizzazione del Patrimonio Culturale. In tale orizzonte, il contributo della rappresentazione non si limita alla registrazione del reale, ma diventa veicolo di conoscenza, ponte tra passato e presente, strumento di dialogo tra discipline e comunità diverse.

## INTRODUZIONE ALL'APPENDICE

Le appendici raccolgono il quadro teorico e metodologico che costituisce la base della ricerca, ma che, per ragioni di chiarezza espositiva, è stato collocato alla fine del volume. In questa sezione sono presentati, in forma articolata, gli strumenti e i riferimenti disciplinari relativi alle tecniche di rilievo, ai sistemi topografici, ai metodi di modellazione 3D e alle potenzialità delle tecnologie immersive per la valorizzazione del patrimonio costruito. Questi contenuti non rappresentano un fine in sé, ma definiscono il sistema di strumenti e procedure attraverso cui è stato possibile sviluppare la ricerca applicativa illustrata nei capitoli principali. L'Appendice è suddivisa in quattro sezioni tematiche (A-D), corrispondenti rispettivamente a:

A - Metodologie e strumenti per il rilievo e la documentazione del Patrimonio Architettonico;

B - Inquadramento topografico;

C - Modellazione 3D;

D - Tecnologie virtuali per la comunicazione e valorizzazione.

Questa articolazione consente di approfondire selettivamente i diversi aspetti metodologici, mantenendo al contempo la linearità della narrazione principale.

## **INTRODUZIONE ALL'APPENDICE**

Le Appendici A–D costituiscono dunque una ricognizione dello stato dell'arte sui metodi di rilievo e rappresentazione digitale, offrendo una base di conoscenza scientifica a partire dalla quale si è sviluppata la ricerca sperimentale. Esse rappresentano il fondamento teorico e tecnico del percorso operativo illustrato nei capitoli centrali del volume.

## APPENDICE A

### Metodologie e strumenti per la conservazione e la valorizzazione

Negli ultimi decenni, le tecniche di rilievo e modellazione 3D basate su sensori attivi e passivi hanno subito un'evoluzione continua, accompagnata dallo sviluppo di sistemi sempre più performanti per la visualizzazione di dati digitali. Queste metodologie hanno dimostrato un valore aggiunto significativo nell'ambito della divulgazione e della conoscenza del Patrimonio Architettonico. In particolare, è emerso chiaramente il contributo attivo che le tecnologie 3D possono fornire nella fase interpretativa, nella conservazione e archiviazione dei dati e nella valorizzazione dei beni culturali attraverso il *web* o altri supporti [Russo *et al.*, 2011]. La crescente richiesta di tutela e divulgazione e l'impiego sempre più frequente delle tecniche di rilievo digitale e modellazione tridimensionale evidenziano l'interesse suscitato da queste metodologie applicate sul patrimonio nazionale e internazionale. Tuttavia, è essenziale sottolineare che l'impiego di strumenti di rilievo digitale, modellazione tridimensionale e altre tecnologie innovative si inserisce all'interno di un processo conoscitivo ben strutturato. Questo processo richiede particolare attenzione nella fase di integrazione con le metodologie tradizionali utilizzate nella conservazione e nello studio del Patrimonio Culturale. La definizione di un sistema conoscitivo che integri tutte queste forme di analisi rappresenta il risultato di un processo che coinvolge diverse competenze e professioni, accomunate dall'obiettivo comune di comunicare e condividere conoscenze [Guidi, Russo, Beraldin, 2010].

La conservazione e la valorizzazione del Patrimonio Architettonico richiedono approcci e strumenti efficaci per acquisire, documentare e rappresentare in modo accurato i manufatti storico-architettonici. Le metodologie e gli strumenti geomatici<sup>1</sup>, in particolare quelli basati sul rilievo e modellazione 3D, offrono un'ampia gamma di soluzioni per affrontare queste sfide.

## APPENDICE A

Tuttavia, è fondamentale comprendere appieno le potenzialità e i limiti di tali metodologie e strumenti, nonché la necessità di integrarli con le pratiche tradizionali, l'osservazione sul posto e la ricerca bibliografica per ottenere risultati ottimali nella conoscenza del Patrimonio Architettonico.

### **A.1 La documentazione del Patrimonio Architettonico e i sistemi di rilievo *reality-based***

Ogni manufatto reca in sé una grande quantità di informazioni relativamente alla sua storia, alle sue trasformazioni, alle sue specificità materiche, costruttive e compositive e per questo sussiste l'esigenza di predisporre documentazioni aggiornate che consentano di poterne comprendere i significati. Attualmente esiste una tendenza a rendere tali informazioni disponibili e accessibili in modo che i fruitori siano sempre più consapevoli del valore della ricchezza che li circonda.

Gli sviluppi del digitale hanno dato importanti contributi per la documentazione, la conservazione, il monitoraggio e lo studio del Patrimonio Culturale. Il manufatto viene acquisito digitalmente per intero e nel dettaglio e ciò consente di procedere con letture critiche ed interpretative nello spazio virtuale del *computer*, di un visore o di un cellulare.

L'approccio al rilievo è sempre un'operazione delicata poiché ogni bene porta con sé numerose complessità per le sue singolarità materiche e costruttive, per le sue vicende storiche e per il rapporto con il contesto in cui si colloca. Le discipline del Rilievo e della Rappresentazione sono fondamentali perché consentono di intraprendere un approfondito percorso di conoscenza del bene a partire dalla sua lettura critica.

Il rilievo infatti non si deve affrontare come una mera operazione di misurazione, ma come uno strumento che induce a studiare il manufatto anche negli aspetti non immediatamente visibili, ma comunque significativi per la sua comprensione.

Le tecnologie attuali sfruttano le tecnologie *reality-based*<sup>2</sup> e consentono di ottenere grandi quantità di dati attraverso processi *no-contact*<sup>3</sup> trovando notevole riscontro soprattutto nel campo dei Beni Culturali, laddove riducono al minimo l'impatto sull'opera garantendo, al contempo, una conoscenza approfondita del bene [Voltini *et al.*, 2006; Remondino, 2011]. I risultati in uscita sono dei cloni virtuali della realtà che si presentano sotto forma di nuvole di punti e che restituiscono anche

informazioni di tipo metrico. Considerando il fatto che queste strumentazioni rilevano indifferentemente tutto ciò che è presente nel loro campo visivo appare evidente che il risultato è acritico e al contempo ricco di informazioni sovrabbondanti<sup>4</sup> che devono essere filtrate attraverso l'interpretazione e l'eventuale decimazione dei punti [Scandurra, 2020]. La preparazione del rilevatore e la corretta gestione critica di tutte le fasi operative di un rilievo digitale rappresentano, pertanto, gli aspetti fondamentali per la produzione di elaborati affidabili e utili alla lettura completa del manufatto, “dopotutto, il rilievo di un'opera architettonica non è solo misurazione e registrazione dell'informazione metrica, ma anche ipotesi critica di conoscenza. È il presupposto per la comprensione della ratio che ha generato quelle particolari forme e per la realizzazione di un modello interpretativo della realtà, fortemente legato alla cultura di chi lo esegue e soprattutto condizionato dal punto di vista e dalla capacità di lettura dello stesso” [De Rubertis, 1994].

## **A.2    Principali tecniche *reality-based***

Le tecnologie di rilievo tridimensionale *reality-based* sono in grado di acquisire i dati dimensionali di un manufatto anche relativamente al contesto in cui si colloca con elevata precisione ed accuratezza, con il vantaggio di poter operare letture mirate anche in tempi successivi e in funzione di obiettivi specifici.

Le principali tecniche *reality-based* di rilievo digitale si possono classificare in due macro categorie: tecniche basate su sensori passivi (metodi *image-based*)<sup>5</sup> e tecniche basate su sensori attivi (metodi *range-based*)<sup>6</sup>. Dall'analisi e dal confronto dei risultati, emerge che se da un lato l'elevata resa fotorealistica dei rilievi *image-based* risulta più idonea in progetti di comunicazione del patrimonio costruito, dall'altro l'accuratezza metrica dei rilievi *range-based* è necessaria per garantire una maggiore precisione. Queste metodologie di rilievo sono caratterizzate da processi operativi simili, ma si differenziano negli esiti per l'accuratezza, per la risoluzione, per la resa della nuvola di punti e in relazione alle modalità di processamento del dato. La nuvola di punti che si ottiene in entrambi i casi è frutto di un processo articolato e influenzato da molteplici fattori, tra cui la complessità delle forme, la presenza di ostacoli e i limiti intrinseci della strumentazione<sup>7</sup> che riducono la quantità di dati acquisiti e condizionano il risultato finale.

## APPENDICE A

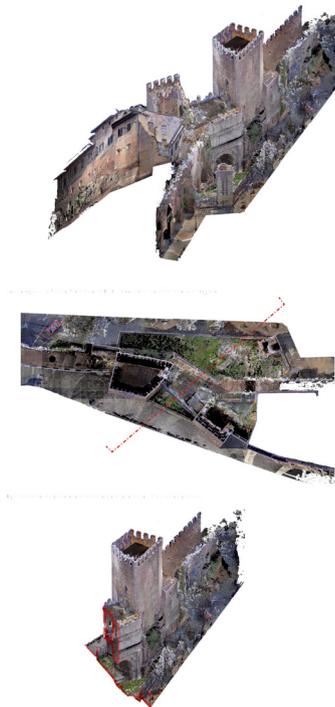


Fig. A.1 - Vista assonometrica, dall'alto e sezione della nuvola di punti frutto di 64 scansioni all'interno e all'esterno di Porta Tiburtina. [Canciani et al., 2018]

Per questo motivo, nel caso di rilievi di beni che presentano articolazioni complesse, per massimizzare le prestazioni dei vari strumenti e ottenere risultati soddisfacenti, la scelta migliore è sicuramente quella dell'integrazione delle nuvole di punti frutto delle diverse tecnologie utilizzate.

È chiaro che non esiste un unico sistema in grado di assicurare la rispondenza massima a tutti i requisiti; per cui, volta per volta, si dovrà stabilire quale strumentazione si adatti meglio a rispondere agli obiettivi del rilievo.

### A.2.1 I sistemi *range-based*

I sistemi *range-based* impiegano strumenti dotati di sensori attivi in grado di emettere e registrare una luce artificiale codificata utile per raccogliere informazioni sugli oggetti che si stanno rilevando. Si basano sulla proiezione di una serie di impulsi luminosi sulla superficie da rilevare e sulla successiva ricezione di tali impulsi tramite un sensore dedicato. Il sensore acquisisce l'andamento spaziale della superficie e genera un'immagine chiamata *range map*, in cui ogni *pixel* rappresenta le coordinate spaziali del punto fisico, con eventuali informazioni cromatiche RGB.

Tra i dispositivi *range-based* più comuni, troviamo quelli basati sull'utilizzo di impulsi luminosi *laser*<sup>8</sup>, noti come *laser scanner 3D*. L'acquisizione con questi dispositivi avviene in modo automatico e indipendente dalla morfologia dell'oggetto da rilevare, generando una nuvola di punti (fig. A.1). I *laser scanner* disponibili sul mercato presentano diverse caratteristiche relativamente alla precisione, all'accuratezza, alla risoluzione, alla portata e alla velocità. Essi possono essere classificati in base alla modalità di acquisizione, distinguendo tra sistemi basati sulla triangolazione<sup>9</sup> e sistemi basati sulla misura della distanza<sup>10</sup> [Bornaz, 2006]. I sistemi basati sulla triangolazione sono adatti per oggetti di dimensioni ridotte, mentre i distanziometri sono più adatti per il rilievo architettonico o a scala territoriale. Questi sistemi di misura della distanza possono essere ulteriormente classificati in base al tempo di volo e alla differenza di fase. La prima tipologia emette un impulso *laser* e misura l'intervallo di tempo tra l'emissione e il ritorno del segnale riflesso per calcolare la distanza. Questi sistemi sono adatti per acquisizioni a lunga distanza, ma possono essere lenti e meno accurati. I sistemi basati sulla differenza di fase invece utilizzano un segnale *laser* continuo e calcolano la distanza misurando lo sfasamento tra l'onda emessa e quella ricevuta.

Questi sistemi hanno una portata minore, ma offrono una velocità di acquisizione più rapida e una densità di dati più elevata.

Un'altra classificazione riguarda la modalità di acquisizione dei dati, in quanto i *laser scanner* distanziometrici possono essere statici o dinamici. Nelle acquisizioni statiche, vengono utilizzati strumenti come i TLS (*Terrestrial Laser Scanner*)<sup>11</sup> in cui le singole scansioni vengono registrate e successivamente combinate tramite trasformazioni rigide per ottenere una nuvola di punti globale. Nelle acquisizioni dinamiche, invece, gli strumenti registrano continuamente i dati durante il movimento attraverso lo spazio da rilevare. I sistemi più comuni per l'acquisizione dinamica sono gli MLS (*Mobile Laser Scanning*)<sup>12</sup> e gli ALS (*Airborne Laser Scanning*)<sup>13</sup>, che sono posizionati su veicoli o aeromobili e catturano punti lungo il percorso, utilizzando sistemi di posizionamento GNSS<sup>14</sup> [Pöppel *et al.*, 2023]. Questi sistemi permettono di acquisire in tempo reale una grande quantità di dati con una densità elevata di punti, ma la loro usabilità è limitata dalla scarsa copertura del segnale GNSS in alcune situazioni. A questo proposito, negli ultimi anni sono state messe a punto delle tecnologie che utilizzano i sistemi di navigazione inerziale basati su algoritmi SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*)<sup>15</sup>, i quali consentono di tracciare la posizione di un oggetto rispetto al punto di partenza, utilizzando accelerometri e giroscopi, permettendo così di superare le limitazioni legate al segnale GNSS e di ottenere una migliore precisione nella localizzazione [Marotta *et al.*, 2022].

Tutte le tipologie di *laser scanner*, indipendentemente dalle specifiche tecniche dei diversi strumenti, restituiscono i dati acquisiti sotto forma di una nuvola di punti contenente informazioni metriche (coordinate XYZ), informazioni di riflettanza<sup>16</sup> e, se disponibile una fotocamera integrata, informazioni cromatiche RGB dell'oggetto rilevato. Questa capacità di acquisizione combinata offre un potenziale significativo per la visualizzazione digitale degli oggetti rilevati, consentendo di ottenere un modello dall'aspetto fotorealistico e geometricamente accurato.

### A.2.2 I sistemi *image-based*

I sistemi *image-based* consentono di ricavare misure accurate da fotografie acquisite con sensori terrestri, aerei o satellitari. La fotogrammetria digitale è una delle tecniche più utilizzate in campo architettonico e si basa sul principio dello SfM (*Structure*

# APPENDICE A

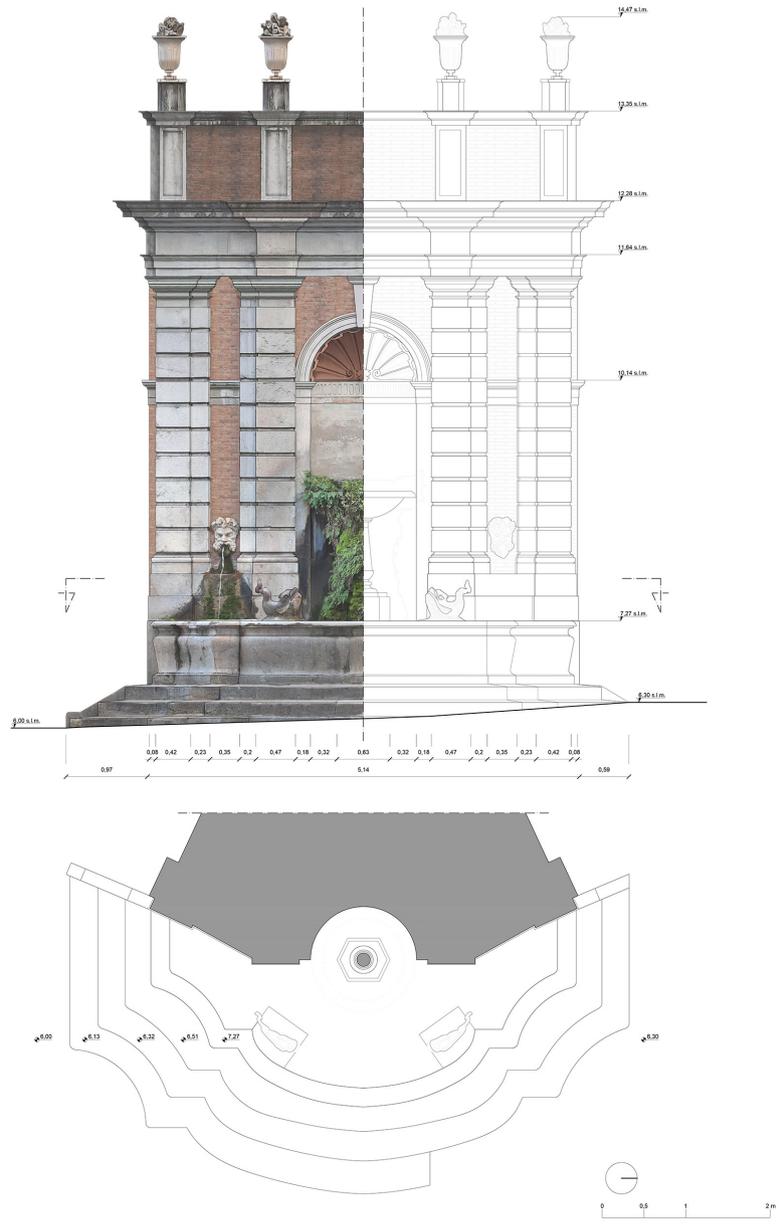


Fig. A.2 - Passaggi del post processamento del rilievo fotogrammetrico. Pianta e prospetto ricavate dall'ortofoto della 'fontana dei pesci' di Salerno. [Gallo M., 2021]

from Motion)<sup>17</sup>, che sfrutta algoritmi della *Computer Vision* per estrarre punti rilevanti dalle immagini e ricostruire la forma tridimensionale dell'oggetto. La fotogrammetria stabilisce una relazione geometrica tra le immagini fotografiche e la scena reale al momento della ripresa. Utilizzando il modello matematico della collinearità<sup>18</sup> e sfruttando la parallasse<sup>19</sup> presente nelle immagini da punti di vista differenti, consente di ottenere informazioni metriche accurate dell'oggetto [Russo *et al.*, 2011] (fig. A.2). La fotogrammetria digitale estrae punti rilevanti dalle immagini calcola i parametri fotografici e fa corrispondere i punti riconoscibili nelle diverse foto per ottenere le coordinate spaziali dei punti stessi.

Nella fase di ripresa è importante assicurarsi che le immagini siano sovrapposte<sup>20</sup> l'una con l'altra e che le foto coprano completamente la morfologia dell'oggetto per ottenere un modello completo e accurato (fig. A.3). Per poter catturare da diverse angolazioni aree estese, negli ultimi anni si è diffuso sempre di più l'utilizzo di APR (Sistemi a pilotaggio remoto)<sup>21</sup>.

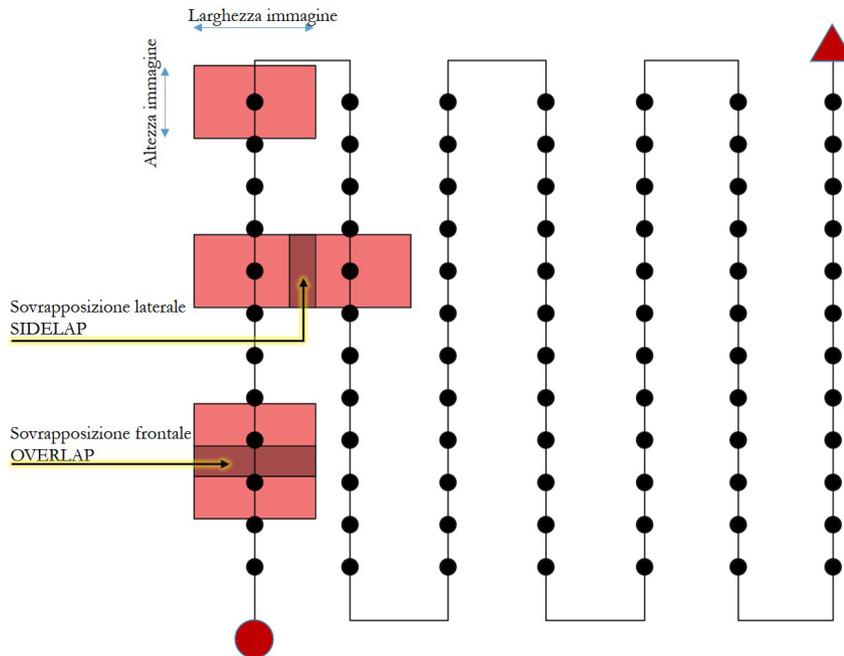


Fig. A.3 - Schema della sovrapposizione tra due fotogrammi vicini e consecutivi lungo la direzione di movimento (di volo di un drone o di spostamento di una camera terrestre).

## APPENDICE A

L'utilizzo dei droni per il rilievo fotogrammetrico aereo, infatti, ha rivoluzionato l'ambito della cartografia e della fotogrammetria in quanto tali dispositivi permettono di effettuare fotografie aeree ad alta risoluzione e dettaglio da diverse angolazioni e altezze, consentendo una copertura completa dell'area di interesse e la cattura di dettagli in zone difficilmente accessibili [Adami *et al.*, 2019] (fig. A.4).

La flessibilità e la rapidità dei droni consentono rilievi utili anche per il monitoraggio delle strutture, utilizzando al contempo i sistemi di posizionamento, come il GPS, che consentono di registrare con precisione la posizione e l'orientamento di ogni fotogramma acquisito.

Il risultato del rilievo terrestre o aereo è comunque una nuvola di punti, ove l'intero processo e il relativo risultato sono fortemente condizionati dalla qualità dell'immagine sottoposta ad elaborazione e dalle condizioni di illuminazione dell'ambiente da rilevare.

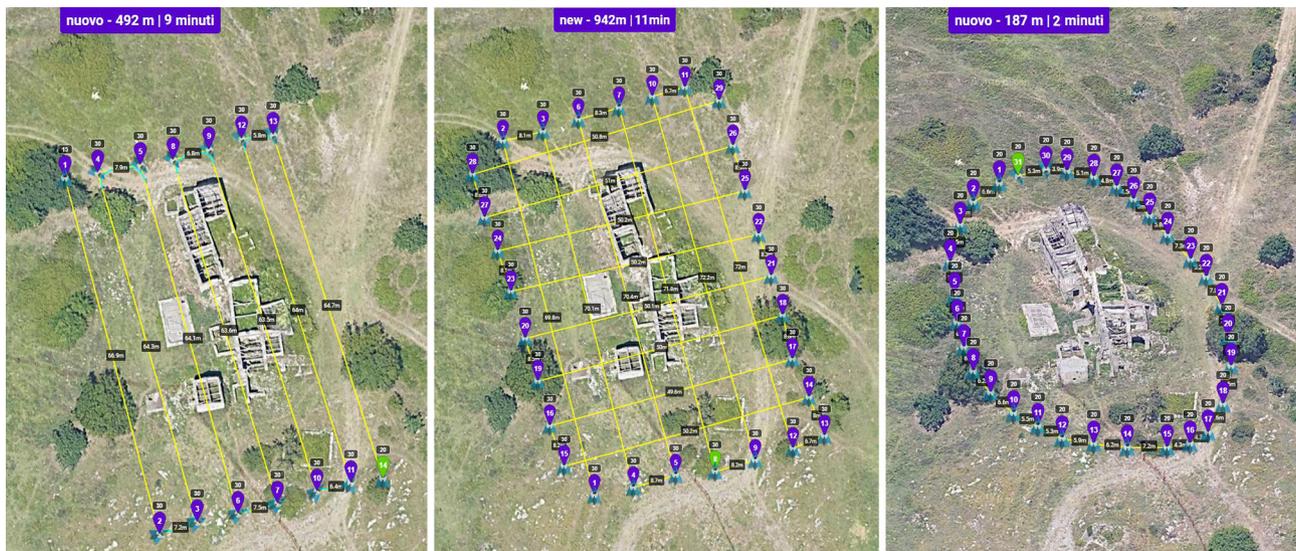


Fig. A.4 - Tipologie di missioni di volo automatizzate con l'app Litchi:

1) Acquisizione nadirale con overlap/sidelap 70%; 2) Acquisizione obliqua a 45° su doppia traiettoria; 3) Acquisizione con assi convergenti su traiettoria ovale. [Gallo, 2023]

### A.3 Processi di acquisizione *reality-based*: confronto e integrazione

L'integrazione delle tecniche *range-based* e *image-based* nel campo del rilievo digitale ha permesso di sfruttare i vantaggi di entrambi i sistemi, consentendo la misurazione 3D e la creazione di disegni tecnici correlati [Remondino, 2011]. L'approccio fotogrammetrico, in particolare, offre una corrispondenza univoca tra i dati RGB di ogni *pixel* e le relative coordinate XYZ, generando un modello geometrico 3D con informazioni radiometriche<sup>22</sup>, nonché immagini metriche misurabili nello spazio 2D. È una tecnica altamente versatile che presenta notevoli vantaggi, tra cui costi relativamente contenuti rispetto ad altre tecniche di rilevamento, una flessibilità di applicazione in molteplici ambiti, un'interfaccia utente intuitiva, la consegna rapida dei risultati e una migliore integrazione dei dati con piattaforme CAD, BIM e GIS<sup>23</sup> (fig. A.5). Tuttavia, richiede tempo per ottenere risultati di alta qualità e in ogni caso l'automazione completa della fotogrammetria è ancora in fase di sviluppo [Balsa-Barreiro, Fritsch, 2015].

Questa tecnica è particolarmente utile nel rilievo a scala architettonica, consentendo la generazione di ortofoto<sup>24</sup>, di facciate e di piante e la costruzione di modelli fotorealistici [Fiorillo *et al.*, 2021].

D'altro canto, la scansione *laser* fornisce tempi di acquisizione rapidi e un controllo diretto ed efficace della geometria acquisita. Anche questa tecnica è particolarmente utilizzata nel campo architettonico per misurare manufatti complessi o spazi interni.

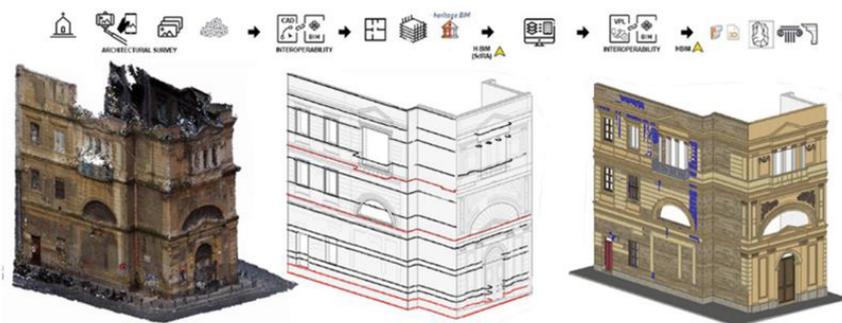


Fig. A.5 - Costruzione di un modello BIM a partire dalla nuvola di punti fotogrammetrica. [Lanzara *et al.*, 2022]

## APPENDICE A

La scansione *laser* presenta vantaggi come l'alta precisione, il risparmio di tempo grazie alla generazione automatica dei modelli 3D e la possibilità di creare modelli estremamente realistici. Tuttavia, ha anche svantaggi come il costo elevato della strumentazione, la necessità di un'eliminazione manuale degli errori per ottenere una qualità elevata, i problemi con le *texture*<sup>25</sup> durante la scansione notturna e la complessità dell'ottimizzazione dei modelli 3D generati [Talha, Fritsch, 2019].

L'integrazione dei dati provenienti dalla fotogrammetria e dalla scansione *laser* rappresenta un aspetto fondamentale per massimizzare le loro caratteristiche complementari. Entrambe le tecniche producono nuvole di punti 3D, ma nessuna delle due offre un netto vantaggio in termini di qualità. Tuttavia, combinandole, è possibile ottenere risultati completi, accurati e fotorealistici. La descrizione delle due principali tecniche di rilievo 3D, evidenzia un punto cruciale: ogni strumento o metodo di rilievo è caratterizzato da peculiari specificità che lo rendono unico sia nell'acquisizione dei dati che nel tipo di dati in uscita. Questa forte caratterizzazione costituisce un elemento distintivo quando l'applicazione si allinea perfettamente alle prestazioni dello strumento. Tuttavia, limita notevolmente l'uso esclusivo quando le condizioni di rilievo sono complesse e non corrispondono esattamente alle potenzialità del singolo strumento [Beraldin, 2004].

La capacità diversa di acquisire dati tridimensionali ed estrarre rappresentazioni 3D in diverse forme digitali dell'oggetto reale evidenzia una forte complementarità, soprattutto tra specifici sistemi di acquisizione 3D e la possibilità di sfruttare al meglio le potenzialità dei singoli strumenti. Inoltre, le condizioni reali di rilievo sono spesso complesse e richiedono un *range* di prestazioni che i singoli strumenti difficilmente possono offrire individualmente. Ad esempio, considerando una facciata di una chiesa antica o un'ampia area archeologica contenente diversi manufatti di piccole dimensioni, l'integrazione di diversi sistemi di acquisizione 3D consente di ottenere il miglior risultato possibile in termini di precisione dei singoli dati, accuratezza complessiva e ottimizzazione dell'intero processo, dal rilievo alla modellazione 3D. Il fattore dimensionale dell'oggetto influenza principalmente le tecniche di rilievo attive, tuttavia, se consideriamo anche l'aspetto della caratterizzazione geometrica dell'oggetto, risulta interessante confrontare l'accuratezza prodotta dalle singole metodologie applicate a casi di dimensioni e caratterizzazioni formali diverse [Remondino, Guarnieri, Vettore, 2005].

L'integrazione di queste diverse tecnologie dimostra che le caratteristiche dei singoli strumenti sono fortemente complementari, rendendo un sistema integrato più efficace e flessibile. Tale integrazione consente di ottenere risultati significativamente migliorati e adattabili, in grado di soddisfare le esigenze morfologiche degli oggetti presenti nella scena rilevata sfruttando al meglio le caratteristiche e le prestazioni di ciascuno strumento [Russo *et al.*, 2011] (fig. A.6).

Rilievo fotogrammetrico



Rilievo laser scanner



Integrazione dei due metodi



*Fig. A.6 - Integrazione della nuvola di punti frutto del rilievo fotogrammetrico e del rilievo laser scanner di Porta Tiburtina a Roma. [Cecili, Gallo, 2023].*

## APPENDICE A

### Note

1 Gli strumenti geomatici sono dispositivi tecnologici utilizzati per acquisire, elaborare, analizzare e visualizzare dati geospaziali. Questi strumenti includono GPS (*Global Positioning System*), LiDAR (*Light Detection and Ranging*), fotocamere digitali, *software* di elaborazione di dati geografici e altri sensori specializzati.

2 Si definiscono *reality-based* in quanto rilevano la realtà così come si presenta, documentandone lo stato di fatto attraverso modelli virtuali tridimensionali. Esistono diversi strumenti che rientrano nelle tecnologie *reality-based*; questi vengono raggruppati in due macro categorie distinte in *range-based* ed *image-based*, in base alla sensoristica utilizzata.

3 Il rilievo *no-contact* è una metodologia di acquisizione di dati tridimensionali o di superficie senza la necessità di contatto fisico con l'oggetto o l'area di interesse, utilizzando tecnologie avanzate per misurare con precisione le forme e le caratteristiche.

4 “Un rilevatore che si accinge a rilevare un monumento non può, evidentemente, misurare gli infiniti punti che lo costituiscono, ma deve operare precise scelte discretizzando l'insieme della materia e riportarla a un numero limitato di punti. Questi, ovviamente, devono avere valore strategico ed essere significativi, al fine di evidenziare le qualità formali dell'opera”. [Docci, Maestri, 2009].

5 Tecniche fotogrammetriche che sfruttano la luce ambientale per ricavare informazioni 3D, puntando su precisione e affidabilità [Remondino, El-Hakim, 2006].

6 Impiegano strumenti che emettono un segnale elettromagnetico (nel campo del visibile, infrarosso, raggi X, ecc.) che viene poi registrato dallo strumento al fine di derivarne una misura di distanza (*range*). Gli strumenti principali sono i *laser scanner* (terrestri o aerei), le stazioni totali, i GNSS ed i *radar* [Remondino, 2010].

7 La strumentazione stessa può avere limitazioni intrinseche. Ad esempio, un *laser scanner* potrebbe avere una distanza massima di acquisizione o una precisione limitata a lunghe distanze. Allo stesso modo, una fotocamera potrebbe avere limiti di risoluzione o di qualità dell'immagine che influenzano la qualità dei dati raccolti. Tutti questi fattori possono ridurre la quantità di dati acquisiti e influenzare il risultato finale della scansione 3D o della fotogrammetria, rendendo importante una pianificazione accurata e una valutazione dei limiti prima dell'acquisizione dei dati.

8 Il L.A.S.E.R., acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione), è un dispositivo che emette radiazioni luminose monocromatiche, composte da una singola frequenza di luce. Queste radiazioni si propagano in modo coerente, mantenendo una direzione unidirezionale anche a lunghe distanze.

9 Il dispositivo di emissione e quello di ricezione sono fisicamente separati da una distanza fissa e calibrata. La posizione nello spazio di ogni punto rilevato viene determinata attraverso un calcolo trigonometrico simile all'intersezione in avanti utilizzata in topografia. Grazie a questo metodo, è possibile raggiungere precisioni sub-millimetriche.

10 Si tratta di dispositivi che misurano distanze lineari ed angoli tra due punti. Questi sistemi garantiscono un eccellente rapporto tra *range* di misura e precisione: infatti è possibile misurare distanze anche di centinaia di metri, con precisione nell'ordine di alcuni millimetri.

11 Strumento avanzato utilizzato per acquisire dati topografici e di superficie a terra. Questo dispositivo utilizza un raggio *laser* per misurare con precisione la distanza e l'angolo tra il dispositivo e i punti di interesse.

12 Tecnologia che consente di acquisire dati topografici e di superficie in movimento utilizzando un sistema di scansione *laser* montato su un veicolo o una piattaforma mobile. Questo metodo avanzato consente di rilevare rapidamente e in modo efficiente grandi aree, come strade, città e ambienti urbani.

13 Tecnologia che utilizza un sistema di scansione *laser* montato su un aereo o un elicottero per acquisire dati topografici e di superficie dall'alto. Questo metodo avanzato permette di ottenere una visione tridimensionale estesa e precisa del territorio, consentendo la creazione di modelli digitali del terreno, la mappatura del paesaggio e l'analisi delle coperture vegetali.

14 Il *Global Navigation Satellite System* è un sistema di navigazione satellitare che consente di determinare la posizione, la velocità e il tempo con elevata precisione in tutto il mondo. Attraverso la ricezione e l'elaborazione dei segnali provenienti da più satelliti, i dispositivi GNSS sono in grado di calcolare le coordinate geografiche e fornire informazioni sulla posizione in tempo reale.

15 S.L.A.M. acronimo di *Simultaneous Localization And Mapping*, è una tecnologia che consente a un dispositivo di mappare un ambiente mentre si localizza autonomamente al suo interno. Combina la localizzazione, ovvero la determinazione della posizione del sistema, e la creazione di una mappa dell'ambiente circostante registrando le informazioni spaziali e strutturali rilevanti utilizzando i dati provenienti dai sensori.

16 Capacità di un oggetto rilevato di riflettere la luce incidente.

17 Tecnica fondamentale nella fotogrammetria per la ricostruzione tridimensionale di oggetti e scene. Utilizzando algoritmi della *Computer Vision*, il SfM estrae punti rilevanti dalle immagini, calcola i parametri fotografici e fa corrispondere i punti riconoscibili in diverse foto per ottenere le coordinate spaziali.

18 Le equazioni di collinearità rappresentano un fondamentale strumento matematico utilizzato nella fotogrammetria per determinare le relazioni tra le immagini fotografiche e la scena reale. Queste equazioni sono fondamentali per l'estrazione di informazioni metriche accurate dalle immagini e la ricostruzione tridimensionale degli oggetti o delle scene e governano la fase di presa, di orientamento e di restituzione del processo fotogrammetrico.

19 La parallasse è un concetto che si riferisce alla differenza apparente nella posizione di un oggetto quando viene osservato da diverse angolazioni. Nella fotogrammetria viene sfruttata per ottenere informazioni tridimensionali dalla sovrapposizione di immagini catturate da punti di vista differenti. Utilizzando il principio della triangolazione, la parallasse può essere misurata e utilizzata per determinare la distanza e la posizione di punti omologhi nell'ambiente fotografato.

## APPENDICE A

20 Nella fotogrammetria, la sovrapposizione tra le foto è fondamentale per una ricostruzione tridimensionale accurata. L'*overlap* si verifica tra fotogrammi consecutivi lungo la direzione di movimento, catturando più punti di vista dell'oggetto o della scena. Il *sidelap*, invece, è la sovrapposizione tra fotogrammi di strisciate adiacenti, garantendo una maggiore copertura dell'area ripresa. Questa sovrapposizione fornisce ridondanza di informazioni, migliorando la precisione dei risultati finali e consentendo una ricostruzione più dettagliata.

21 APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto) è un mezzo aereo che può essere controllato da un operatore a distanza, senza la presenza di persone a bordo. Comunemente noto come drone, l'APR è equipaggiato con sensori, telecamere e sistemi di navigazione per eseguire una varietà di compiti, tra cui rilevamento e mappatura del territorio, monitoraggio ambientale, ispezioni di infrastrutture e raccolta di dati.

22 Le informazioni radiometriche riguardano le caratteristiche radiative degli oggetti, come il colore, la *texture*, la riflettanza e le proprietà di trasparenza. Queste informazioni possono essere acquisite tramite tecniche di rilevamento che permettono di ottenere dati sulle caratteristiche dei materiali e la distribuzione dei colori nella scena.

23 Le piattaforme GIS (*Geographic Information System*) sono strumenti *software* che consentono di acquisire, gestire, analizzare e visualizzare dati geografici. Questi dati possono includere mappe, immagini satellitari, dati demografici e informazioni ambientali.

24 Un'ortofoto è un'immagine georeferenziata di una superficie terrestre, corretta per gli effetti di prospettiva e distorsione, in modo da rappresentare la superficie come se fosse vista dall'alto in modo ortogonale. Questa correzione permette di ottenere un'immagine allineata con la griglia cartografica e i sistemi di coordinate, offrendo una rappresentazione precisa e dettagliata del territorio per scopi di mappatura, analisi e visualizzazione geografica.

25 La *texture* si riferisce all'applicazione di un'immagine bidimensionale su una superficie tridimensionale per simulare dettagli visivi come colori, *pattern* e caratteristiche superficiali ed è utilizzata per rendere i modelli 3D più realistici e dettagliati.

## APPENDICE B

### L'inquadramento topografico

#### B.1 Geomatica e rappresentazione del Patrimonio

Il Patrimonio Architettonico e Archeologico rappresenta un bene culturale di grande valore, il cui studio richiede l'applicazione di metodologie e tecniche d'indagine complesse. Questa complessità è dovuta alla necessità di acquisire una conoscenza approfondita che comprenda aspetti geometrici, materiali, radiometrici, storici e temporali. L'uso di modelli descrittivi diventa quindi essenziale per la comprensione e per la rappresentazione di tali beni culturali, ma anche per definire strategie di intervento efficaci. Nel contesto multidisciplinare attuale, le discipline della Rappresentazione e della Geomatica<sup>1</sup> e le nuove tecnologie di acquisizione giocano un ruolo fondamentale nella comprensione e nella conservazione del Patrimonio Architettonico e Archeologico [Adami, Fregonese, 2020].

La topografia<sup>2</sup> tradizionale, i sistemi di inquadramento GNSS, la fotogrammetria terrestre e aerea tramite droni e le piattaforme *laser scanning* statiche o dinamiche sono solo alcune delle applicazioni che permettono una documentazione accurata e una rappresentazione fedele del Patrimonio Architettonico e Archeologico. L'utilizzo di sensori avanzati, come il *Terrestrial Laser Scanning* e la fotogrammetria, consente di acquisire dati dettagliati e di creare modelli tridimensionali che supportano lo studio e la conservazione dei beni culturali, la cui corretta posizione spaziale deve essere garantita da un sistema di posizionamento GPS<sup>3</sup> integrato nel dispositivo utilizzato [Morel *et al.*, 2021]. Gli strumenti dotati di GPS, infatti, consentono di scalare e orientare la nuvola di punti ottenuta, con una accuratezza che può variare a seconda del dispositivo e da altri fattori che possono modificare la trasmissione e la velocità del segnale ed i collegamenti con i satelliti a cui si agganciano.

## APPENDICE B

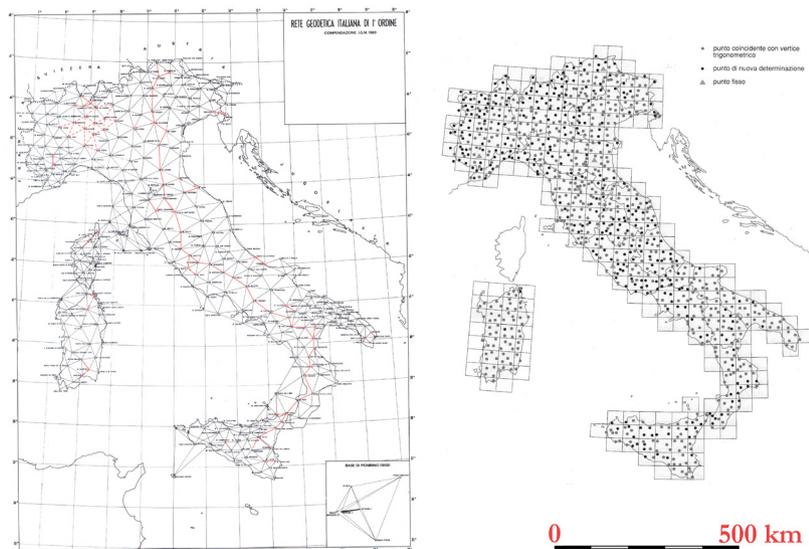


Fig. B.1 - Rete geodetica GPS IGM95 e rete trigonometrica con i vertici del I ordine.  
[Barbarella, 2015]

### B.2 Scelta del sistema di riferimento per la misurazione accurata

Su ogni progetto di rilievo è dunque fondamentale prendere in considerazione la tipologia di strumentazione da utilizzare al fine di ottenere una resa precisa e di qualità. È importante tenere sempre presente che ogni dispositivo ha una sua precisione strumentale<sup>4</sup>, e quanto più il dispositivo è preciso, tanto più precise saranno le misurazioni ottenute. Saper stimare e valutare correttamente l'incertezza delle misure consente di interpretare opportunamente i dati acquisiti predisponendo una solida base per l'analisi del manufatto. Ovviamente nel contesto della documentazione, conservazione e studio del Patrimonio Architettonico e Archeologico, la misurazione deve essere precisa, accurata<sup>5</sup> e affidabile. Va scelto innanzitutto il sistema di riferimento, che determina il contesto spaziale in cui le misurazioni vengono localizzate e che può essere un sistema locale<sup>6</sup> o globale in relazione al contesto applicativo e alle esigenze specifiche. Un sistema di riferimento locale offre la possibilità di personalizzare la scelta del sistema, adattandolo alle specifiche necessità del progetto, richiedendo in ogni caso, la costruzione e la gestione continua, nonché l'accordo e la condivisione delle informazioni tra gli operatori coinvolti. È necessario fissare un sistema di riferimento mediante punti stabili, che fungono da base per tutte le misure successive.

Questo può fornire precisioni di misura nell'ordine dei millimetri, consentendo dettagliate analisi geometriche e materiali. Al contrario, un sistema globale si basa su cartografie esistenti e garantisce alcune informazioni di base, ma può essere più complesso da gestire, soprattutto nell'utilizzo di *software* specifici.

In Italia è stato adottato il sistema di riferimento ETRF2000<sup>7</sup> che fa parte del sistema globale ETRS89<sup>8</sup> utilizzato in Europa. Questo sistema, noto anche come RDN2008<sup>9</sup>, prevede la proiezione del territorio italiano in tre fusi distinti. Tuttavia, per superare la discontinuità dei fusi<sup>10</sup> nei Sistemi Informativi, si è optato per l'utilizzo di un fuso unico con una nuova proiezione, il RDN2008/ZONE12, che presenta il meridiano centrale a 12° di longitudine di Greenwich e una falsa origine di 3000 km<sup>11</sup>.

Questa scelta ha permesso di creare una maggiore continuità e coerenza nelle misurazioni, semplificando la gestione delle informazioni geografiche e migliorando la precisione complessiva dei dati.

La scelta di un sistema di riferimento adeguato e la creazione di una rete topografica solida sono fondamentali per garantire la precisione delle misurazioni nel contesto. Infatti solo attraverso una corretta localizzazione spaziale e l'accurata valutazione dell'incertezza delle misure è possibile documentare, conservare e studiare il Patrimonio Architettonico e Archeologico in modo efficace (fig. B.1).

### B.3 Creazione di una rete topografica di base

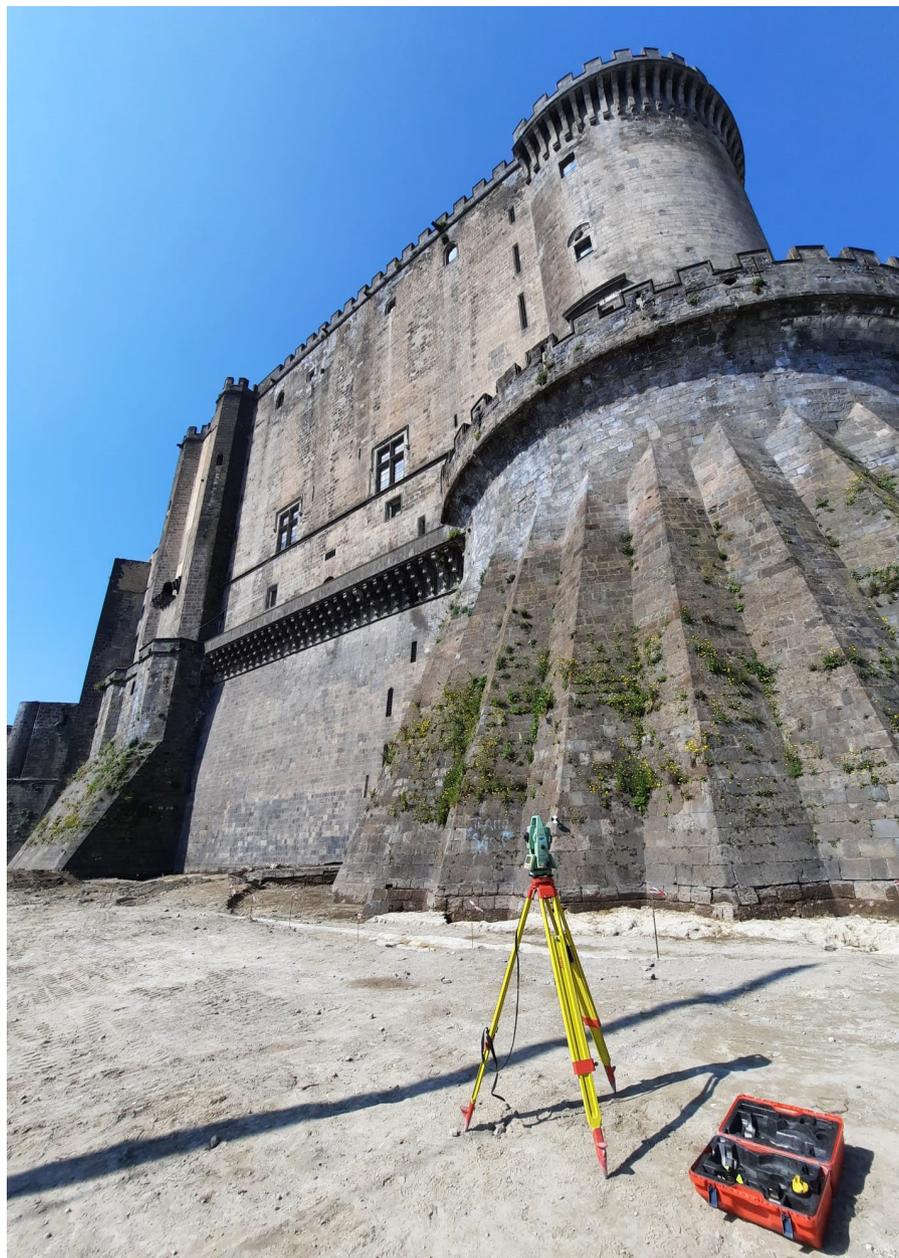
La rete topografica è costituita da punti fissi<sup>12</sup>, noti come caposaldi cioè punti stabili nel tempo e nello spazio, che consentono la corretta localizzazione e georeferenziazione delle misurazioni e forniscono un collegamento tra il mondo reale e il sistema di coordinate utilizzato per la misurazione.

La rete topografica rappresenta l'ossatura del rilievo, offrendo punti di riferimento stabili su cui si basano tutte le misure successive (fig. B.2). Inoltre assicura la corretta verticalità del sistema di riferimento e consente il monitoraggio accurato delle fasi di elaborazione fotogrammetrica, di registrazione delle nuvole di punti e del processo di rilievo nel complesso. A partire da questa rete è quindi possibile georiferire un rilievo, ovvero assegnare delle coordinate ai dati che non possiedono informazioni spaziali associate, in modo da poterli integrare e analizzare in un contesto geografico coerente. Questo aspetto è particolarmente importante quando si lavora con dati provenienti



Fig. B.2 - Leica Target Stickers adesivi e rifrangenti e Paddle Scanner Target su cui si ancorano le reti topografiche dei cantieri archeologici della metro Municipio e Duomo a Napoli.

## APPENDICE B



*Fig. B.3 - Messa in stazione della stazione totale per la creazione di una rete topografica secondaria all'interno del cantiere della Metropolitana Municipio, Napoli.*

da fonti diverse, come immagini aeree, scansioni *laser* o dati provenienti da sensori remoti [Teppati Losè *et al.*, 2023]. Per ottenere una georeferenziazione accurata di un rilievo *reality-based*, è quindi consigliabile associare i rilievi *laser scanner* e fotogrammetrici a una rete topografica creata con l'ausilio di una stazione totale. Questo strumento è in grado di misurare angoli e distanze con elevata precisione, garantendo dati affidabili per la creazione di reti topografiche fino a centinaia di metri di distanza e consente di misurare direttamente i punti di riferimento nella rete topografica, assicurando un controllo più preciso sulla loro posizione (fig. B.3). Le stazioni totali possono essere utilizzate in diversi contesti di rilievo dai piccoli ambienti alle grandi aree, in qualunque operazione di campagna e in ogni condizione operativa (fig. B.4). Quando si lavora su grandi edifici o vaste aree, è necessario effettuare numerose stazioni.



Fig. B.4. Inquadramento di una stazione totale 'S01' all'interno di una rete di inquadramento composta da capisaldi di coordinate geodetiche note nell'area delle scuderie del cantiere Archeologico Municipio di Napoli. [Gallo *et al.*, 2023]

## APPENDICE B

In questo caso, è conveniente creare una poligonale, cioè una rete di inquadramento composta da una catena di capisaldi, in modo che ciascuno sia visibile dai due capisaldi adiacenti che attraversano o circondano l'intera area da rilevare. Utilizzando un *software* di topografia apposito, l'errore di lettura degli angoli alla fine del circuito può essere distribuito uniformemente tra tutte le stazioni della poligonale (compensazione)<sup>13</sup>.

L'utilizzo di una rete di inquadramento offre numerosi vantaggi quando si lavora su edifici di grandi dimensioni o vaste aree poiché questo approccio garantisce una distribuzione uniforme dell'errore di lettura degli angoli tra le stazioni della poligonale. Inoltre è possibile ampliare la rete dei capisaldi aggiungendone altri secondari specifici per il rilievo di ambienti particolari e reti di dettaglio per elementi puntuali (fig. B.5).

Si tratta di un metodo classico e consolidato, ma essenziale, specialmente in contesti in cui l'architettura è estremamente vasta e complessa. È anche particolarmente adatto per progetti che si estendono su un periodo di anni o che coinvolgono diversi livelli, come nel caso degli scavi archeologici [Bianchini, 2008] per poter osservare le variazioni degli strati nel tempo (fig. B.6).

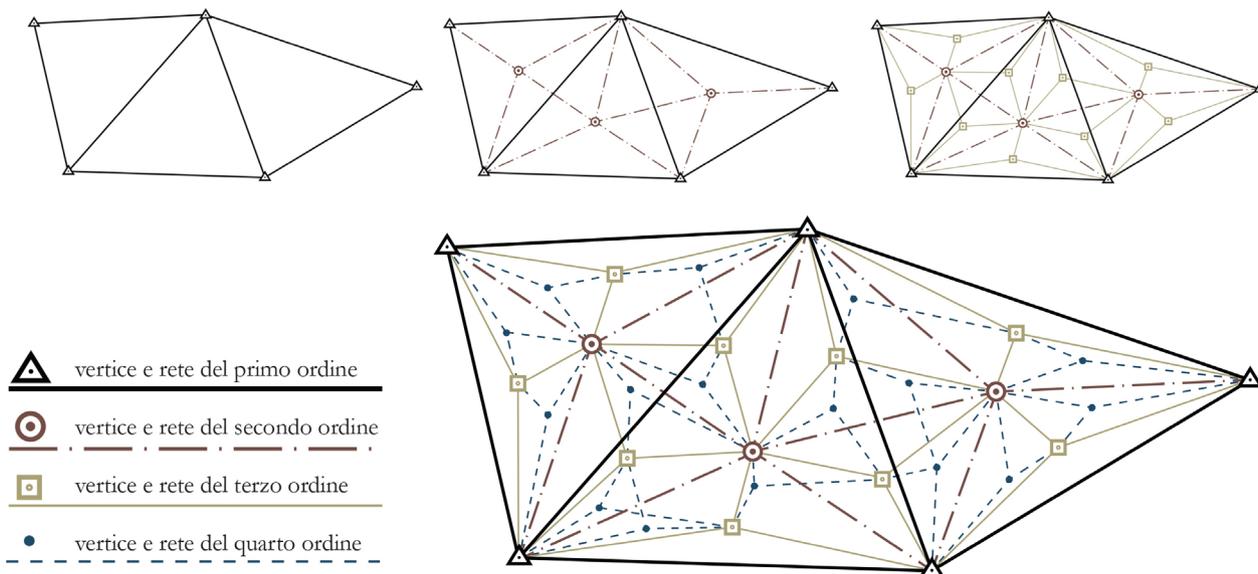


Fig. B.5 - Reti dal 1° al 4° ordine tramite triangolazione.

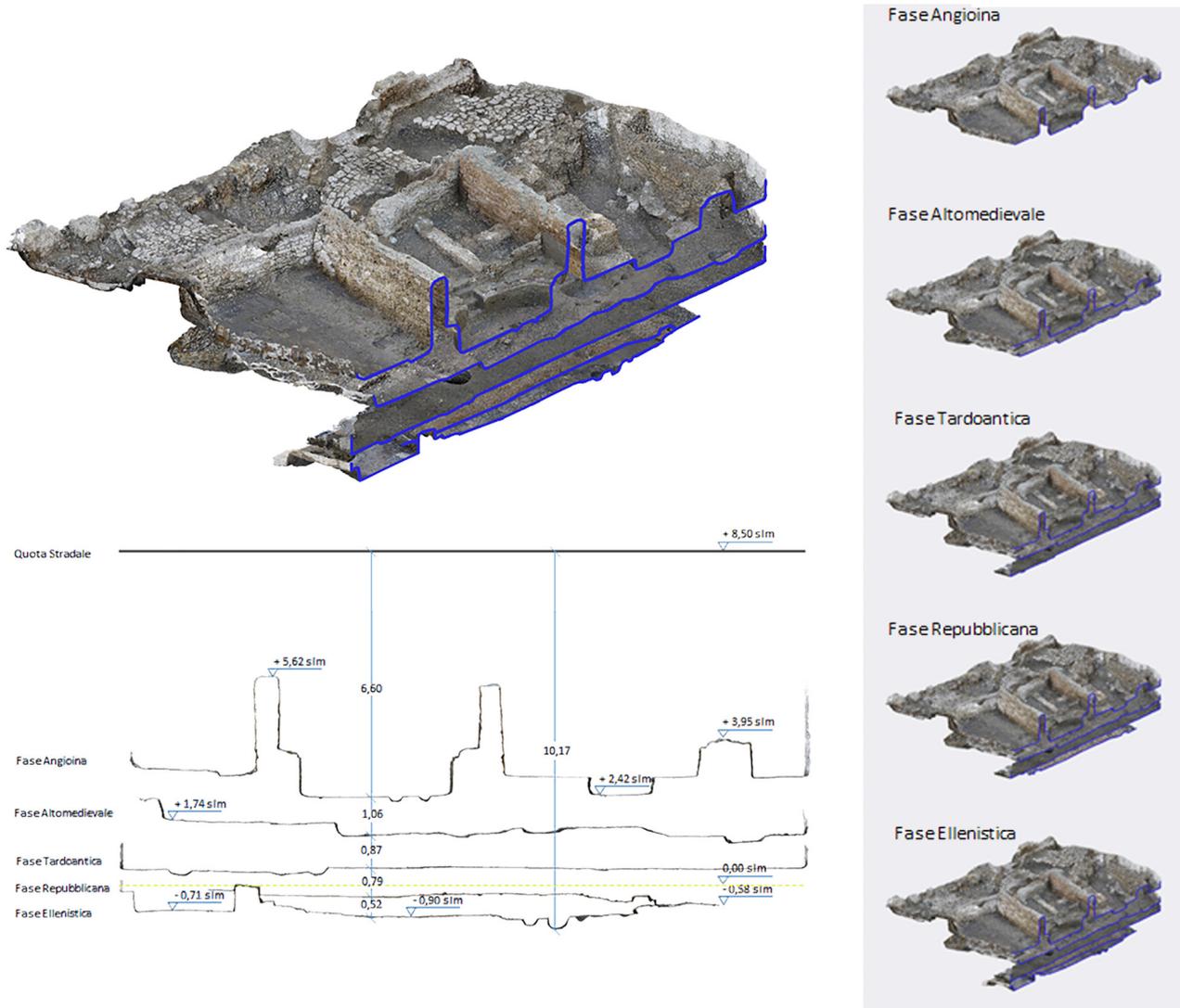


Fig. B.6 - Messa a sistema di rilievi della medesima area dello scavo archeologico della Metro Duomo a Napoli in software di visualizzazione ed editing delle nuvole di punti (ReCap Pro) consente di cogliere la sequenza operativa dello scavo. Questa sovrapposizione è automatica ed è possibile perché le nuvole sono georiferite nello spazio.

## APPENDICE B

### Note

1 La Geomatica è una disciplina che si occupa della gestione e dell'analisi dei dati geografici attraverso l'utilizzo di tecnologie e metodologie avanzate. Questa disciplina combina le conoscenze di geografia, cartografia, geodesia, teledetezione e sistemi informativi geografici per acquisire, elaborare, visualizzare e interpretare informazioni geospaziali contribuendo alla presa di decisioni basate su dati geografici accurati e aggiornati.

2 La topografia è una disciplina che si occupa della misurazione, descrizione e rappresentazione accurata delle caratteristiche della superficie terrestre. Utilizzando strumenti e tecniche specifiche, la topografia determina le coordinate, le altezze e le distanze dei punti di interesse, creando mappe e modelli tridimensionali.

3 Il GPS (*Global Positioning System*) è un sistema di navigazione satellitare che consente di determinare la posizione geografica con elevata precisione utilizzando segnali radio provenienti da satelliti in orbita intorno alla Terra. Il GPS calcola la distanza tra il ricevitore e ciascun satellite per determinare la propria posizione tridimensionale.

4 La precisione strumentale rappresenta la capacità di uno strumento di fornire misurazioni coerenti e ripetibili. Indica quanto le letture dello strumento possono variare tra loro quando viene effettuata la stessa misurazione più volte. Una maggiore precisione strumentale implica una minore variabilità nelle misurazioni ripetute, fornendo una stima più affidabile della grandezza misurata. La precisione strumentale dipende dalla qualità e dalla taratura dello strumento, nonché dalle condizioni di utilizzo.

5 Ogni misura è soggetta a un certo grado di incertezza e viene definita come un intervallo di valori probabili entro cui si ritiene che essa sia compresa. Questo concetto mette in evidenza i termini di precisione e accuratezza che sono fondamentali nell'analisi delle misurazioni. La precisione si riferisce alla ripetibilità e alla consistenza delle misure, mentre l'accuratezza indica quanto una misura si avvicina al valore 'vero' o al valore di riferimento. L'obiettivo è ottenere misure precise e accurate per garantire la validità e l'affidabilità dei dati raccolti e delle analisi effettuate.

6 È un sistema di riferimento spaziale relativo a un punto di origine specifico. A differenza delle coordinate geodetiche che forniscono una posizione assoluta sulla superficie terrestre, le coordinate locali descrivono la posizione di un punto in relazione a un sistema di coordinate locale definito. Al punto di origine, noto come punto di riferimento, viene assegnato un valore di coordinate zero, e le coordinate locali vengono misurate rispetto a tale punto di riferimento lungo gli assi orizzontali e verticali.

7 *European Terrestrial Reference Frame 2000 - ETRF2000* epoca 2008.0.

8 ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*) è un sistema di riferimento geodetico ampiamente utilizzato in Europa per la georeferenziazione e la posizionamento geografico. È basato su un modello terrestre globale e fornisce coordinate spaziali accurate e coerenti per punti sulla superficie terrestre. ETRS89 è allineato con il sistema GPS e costituisce una base comune per l'integrazione di dati geospaziali provenienti da diverse fonti e sistemi di coordinate.

9 Il nuovo *frame* ETRF2000 è materializzato dalla Rete Dinamica Nazionale (RDN) che rappresenta il sistema di riferimento sul territorio italiano andando a definire il Sistema di Riferimento geodetico nazionale (RDN2008).

10 I fusi cartografici sono delle divisioni in cui il globo terrestre è suddiviso, e in ognuno di essi viene applicata una proiezione cartografica particolare che minimizza le distorsioni geografiche per quella zona specifica.

11 Il sistema 'Zone 12' si riferisce ad un sistema cartografico, denominato 'Fuso 12', introdotto nel 2013 per superare i problemi di discontinuità che si incontrano nel trattamento di dati relativi ad aree poste a cavallo del meridiano 12° Est da Greenwich, e quindi ricadenti in ambedue i fusi tradizionali: 32 e 33 [Achilli *et al.*, 2013].

12 Anche detti 'punti trigonometrici' o 'punti di appoggio' nel loro insieme formano una rete di inquadramento che costituisce la struttura portante delle successive fasi di rilievo. Generalmente i punti di inquadramento sono in numero abbastanza limitato, omogeneamente distribuiti in tutta la zona da rilevare. Essi vengono scelti in posti che ne consentano una buona visibilità in un vasto raggio e vanno scelti con cura e rilevati con notevole precisione [Fichera, 2016].

13 La compensazione si riferisce al processo di ridistribuzione degli errori misurati tra le diverse stazioni della rete al fine di ottenere risultati più accurati e coerenti. Gli errori possono derivare da varie fonti, come errori strumentali, errori di lettura o errori ambientali. La compensazione implica il calcolo delle correzioni necessarie per ridurre gli errori complessivi e assicurare che la somma degli errori nelle misurazioni delle stazioni sia minima. Ciò permette di ottenere una rete poligonale più coerente e affidabile, migliorando l'accuratezza delle misurazioni topografiche e garantendo una migliore qualità complessiva dei dati.



## APPENDICE C

### La modellazione 3D

#### C.1 Categorie, tecniche e metodi della modellazione tridimensionale

La modellazione 3D è una componente fondamentale nel campo della *computer grafica*, del *design* virtuale, dei giochi, dei film, del *design* di prodotti e delle ricostruzioni virtuali. Consiste nella creazione di rappresentazioni digitali di oggetti o scene tridimensionali, consentendo agli operatori di visualizzare e manipolare gli oggetti nello spazio tridimensionale. Tuttavia, il concetto di modello tridimensionale va oltre la sua definizione generale, poiché può assumere significati diversi in base al contesto e all'ambito di applicazione. In architettura, ad esempio, il modello tridimensionale può essere considerato come una rappresentazione utile per comprendere un manufatto, una riproduzione materiale in scala che mette in evidenza specifici aspetti di interesse [Mandelli, Velo, 2010]. Questa pratica ha radici profonde nella storia dell'architettura, sebbene la vera rivoluzione nella modellazione tridimensionale sia avvenuta in ambito industriale<sup>1</sup> a partire dagli anni '60 del XX secolo<sup>2</sup>, quando i modelli fisici sono stati affiancati da modelli digitali, inizialmente bidimensionali e successivamente tridimensionali. Sviluppate primariamente come supporto alla progettazione, queste elaborazioni numeriche hanno reso possibile la riproduzione di forme attraverso calcoli e algoritmi, rendendo i modelli accessibili attraverso schermi e *monitor*.

Con lo sviluppo della *computer grafica* e delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione, sono emerse diverse tipologie di modellazione tridimensionale, differenziandosi per la loro strutturazione e, soprattutto, finalità. I modelli tridimensionali sono stati utilizzati per l'analisi e il calcolo strutturale, la comunicazione visiva, le analisi energetiche, la verifica delle soluzioni progettuali e molto altro ancora.

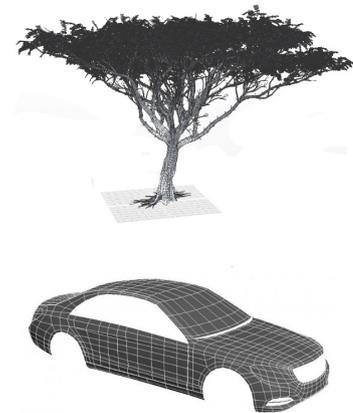


Fig. C.1 - Modello organico di un albero e modello geometrico di una macchina. [carbobydesign.com; 3dexport.com]

## APPENDICE C

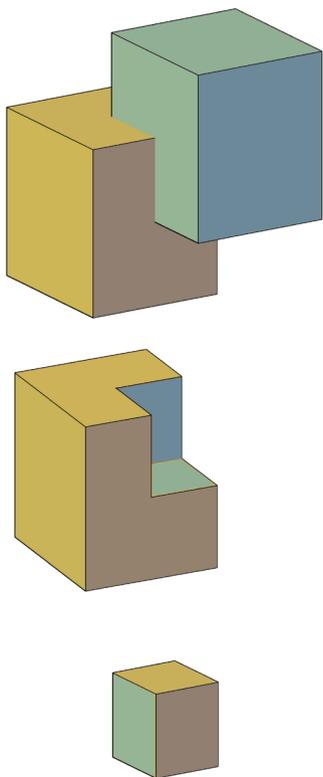


Fig. C.2 - Operazioni booleane per la creazione di modelli solidi.

Indipendentemente dalla loro forma fisica o digitale, i modelli tridimensionali sono il risultato di una costruzione mentale [Docci, 2009] che deriva da un fenomeno reale, formulato secondo un pensiero e una finalità comunicativa e/o operativa. L'evoluzione dei modelli tridimensionali nel contesto digitale ha comportato un aumento significativo delle potenzialità di analisi trasformando la modellazione 3D in un'importante risorsa per numerosi settori, consentendo una migliore comprensione, comunicazione e utilizzo degli oggetti e delle scene tridimensionali.

### C.1.1 Categorie della modellazione 3D

Dal punto di vista tipologico, la modellazione 3D può essere suddivisa in due categorie principali, ognuna dedicata a un determinato tipo di modelli: la modellazione organica e la modellazione geometrica.

- La modellazione geometrica si concentra sulla creazione di oggetti tridimensionali utilizzando forme geometriche, linee, curve e superfici matematiche. È utilizzata per progettare oggetti con forme precise, come edifici, macchinari, automobili e componenti industriali. Questa modalità di modellazione è spesso utilizzata in campi come l'ingegneria, la progettazione industriale e la grafica computerizzata per creare oggetti che seguono forme e proporzioni precise. Si avvale spesso di strumenti basati su operazioni matematiche, come la modellazione parametrica, che consente di creare oggetti utilizzando equazioni e formule geometriche.

- La modellazione organica invece è ampiamente utilizzata per creare rappresentazioni di esseri umani, creature e animali. È impiegata per gli oggetti naturali come rocce, piante, alberi e per la modellazione del terreno in generale, ma anche per molti oggetti di *design* industriale caratterizzati da forme morbide e arrotondate e la qualità dei modelli organici dipende dalla quantità di dettagli presenti.

È importante notare che uno stesso oggetto può contenere sia elementi di modellazione organica che geometrica e può essere costituito da diverse parti che incorporano sia modelli organici che geometrici. Questa integrazione di approcci di modellazione diversi consente di rappresentare in modo accurato una vasta gamma di oggetti e scene virtuali (fig. C.1).

Oltre alle categorie di modellazione sopra descritte, i modelli 3D possono essere classificati in tre generi distinti in base alla loro rappresentazione: la modellazione solida, volumetrica e di superfici.

- La modellazione solida considera l'oggetto come formato da un volume pieno e trova ampio impiego nella progettazione di oggetti tecnici o meccanici. Questo metodo sfrutta le operazioni booleane, come l'unione, la sottrazione e l'intersezione di forme solide primitive, per creare modelli con proprietà fisiche solide e ben definite (fig. C.2).
- La modellazione volumetrica si basa sulla generazione di entità che determinano una superficie implicita<sup>3</sup>. Questo metodo è spesso utilizzato per rappresentare fenomeni fisici complessi come nuvole, fumo o fluidi. Si basa su funzioni matematiche o procedimenti di campionamento per creare oggetti tridimensionali che non sono descritti esplicitamente dalla geometria delle loro superfici.
- Infine, la modellazione di superfici considera l'oggetto in base alle sue superfici esterne, fornendo un elevato grado di dettaglio e precisione ed è comunemente utilizzato nella creazione di personaggi, creature e oggetti di forma complessa (fig. C.3). Per ottenere modelli 3D che rappresentino con precisione le superfici di oggetti organici o di *design*, vengono impiegate diverse tecniche come l'utilizzo di curve, *patch*<sup>4</sup> o *mesh*<sup>5</sup>. La modellazione 3D si avvale di diverse tecniche, categorie e generi per creare rappresentazioni virtuali realistiche di oggetti e la scelta della tecnica più appropriata dipende dalle esigenze specifiche del progetto e dal risultato finale desiderato. La conoscenza di queste diverse categorie e generi di modellazione fornisce una base solida per gli operatori coinvolti nell'elaborazione digitale 3D, consentendo di selezionare l'approccio più idoneo per creare modelli accurati e di alta qualità.

### C.1.2 Tecniche della modellazione 3D

Le tecniche di modellazione 3D possono variare a seconda delle esigenze del progetto e delle competenze degli sviluppatori coinvolti. Alcuni dei principali metodi di modellazione 3D includono la modellazione procedurale, la modellazione manuale, la modellazione parametrica e la modellazione a partire dal rilievo. Queste categorie rappresentano differenti approcci alla creazione di modelli 3D e offrono vantaggi e limitazioni specifiche, a seconda delle esigenze e degli obiettivi del progetto.

- La modellazione procedurale prevede un approccio basato sull'utilizzo di algoritmi e regole predefinite per generare forme e strutture complesse in modo automatico o semi-automatico. Questi algoritmi sono in grado di creare oggetti tridimensionali seguendo parametri e regole specifiche, consentendo di ottenere risultati altamente dettagliati e realistici [Kurt, Bulbul, 2021].

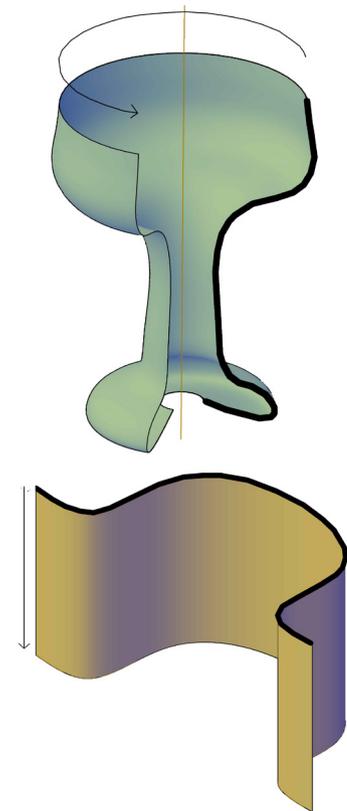


Fig. C.3 - Modellazione per superfici. Superficie di rivoluzione intorno ad un asse e superficie estrusa lungo un asse a partire da una curva generatrice.

## APPENDICE C

Viene utilizzata per modelli con strutture organizzate e forme ripetitive e permette di generare oggetti complessi.

- La modellazione manuale è l'approccio tradizionale di creazione di modelli 3D, in cui gli sviluppatori utilizzano strumenti di modellazione 3D per costruire e scolpire oggetti manualmente in modo dettagliato. Questo metodo richiede competenze tecniche e una conoscenza approfondita del *software* di modellazione 3D impiegato.

A partire da una forma base, quest'ultima viene manipolata e arricchita di dettagli per creare l'oggetto desiderato con la possibilità di avere un controllo preciso sulla forma e sulle caratteristiche dell'oggetto. [Machidon *et al.*, 2018] (fig. C.4).

- La modellazione solida parametrica consente di creare modelli tridimensionali attraverso l'uso di parametri e relazioni tra gli elementi del modello. In questa tecnica, gli oggetti vengono creati definendo le loro caratteristiche geometriche, come dimensioni, forma e relazioni spaziali, attraverso l'utilizzo di parametri variabili. Ciò consente di ottenere un modello flessibile, in cui è possibile apportare modifiche ai parametri per ottenere varianti del modello di base [Scandurra, 2020].

La modellazione solida parametrica offre numerosi vantaggi, tra cui la possibilità di creare facilmente *design* iterativi, in cui è possibile esplorare diverse configurazioni e valutare l'impatto delle modifiche sui parametri. Inoltre, consente di creare modelli con una struttura solida e precisa, che possono essere utilizzati in applicazioni come la prototipazione rapida, la produzione automatizzata e la simulazione.

- La modellazione da dati reali, anche nota come modellazione basata su scansione 3D o fotogrammetria, sfrutta la tecnologia di scansione tridimensionale per acquisire dati reali di oggetti esistenti e convertirli in modelli 3D digitali. Utilizzando dispositivi di scansione tridimensionale è possibile catturare la geometria e la superficie di oggetti reali con elevata precisione (fig. C.5). I dati acquisiti vengono poi elaborati e trasformati in modelli *mesh* 3D utilizzabili. Questo approccio consente di creare modelli altamente accurati e dettagliati di oggetti esistenti, riducendo al minimo la necessità di modellazione manuale.

### C.1.3 Principali metodi di modellazione 3D

All'interno delle categorie di modellazione 3D sopra menzionate, esistono vari metodi specifici utilizzati per creare modelli 3D. Alcuni dei principali metodi includono la modellazione primitiva, la modellazione poligonale e le NURBS<sup>6</sup>.

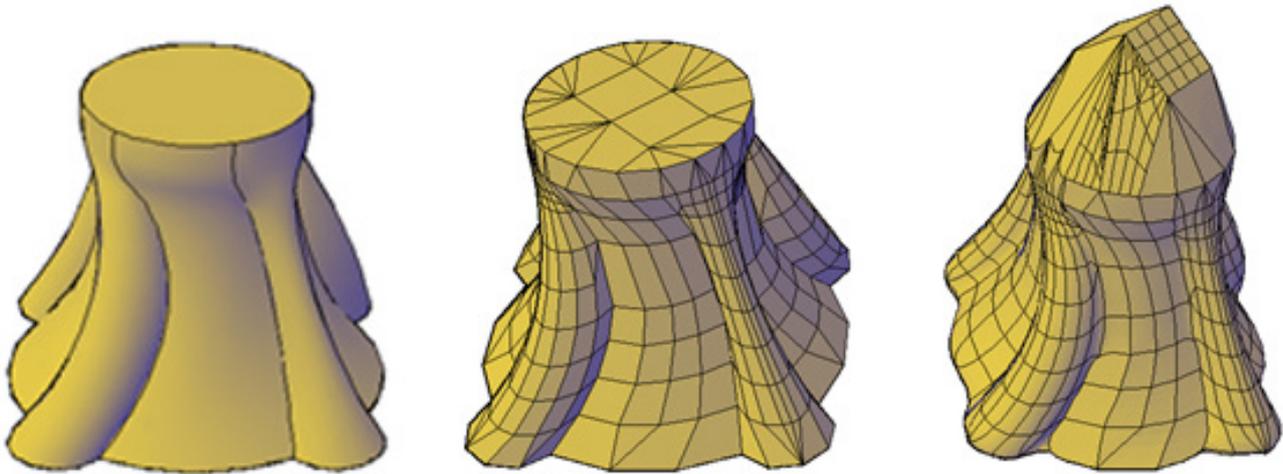


Fig. C.4 - Modellazione manuale. [www.help.autodesk.com]

- La modellazione primitiva è un metodo di modellazione 3D che utilizza forme geometriche di base, chiamate primitive, come cubi, sfere, cilindri e coni, per creare oggetti più complessi. Gli sviluppatori combinano, modellano e modificano queste primitive per creare la forma desiderata dell'oggetto. Questo metodo è rapido ed efficace per creare modelli semplici, ma può richiedere ulteriori lavorazioni per creare oggetti più complessi.
- La modellazione poligonale è una tecnica di modellazione 3D basata sull'utilizzo di poligoni (come triangoli, quadrilateri e poligoni con più lati) per definire la forma degli oggetti. La modellazione poligonale offre un controllo preciso sulla geometria dell'oggetto ed è ampiamente utilizzata in molte applicazioni 3D per creare oggetti tridimensionali articolati.
- Le NURBS sono un metodo di modellazione 3D che utilizza curve e superfici matematiche per creare oggetti. Queste curve sono flessibili e consentono di creare forme lisce e precise, che possono essere facilmente modificate regolando i loro punti di controllo [Ushakov, 2011].

A differenza delle superfici poligonali molto sfaccettate, le superfici NURBS sono smussate e sono facilmente modificabili e controllabili grazie a un numero ridotto di punti di controllo<sup>7</sup>.

## APPENDICE C



Fig C.5 - Rilievo laser 3D tramite SCAN in a BOX di un bollo e successiva mesh elaborata dall'autrice.

È possibile generare una superficie NURBS utilizzando le stesse curve NURBS, mediante operazioni come estrusione<sup>8</sup>, rivoluzione<sup>9</sup>, *lofting*<sup>10</sup>, *patching*<sup>11</sup> e altre oppure utilizzando primitive predefinite, come sfere, cilindri, tori, ecc. (fig. C.6).

Le tecniche e i metodi di modellazione 3D offrono un'ampia gamma di opzioni per creare oggetti tridimensionali virtuali. La scelta del metodo di modellazione dipende dalla natura dell'oggetto da creare, dalle esigenze del progetto e dalle preferenze dello sviluppatore.

### C.2 Modello 3D a partire dal rilievo digitale

Il modello 3D a partire dal rilievo digitale ha come obiettivo principale la rappresentazione accurata di oggetti reali, analizzandone ogni caratteristica geometrica, colorimetrica e morfologica e grazie alla sua rappresentazione visiva realistica, facilita la comunicazione e la comprensione delle informazioni tridimensionali a diversi livelli. Per creare una replica digitale accurata, è necessario esaminare attentamente il luogo, raccogliere informazioni rilevanti sul contesto in cui si colloca e scegliere gli strumenti appropriati per effettuare il rilievo. Questi modelli 3D richiedono una lunga e elaborazione critica, che può partire da una nuvola di punti ottenuta tramite rilievi *image-based* o *range-based*,

o dalla loro integrazione<sup>12</sup>. Grazie agli sviluppi nella sensoristica, infatti ora è possibile acquisire una grande quantità di dati spaziali, georeferenziarli e ricavarne informazioni 3D in modo relativamente semplice.

L'uso sempre più diffuso delle restituzioni virtuali con ambientazioni e visualizzazioni 3D ha portato a numerose applicazioni, come la documentazione, la conservazione, il restauro virtuale, la simulazione, l'animazione, la cartografia, la gestione del territorio (GIS) e il monitoraggio. [Remondino *et al.*, 2011]. Per questo, l'utilizzo di tecniche *reality-based* è molto vantaggioso perché consente di acquisire digitalmente tutte le parti di un manufatto, creando una replica tridimensionale altamente dettagliata che rappresenta fedelmente il mondo reale e che permette letture interpretative e verifiche simili a quelle effettuate nello spazio fisico, senza filtraggi o discretizzazioni. Nello specifico, i rilievi fotogrammetrici utilizzano immagini che contengono tutte le informazioni necessarie per creare modelli 3D foto-realistici, inclusa la geometria e la *texture*. Dopo l'acquisizione delle immagini, il flusso di lavoro per ottenere informazioni metriche e 3D di una scena prevede diverse fasi: calibrazione della camera o del sensore per determinare l'orientamento interno, triangolazione delle immagini per determinare l'orientamento esterno, creazione di una nuvola di punti 3D, creazione di un modello poligonale geometrico strutturato (*mesh* o TIN<sup>13</sup>) e applicazione di una *texture* per ottenere un'ortofoto (fig. C.7).

Diversamente, un sensore ottico attivo misura principalmente le distanze e può restituire direttamente un grande numero di coordinate 3D delle superfici misurate.

Il flusso di lavoro per produrre modelli 3D con sensori attivi prevede l'acquisizione di diverse nuvole di punti o *range map*<sup>14</sup> per coprire l'intera area in esame, la registrazione e l'allineamento dei dati in un unico sistema di riferimento, la riduzione del rumore, degli errori e dei dati sovrapposti, la creazione di un modello poligonale strutturato e la registrazione dei dati dell'immagine sul modello geometrico. Ovviamente le tecniche e le metodologie di rilievo e modellazione 3D presentano caratteristiche e prestazioni diverse, e la scelta dipende dall'obiettivo finale del modello digitale, dalle caratteristiche geometriche e materiche dell'oggetto, dalle condizioni ambientali del rilievo, dal *budget* a disposizione e soprattutto dall'esperienza dell'operatore<sup>15</sup>.

L'integrazione delle diverse tecniche consente di ottimizzare il processo di acquisizione e modellazione, sfruttando al massimo le caratteristiche e le prestazioni di ciascun strumento [Drap *et al.*, 2003]. A seguito della scelta della metodologia di rilievo più adatta, uno dei passaggi fondamentali è la creazione di una *mesh* triangolata, composta da una serie di triangoli

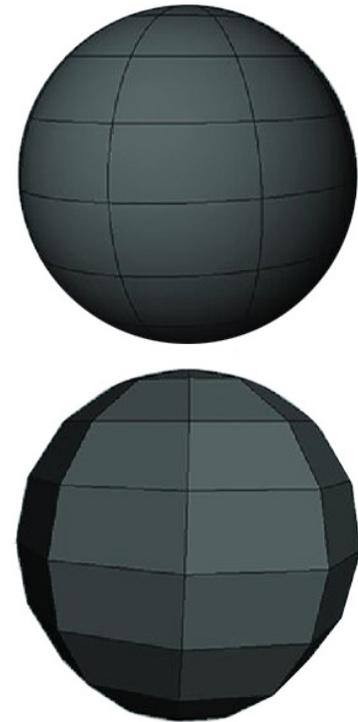


Fig. C.6 - Lo stesso modello 3D; in alto: come NURBS; sotto: come modello poligonale. [Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015]

## APPENDICE C

interconnessi che formano una superficie continua a partire dalla nuvola di punti frutto dei rilievi *reality-based*. Per ottenere una *mesh* vengono utilizzati algoritmi di triangolazione che collegano i punti della nuvola, creando una struttura tridimensionale. Questi algoritmi considerano la distribuzione e la densità dei punti, al fine di determinare la connettività tra di essi e generare i triangoli che costituiscono la *mesh*. Durante il processo di triangolazione, vengono presi in considerazione diversi fattori, come la distanza tra i punti, la continuità della superficie e la conservazione dei dettagli, con l'obiettivo di creare una superficie che rappresenti in modo accurato la forma e la struttura dell'oggetto o dell'ambiente rilevato. La rappresentazione a triangoli delle *mesh* risultanti consente una rappresentazione efficiente e dettagliata delle superfici tridimensionali; tuttavia è importante effettuare a monte un accurato filtraggio della nuvola per eliminare i punti ridondanti e gli elementi estranei che potrebbero influire sulle successive fasi computazionali.

L'accuratezza di questo processo è fondamentale per evitare la perdita di punti significativi e garantire una rappresentazione corretta del modello [Russo *et al.*, 2011].

Il modello *mesh* generato dalle nuvole di punti acquisite tramite rilievi *reality-based* svolge un ruolo di fondamentale importanza nella comunicazione e nella comprensione delle informazioni tridimensionali. Inoltre, la valutazione critica dei risultati ottenuti consente di individuare e risolvere eventuali problematiche emerse durante il processo di rilievo, migliorando la qualità e l'affidabilità dei dati acquisiti.



Fig. C.7 - Rilievo di un murales di Jorit a Napoli. Visione wireframe della *mesh* e visione con texture applicata al modello [Gallo, Scandurra, 2023]

È evidente che il modello *mesh* rappresenta un elemento chiave nelle pratiche di rilievo e svolge un ruolo cruciale per la comprensione e la rappresentazione dello spazio tridimensionale<sup>16</sup>.

### C.3 Modello 3D per la fruizione virtuale

L'evoluzione della modellazione 3D ha avuto un impatto significativo sull'industria della *computer* grafica, consentendo la creazione di ambienti virtuali sempre più realistici con un alto livello di fedeltà e precisione.

Un modello virtuale di un bene può avere diversi valori a seconda delle informazioni che fornisce e può essere utilizzato anche per valutare l'evoluzione dell'ambiente rilevato sovrapponendo ricostruzioni 3D fatte in momenti diversi della vita dell'oggetto, per poter confrontare presente e passato, e valutare e quantificare i cambiamenti avvenuti nel tempo.

I modelli possono essere costruiti sulla nuvola di punti, oppure possono integrare il rilievo laddove ci siano delle lacune o grandi mancanze. Infatti l'utilizzo di modelli 3D a partire dal rilievo digitale può essere la base per la costruzione di eventuali assenze o per ipotesi ricostruttive delle diverse fasi storiche.

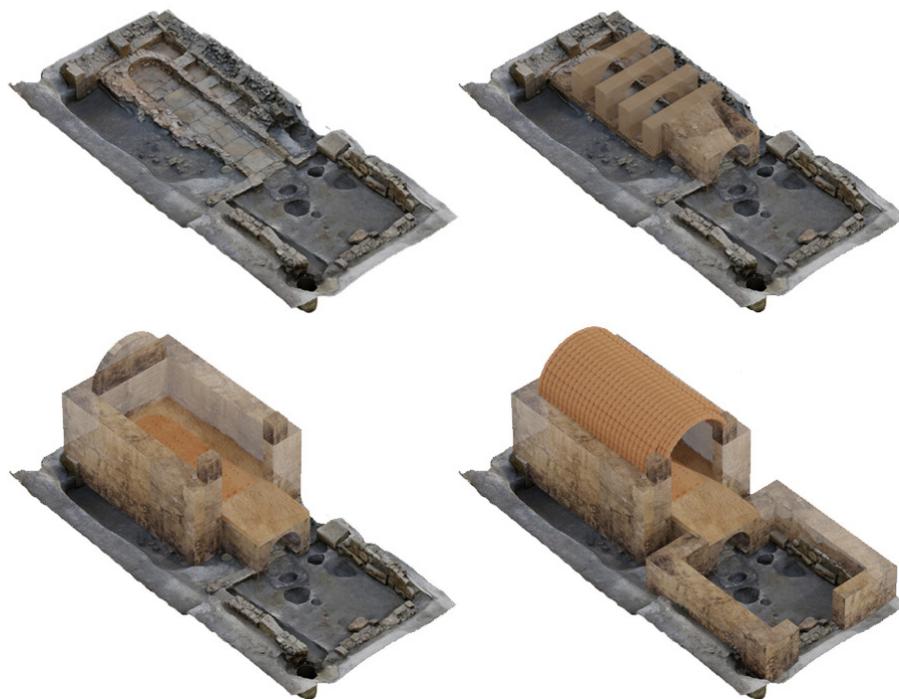
Attraverso l'analisi dei modelli tridimensionali, gli studiosi possono identificare spazi vuoti o mancanti, ipotizzando possibili strutture o dettagli non più in loco. Per questo, e grazie all'aspetto fortemente comunicativo di questi modelli 3D, la realtà virtuale può essere sfruttata per altre discipline ed in sinergia con altre figure professionali (fig. C.8).

In ambito archeologico, ad esempio, inizia ad essere molto diffusa poiché offre più di una replica del contesto reale e consente ricostruzioni virtuali, basate su fonti o su ipotesi che possono essere sviluppate per epoche diverse e possono essere correlate o sovrapposte alle testimonianze archeologiche superstiti [Forte, Danelon, 2015].

La possibilità di fruire virtualmente degli spazi consente di avanzare nuove ipotesi e di ampliare la comprensione degli oggetti e degli ambienti studiati in maniera più immediata e stimolante. La fruizione virtuale di questi modelli consente di visitare luoghi remoti e di esplorare ambienti virtuali da diverse prospettive.

La fruizione di questi modelli crea una connessione diretta tra i dati tangibili

## APPENDICE C



*Fig. C.8 - Ipotesi ricostruttiva di una fornace ellenistica a partire dalla sua mesh ottenuta dal rilievo fotogrammetrico. [Fregonese et al., 2023]*

(collezione museale, resti archeologici ecc.) e lo spazio invisibile remoto, riproducendo la scena, l'ambiente e l'atmosfera del contesto passato in una modalità immersiva [Navvab *et al.*, 2013]. Ciò apre nuove opportunità per la ricerca e la divulgazione scientifica, consentendo a un pubblico più ampio di accedere a informazioni e nuove esperienze.

La ricostruzione di superfici *mesh* da nuvole di punti è un argomento di ricerca chiave poiché consente successive applicazioni informatiche come calcolo, *rendering*<sup>17</sup>, illuminazione, deformazione e simulazione fisica. In particolare, il raggiungimento di risultati ad alta fedeltà è stato uno degli obiettivi principali in questo campo e ha un valore significativo in vari domini, come il *reverse engineering*<sup>18</sup>, l'animazione di giochi, la realtà virtuale e aumentata e la visione robotica. Tra le diverse soluzioni utilizzate per raggiungere questo risultato, i modelli poligonali triangolari o quadrangolari si sono dimostrati particolarmente adatti per descrivere accuratamente le caratteristiche dei manufatti storici e garantire un dettaglio di superficie ottimale.

Questi modelli ottenuti a partire dai rilievi *reality-based* infatti consentono di riprodurre in modo dettagliato le peculiarità delle superfici, mantenendo un alto livello di accuratezza. Nonostante i numerosi vantaggi, l'utilizzo di modelli 3D per la fruizione virtuale può comportare alcuni limiti<sup>19</sup>. La creazione di modelli 3D accurati infatti, richiede competenze e risorse tecniche adeguate, sia in termini di strumentazione che di *software*<sup>20</sup>.

### C.3.1 Semplificazione del modello per la fruizione virtuale

Per ottenere il miglior compromesso tra alta risoluzione per una visione ottimale dei dettagli dell'oggetto e la buona navigabilità nell'ambiente di realtà virtuale, sono necessarie delle operazioni di semplificazione del modello (decimazione, filtraggio, pulizia, *smoothing*). Inoltre, per renderlo visivamente realistico è necessario proiettare sulle superfici triangolari una *texture* fotografica ad alta risoluzione, eventualmente editata con bilanciamento dei colori, ombre e contrasto [Micoli *et al.*, 2020]. In tale contesto assume un ruolo fondamentale il processo di semplificazione triangolare o di retopologia<sup>21</sup> che consiste nel ricostruire il modello scansionato creandone una nuova versione che ne rispecchia determinate caratteristiche, ma risulta

## APPENDICE C

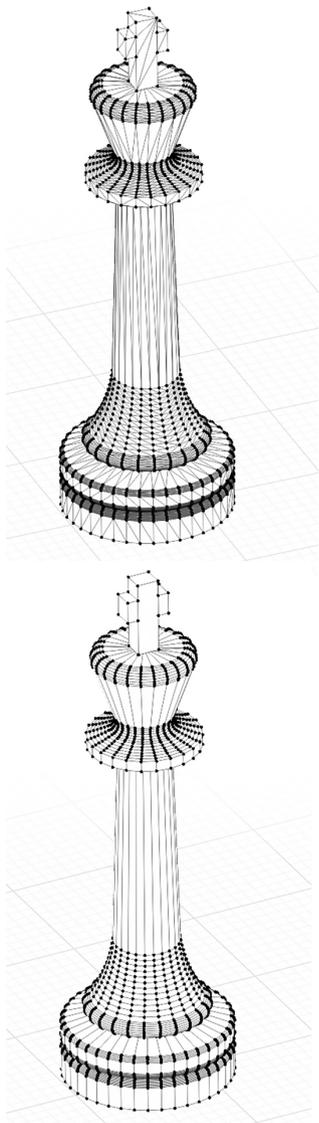


Fig. C.9 - Semplificazione della modellazione a partire da una *mesh* triangolata con 23680 facce ad una *mesh* regolare quadrangolare con 11840.

alleggerito, in modo da ridurre sensibilmente la quantità di risorse richieste. Questa caratteristica è fondamentale nei contesti *real-time*<sup>22</sup>, dove i tempi di elaborazione sono molto ristretti. In seguito, vengono curati anche gli aspetti topologici della nuova *mesh* poligonale, ovvero la disposizione degli elementi che la compongono in modo tale da rendere il modello adatto alle successive fasi di lavorazione come il *texture mapping* per aumentarne la resa finale.

In questo modo vengono eliminati dettagli non necessari migliorando l'adattamento della *mesh* ai requisiti di modellazione.

La regolarità dei quadrilateri semplifica notevolmente l'operazione di retopologia, garantendo una transizione più fluida tra le diverse regioni della *mesh* e consentendo una suddivisione più uniforme e controllata della superficie, pur mantenendo la coerenza della forma e dei dettagli [Guidi, Angheldu, 2016] (fig. C.9).

La semplificazione triangolare invece non modifica la forma delle facce, ma svolge un ruolo cruciale nella riduzione del numero di elementi sulla superficie, consentendo di ottenere una versione semplificata, ma fedele, della *mesh* ad alta risoluzione iniziale. Questo processo è guidato da criteri di qualità definiti dall'utente, che consentono di preservare specifiche proprietà originali, come la distanza geometrica o l'aspetto visuale. Esistono diversi approcci per la semplificazione triangolare tra cui la decimazione, l'ottimizzazione, il *clustering*, lo *smoothing* e il *remeshing*.

- La decimazione della *mesh* è un processo di riduzione del numero di poligoni senza alterarne in modo significativo l'aspetto visivo. Questo può essere utile per ottimizzare le prestazioni di *rendering* o per ridurre la complessità di un modello. La decimazione viene eseguita identificando i poligoni meno importanti o meno visibili e rimuovendoli, riducendo così la quantità di dati da elaborare (fig. C.10).

- L'ottimizzazione è il processo di manipolazione e trasformazione utilizzato al fine di migliorare determinati aspetti o proprietà della *mesh*. Questo può includere la riduzione del numero di poligoni per una rappresentazione più leggera, la regolarizzazione dei vertici per una maggiore uniformità e l'ottimizzazione della topologia per una migliore connettività o il miglioramento della qualità dei dettagli [Gálvez *et al.*, 2014].

- Il *face or region clustering* è un metodo utilizzato per semplificare una *mesh* 3D raggruppando insieme facce o regioni che condividono caratteristiche simili.

Questo processo coinvolge l'analisi della geometria delle facce o delle regioni

circostanti e la fusione di quelle che sono considerate coplanari<sup>23</sup> o simili in termini di forma o colore. L'obiettivo è ridurre il numero complessivo di facce o regioni nella *mesh*, creando una rappresentazione più compatta e meno dettagliata, ma conservando le caratteristiche principali del modello originale.

- Il *remeshing* è il processo di ricostruzione o ridistribuzione dei poligoni al fine di ottenere una nuova struttura topologicamente migliore o di diversa densità.

Questo può comportare la creazione di una nuova *mesh* con poligoni di dimensioni più uniformi, una maggiore connettività tra i vertici o una distribuzione ottimizzata dei poligoni.

- Lo *smoothing* invece è un processo che mira a ridurre le irregolarità superficiali e le discontinuità della forma di una *mesh* tridimensionale. Questo viene realizzato attraverso l'applicazione di algoritmi che modificano le posizioni dei vertici della *mesh* in modo da creare una superficie più uniforme. L'obiettivo dello *smoothing* è migliorare l'estetica visiva della *mesh*, ridurre gli artefatti e le imperfezioni, e ottenere una rappresentazione più fluida della forma tridimensionale (fig. C.11).

L'applicazione di uno o più di questi processi migliora la qualità della *mesh*, ne semplifica la geometria e la rende adatta a scopi come la simulazione ed il *rendering* in *real time*, fruito sia tramite *desktop* che tramite visori di realtà virtuale (VR). Tuttavia, per rendere l'esperienza di fruizione virtuale ancora più coinvolgente e realistica, diventa cruciale l'applicazione della *texture* al modello semplificato. Le *texture* sono immagini ottenute dal rilievo *reality-based* che vengono posizionate e proiettate sulla superficie del modello per aggiungere dettaglio, colore e realismo visivo. Le *texture* svolgono un ruolo fondamentale nel fornire informazioni visive aggiuntive, come dettagli di superficie, trame, colori e pattern, che arricchiscono la percezione del modello da parte dell'utente. Questo permette di creare un'esperienza virtuale più coinvolgente e immersiva, consentendo di esplorare e interagire con il modello in modo più realistico. Inoltre, l'applicazione di *texture* può contribuire a mascherare le semplificazioni della *mesh*, rendendo questo modello semplificato visivamente simile alla sua controparte ad alta risoluzione (fig. C.12). Questo è particolarmente importante in contesti in cui la qualità visiva è essenziale, come nel settore dei videogiochi o dell'architettura virtuale, ma resta sempre fondamentale trovare un equilibrio tra la qualità visiva desiderata e le risorse computazionali disponibili per garantire un'esperienza fluida e performante.

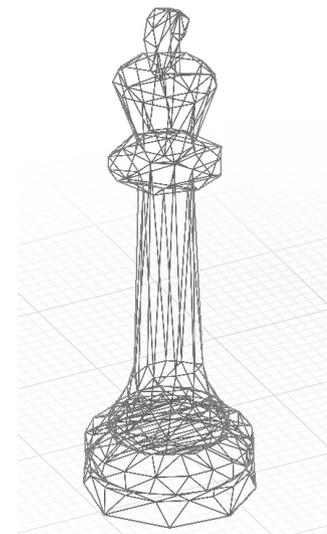


Fig. C.10 - Decimazione del 10% di una *mesh* triangolata. Da 23680 a 2368 facce.

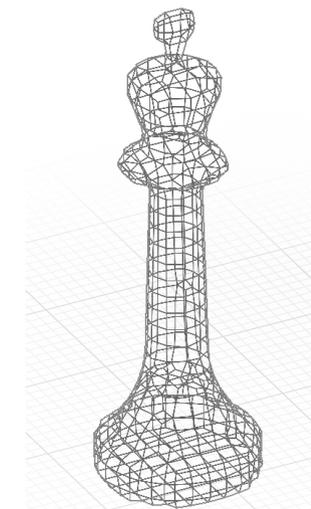


Fig. C.11 - *Smoothing* di una *mesh* triangolata.

## APPENDICE C

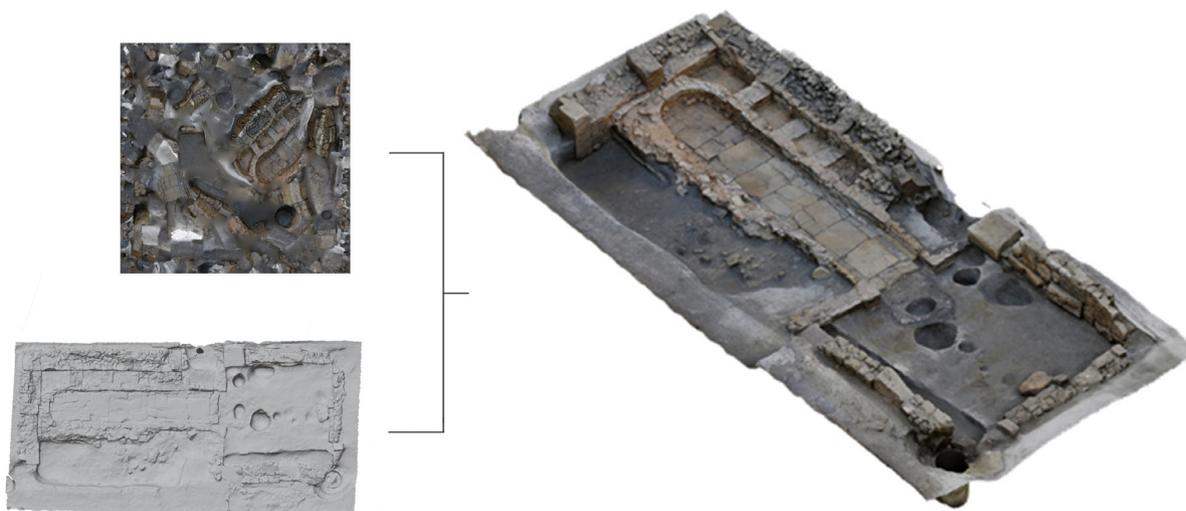


Fig. C.12 - Applicazione della texture ad un modello semplificato. Elaborazione a cura dell'autrice

### Note

1 A partire dal 1959, la collaborazione tra *General Motors* e IBM ha portato allo sviluppo del sistema 'DAC', uno dei primi sistemi CAD. Questo sistema utilizzava una penna ottica e uno schermo sensibile per consentire agli operatori di disegnare curve matematiche in uno spazio virtuale. Attraverso queste curve, venivano definiti i profili, le sezioni e le superfici delle automobili [Krull, 1994].

2 La storia della *computer grafica* 3D è molto recente, lo stesso termine di grafica computerizzata nasce solo nel 1960 [Carlson, 2017].

3 Una superficie implicita è una rappresentazione matematica di una superficie tridimensionale che viene definita indirettamente attraverso un'equazione matematica, in cui il valore della funzione varia in base alla posizione nello spazio.

4 Una *patch* è una porzione di superficie tridimensionale rappresentata da un insieme di poligoni connessi. Viene utilizzata per suddividere e gestire in modo efficiente la complessità dei modelli 3D.

5 Una *mesh* è una struttura tridimensionale composta da una serie di triangoli, o altre geometrie semplici, interconnessi che rappresentano una superficie continua. Viene utilizzata per creare modelli digitali di oggetti o ambienti tridimensionali.

6 Introdotta dalla *Boeing* nel 1975, la tecnologia NURBS è l'acronimo di *Non-Uniform Rational B*

*Spline* (*Splines* razionali e non uniformi partenti da una base).

7 I *control vertices* sono i punti chiave che determinano la forma e la struttura dell'oggetto. Ogni punto di controllo ha coordinate tridimensionali (x, y, z) e può essere spostato per modellare l'oggetto desiderato. L'interpolazione tra questi punti di controllo consente di ottenere una superficie curva e continua. Un aspetto importante delle NURBS è che i punti di controllo non corrispondono direttamente ai punti della superficie visibile. Invece, agiscono come influenze che determinano la forma dell'oggetto. La posizione dei punti di controllo e il loro peso influiscono sulla curvatura e sulla flessibilità della superficie NURBS; modificando la posizione, l'orientamento o il peso di un punto di controllo, è possibile ottenere una varietà di forme e curvature diverse.

8 L'estrusione consiste nel creare una forma tridimensionale allungando o estendendo una forma bidimensionale lungo un percorso specificato.

9 La rivoluzione è una tecnica di modellazione che coinvolge la rotazione di una forma bidimensionale intorno a un asse specifico.

10 Il *lofting* è una tecnica di modellazione che consiste nel creare una transizione fluida tra due o più profili bidimensionali (curve o poligoni) per generare una superficie continua tridimensionale. Si prendono i profili di partenza e il *software* di modellazione crea una superficie liscia che collega i profili in modo graduale, tenendo conto delle curve e delle forme desiderate.

11 Il *patching* è una tecnica di modellazione che coinvolge la creazione di superfici tridimensionali unendo insieme una serie di *patch* o 'pezzi' di superficie. Le *patch* sono superfici bidimensionali, spesso di forma quadrangolare o rettangolare, che vengono modellate separatamente e quindi combinate per formare una superficie 3D complessa.

12 La densità della nuvola di punti prodotta dai sistemi *ranged-based* generalmente è più fitta di quella *image-based* e quindi nell'unione delle due si avranno zone più o meno fitte. Tuttavia ridurre la risoluzione della prima comporterebbe la perdita di dettagli geometrici dell'oggetto e parallelamente aumentare la risoluzione delle acquisizioni *image-based* richiederebbe tempi molto lunghi per le elaborazioni e l'uso di *hardware* ad altissime prestazioni.

13 Un TIN, acronimo di *Triangulated Irregular Network*, è una forma di rappresentazione spaziale utilizzata nella modellazione del terreno o della topografia. In un TIN, la superficie è suddivisa in triangoli irregolari che si adattano alle informazioni puntuali disponibili. I punti di campionamento sono i vertici dei triangoli, e la connessione tra i punti forma la struttura.

14 Una *range map* (mappa di intervallo o mappa di gamma) è una rappresentazione grafica o digitale di un intervallo di valori che può essere associato a ciascun punto di un'immagine o di uno spazio tridimensionale; è uno strumento utile per catturare e rappresentare le variazioni di valore o intensità in un contesto visivo o tridimensionale, contribuendo a fornire informazioni dettagliate per applicazioni come la modellazione 3D, la grafica computerizzata e la fotografia avanzata.

15 Le caratteristiche intrinseche degli strumenti di rilievo si integrano in modo complementare, consentendo una maggiore flessibilità e ottenendo risultati notevolmente migliori sia in termini assoluti che adattandosi alle specifiche esigenze morfologiche degli oggetti presenti nella scena rilevata.

## APPENDICE C

16 L'adozione di queste tecniche di rilievo e documentazione 3D digitale non snatura le figure professionali dell'architetto, dell'archeologo o di altre discipline simili, né le obbliga a specializzarsi in modo eccessivamente verticale. Al contrario, tali tecniche offrono opportunità di crescita professionale e favoriscono una collaborazione interdisciplinare, consentendo una migliore comprensione e rappresentazione degli oggetti e degli ambienti tridimensionali a diversi livelli.

17 Il *rendering* è il processo di generazione di immagini o animazioni tridimensionali a partire da modelli 3D. Permette di visualizzare in modo realistico oggetti, ambienti e scene virtuali attraverso l'applicazione di luci, *texture*, ombre e effetti speciali.

18 Il *reverse engineering* è il processo di analisi di un prodotto o sistema per comprendere il suo funzionamento interno, la sua struttura o il suo *design*. Viene utilizzato per diversi scopi, come comprendere prodotti concorrenti, riparare e mantenere prodotti danneggiati, migrare *software* e garantire l'interoperabilità tra prodotti e sistemi.

19 Tra questi ci sono:

- Complessità computazionale: modelli 3D dettagliati possono richiedere notevoli risorse computazionali, causando lentezza o problemi di visualizzazione su dispositivi con prestazioni limitate.
- Requisiti *hardware*: la fruizione virtuale di modelli 3D può richiedere *hardware* specializzati, come dispositivi di realtà virtuale o grafica avanzata, che potrebbero non essere disponibili o accessibili a tutti gli utenti.
- Dimensione dei *file*: modelli 3D dettagliati possono generare file di grandi dimensioni, rendendo necessario l'uso di connessioni internet veloci per il *download* o la visualizzazione *online*, e potrebbero occupare spazio significativo sul dispositivo dell'utente.

20 Gli algoritmi di ricostruzione tradizionali ottengono un'elevata fedeltà producendo *mesh* triangolari dense e ad alta risoluzione, ma questo approccio può richiedere spazio di archiviazione o onere computazionale non necessario a causa dell'elevato numero di triangoli che compongono la *mesh* [Qi Liu et al., 2023].

21 'Retopologia' deriva dalla combinazione delle parole 'rete' (dal latino '*rete*') e 'topologia' (dal greco '*topos*' che significa 'luogo' e '*logia*' che significa 'studio' o 'scienza'). In questo contesto, 'rete' si riferisce alla nuova struttura poligonale che viene creata durante il processo di retopologia per un modello 3D, mentre 'topologia' fa riferimento alla struttura e all'organizzazione generale dei poligoni nel modello. Quindi, 'retopologia' si riferisce allo studio o all'ottimizzazione della struttura a rete dei poligoni in un modello 3D.

22 Il termine *real-time* viene spesso utilizzato per descrivere l'elaborazione e la visualizzazione di dati o informazioni in tempo reale, in modo che le risposte siano istantanee e sincronizzate con gli eventi in corso. Ciò è fondamentale in applicazioni come videogiochi, simulazioni, sistemi di controllo industriale e comunicazioni in tempo reale, in cui la tempestività è essenziale per una corretta operatività e interazione con l'utente.

23 Il termine coplanari viene utilizzato per descrivere un insieme di punti, linee o oggetti che giacciono tutti sullo stesso piano.

## APPENDICE D

### Tecnologie virtuali per il Patrimonio Costruito

#### D.1 Comunicazione e *visual design* per l'architettura

Nel contesto della valorizzazione del Patrimonio Architettonico, la comunicazione svolge un ruolo essenziale, combinando l'obiettivo di preservare la materialità dei beni con la promozione di esperienze fruibili sia nel mondo reale che in quello virtuale. L'avvento delle nuove tecnologie ha rivoluzionato in modo positivo l'approccio alla comunicazione e alla fruizione, aprendo nuove opportunità e sfide.

In particolare, la digitalizzazione dei beni culturali, l'allestimento di piattaforme di dati, le animazioni e le ricostruzioni tridimensionali hanno ridefinito gli spazi, i tempi ed i rapporti con la conoscenza. L'applicazione delle ICT<sup>1</sup> e del *visual design*<sup>2</sup> al Patrimonio Architettonico muta il tradizionale rapporto tra opera d'arte e fruitore. Non è più una relazione statica passiva, ma al contrario è dinamica, interattiva e più coinvolgente.

È necessario, in riferimento al Patrimonio Storico-Architettonico, ma anche al Patrimonio Culturale nel senso più ampio, effettuare una prima grande distinzione tra *digital heritage* e *virtual heritage*, entrambi legati all'utilizzo delle tecnologie ICT, ma profondamente diversi nel modo in cui il fruitore e l'oggetto si relazionano [Bogdanovych *et al.*, 2009].

Con il termine *digital heritage*<sup>3</sup> si intende il Patrimonio Culturale archiviato su appositi supporti informatici con l'obiettivo di utilizzare nuovi media e nuovi strumenti per contribuire alla sua conoscenza e quindi alla sua conservazione. Relazionando tra loro sia i dati desunti dalle fonti storiche, documentarie ed iconografiche, sia quelli derivanti dall'opera fisica [Bonacini, 2004; Guidi, Russo, 2009] il *digital heritage* permette la conservazione e la fruizione digitale di molti beni che, altrimenti, avrebbero rischiato di andare persi o di non essere più accessibili agli studiosi e al pubblico<sup>4</sup> [Frassine *et al.*, 2016; Moretti, Furlan, 2011].

## APPENDICE D

Il *virtual heritage* è un settore più specifico del *digital heritage*, ma ha caratteristiche molto differenti<sup>5</sup>. Al suo interno rientrano i progetti di *Virtual Reality* (VR) e di *Augmented Reality* (AR) e, più in generale quelli di *Extended Reality*<sup>6</sup> (XR), ovvero quei progetti di comunicazione volti a fornire informazioni aggiuntive, rispetto a quelle immediatamente percepibili, e volti a rendere immersiva, interattiva e multi-sensoriale la fruizione dell'oggetto [Okanovic *et al.*, 2022]. Queste tecnologie, grazie ai modelli 3D, i *tour* virtuali, le animazioni e la visualizzazione dei dati consentono agli utenti di esplorare gli edifici da diversi punti di vista e comprenderne le specificità. Per questo motivo è importante che abbiano un'interfaccia utente intuitiva e *user-friendly*<sup>7</sup>, che abbiano contenuti multimediali interattivi<sup>8</sup> e che siano fruibili anche sui social media per diffondere e promuovere il Patrimonio Architettonico a più livelli.

### D.2 L'Extended Reality e l'interazione uomo-tecnologia

L'*Extended Reality* è un concetto ampio e versatile che combina ambienti reali e virtuali e permette interazioni avanzate tra l'uomo e la tecnologia. A differenza della digitalizzazione del patrimonio costruito del *digital heritage*, che si concentra principalmente sulla trasposizione delle informazioni esistenti nel mondo digitale, l'XR mira a espandere e arricchire l'esperienza dell'utente, introducendo nuovi elementi e modalità di fruizione. L'XR va oltre una singola tecnologia e trova applicazione in diversi settori includendo sia la realtà aumentata che la realtà virtuale e offre nuovi modi di fruire e ampliare la comunicazione. Non si limita solo all'aspetto visivo, ma si preoccupa anche di coinvolgere gli altri sensi come l'udito e il tatto, creando esperienze multisensoriali coinvolgenti (fig. D.1).

L'XR consente all'utente, da un lato, di interagire con l'ambiente circostante senza restrizioni, vincoli predeterminati e senza filtri che limitano la connessione con il mondo reale, dall'altro lato, crea un ambiente digitale completamente immersivo, utilizzando modelli tridimensionali per simulare le caratteristiche dell'ambiente reale con un alto livello di realismo.

Nel mezzo, si trovano le esperienze di *Mixed Reality* (MR) che combinano elementi reali e virtuali, permettendo interazioni spaziali e relazionali tra gli oggetti. MR è dunque un sottoinsieme di XR che si concentra sulla fusione di elementi virtuali con il mondo fisico in modo che sembrano coesistere nello stesso spazio. Nelle esperienze di MR, gli oggetti digitali sono integrati e interagiscono con l'ambiente

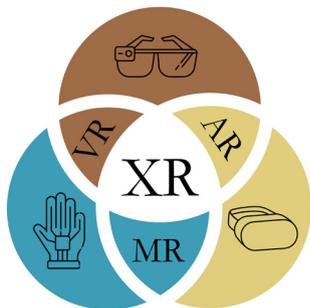


Fig. D.1 - La XR si riferisce a tutti gli ambienti combinati reali e virtuali e alle interazioni uomo-macchina generate dalla tecnologia informatica e dai dispositivi indossabili. Elaborazione a cura dell'autrice.

fisico in modo realistico ed in tempo reale, consentendo agli utenti di percepire e manipolare entrambi gli elementi in modo simultaneo. Ad esempio, gli oggetti virtuali possono apparire solidi e possono reagire alle interazioni dell'utente o all'ambiente circostante.

La MR si situa lungo uno spettro che va dalla realtà fisica pura alla realtà virtuale completa, offrendo una gamma di possibilità intermedie in cui gli oggetti virtuali e reali coesistono e interagiscono in modo naturale. Grazie alle tecnologie avanzate, come i dispositivi indossabili o i visori intelligenti, la MR offre esperienze coinvolgenti e innovative, consentendo agli utenti di esplorare nuovi mondi e interagire con informazioni digitali in contesti reali (fig. D.2).

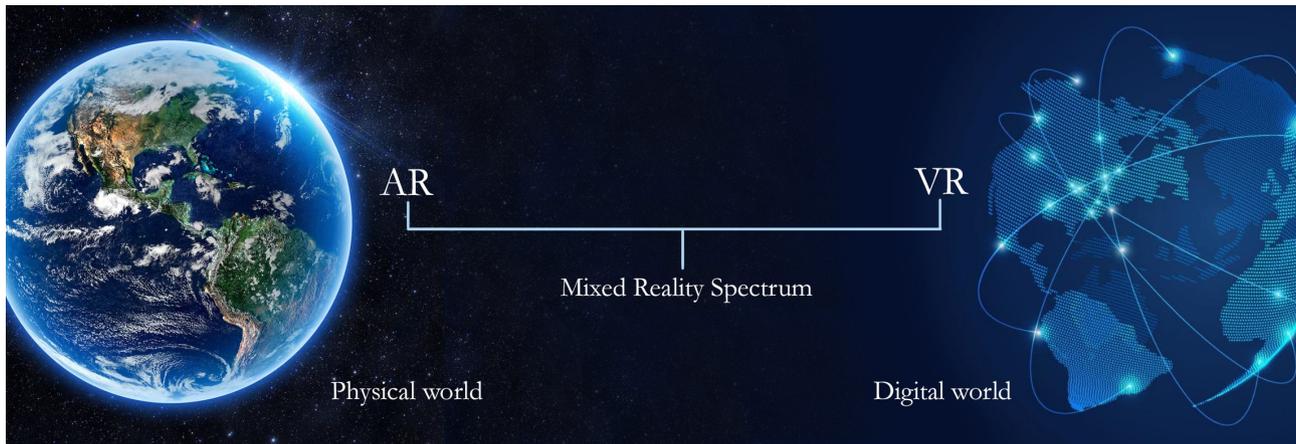


Fig. D.2 - La realtà mista è una tecnologia che combina elementi della realtà virtuale (VR) e della realtà aumentata (AR), consentendo agli utenti di interagire con oggetti e ambienti virtuali sovrapposti al mondo reale. Elaborazione a cura dell'autrice.

Complessivamente attraverso la *Mixed Reality*, la realtà aumentata e la realtà virtuale, l'approccio alla conoscenza del costruito storico si arricchisce di nuove prospettive, offrendo esperienze coinvolgenti e innovative che consentono di esplorare virtualmente gli edifici, visualizzare ipotesi di ricostruzione e condurre studi approfonditi sulle caratteristiche e le trasformazioni degli edifici nel corso del tempo. Queste tecnologie, combinando ambienti reali e virtuali, ampliano la comunicazione e permettono interazioni spaziali e relazionali tra gli oggetti, offrendo una comprensione nuova del Patrimonio Culturale.

## APPENDICE D

### D.2.1 La realtà aumentata (AR)

Sebbene le prime applicazioni di realtà aumentata risalgano al 1965 e al 1968<sup>9</sup> [Sutherland, 1968], la vera comparsa di tali tecnologie è avvenuta negli anni '80 e '90, quando gli scienziati hanno iniziato a sperimentare la realtà aumentata attraverso la fusione con esperienze artistiche interattive. Il termine 'realtà aumentata' è stato ufficialmente coniato nel 1992 da Tom Caudell e David Mizell<sup>10</sup> nel predisporre un sistema atto a fornire assistenza ai lavoratori in una fabbrica di aeroplani, mostrando schemi di fasci di cavi attraverso un dispositivo di visualizzazione trasparente montato sulla testa [Caudell, Mizell, 1992].

Questo lavoro ha segnato un importante punto di svolta nella crescita e nella definizione della realtà aumentata come campo di ricerca e applicazione e ne ha incentivato lo sviluppo; le successive fasi di costruzione del progetto AR si sono delineate in funzione degli obiettivi da perseguire, delle tecniche da utilizzare, delle modalità di esecuzione e della tipologia di informazioni da visualizzare.

La definizione più ampia di realtà aumentata, intesa come esperienza in cui il mondo fisico e quello virtuale si combinano in modo interattivo e in tempo reale, trova una sua formulazione nel 1997<sup>11</sup>. In questo senso la realtà aumentata colma il divario tra il mondo fisico e quello virtuale, sia dal punto di vista spaziale che cognitivo [Azuma, 1997].

Attualmente quando si parla di *Augmented Reality* ci si riferisce ad una versione 'aumentata' della realtà, creata grazie all'uso della tecnologia, che aggiunge informazioni digitali sovrapponendole all'ambiente reale<sup>12</sup>.

La realtà aumentata quindi arricchisce il mondo reale con la sovrapposizione di contenuti digitali, parte dalla nostra realtà e vi aggiunge qualcosa, non 'teletrasporta' altrove, ma amplifica il nostro attuale stato di presenza. Per fare ciò si avvale dell'utilizzo di varie tecnologie come il video *see-through*<sup>13</sup>. Gli strumenti più utilizzati sono gli *smartphone* o i *tablets*<sup>14</sup> poiché sono in grado di far vedere video, di aggiornarsi in tempo reale sulla base della loro posizione GPS e permettono di scaricare applicazioni AR in grado di riconoscere un *tag*<sup>15</sup>. Le *App* di realtà aumentata utilizzano la fotocamera del telefono per mostrare una visione del mondo reale di fronte all'utente e su quell'immagine di partenza vengono aggiunte ulteriori informazioni, come testi e/o altre immagini.

La fruizione della realtà aumentata richiede l'utilizzo di specifiche tecnologie per l'esecuzione di trasformazioni geometriche al fine di garantire la coerenza degli oggetti

virtuali percepiti dall'utente in termini di posizione, orientamento e dimensione nello spazio reale in cui sono inseriti. In tale contesto la registrazione e il *tracking* sono aspetti fondamentali che consentono la visualizzazione delle informazioni aggiuntive, adattando le caratteristiche all'utente, ad esempio modificando le dimensioni o l'orientamento in base alla distanza e alla direzione del suo punto di vista. Ciò riveste un'importanza fondamentale, poiché una visualizzazione non corretta potrebbe compromettere l'esperienza della realtà aumentata, generando sensazioni negative o addirittura comunicando informazioni errate [Pulcrano, 2021]. Pertanto, la corretta registrazione degli oggetti virtuali nel contesto spaziale reale e il preciso *tracking* del movimento dell'utente sono elementi essenziali per garantire un'esperienza accurata e efficace, che consenta una comunicazione chiara e una corretta comprensione delle informazioni visualizzate. Inoltre la realtà aumentata sta rivoluzionando il settore dell'architettura, consentendo nuove modalità di progettazione, visualizzazione e fruizione degli edifici. Questa tecnologia infatti offre una migliore comprensione degli spazi architettonici, facilita la comunicazione delle idee progettuali e favorisce l'interazione tra gli architetti, i committenti e il pubblico<sup>16</sup>. Attraverso l'utilizzo di applicazioni AR su dispositivi mobili è possibile inoltre

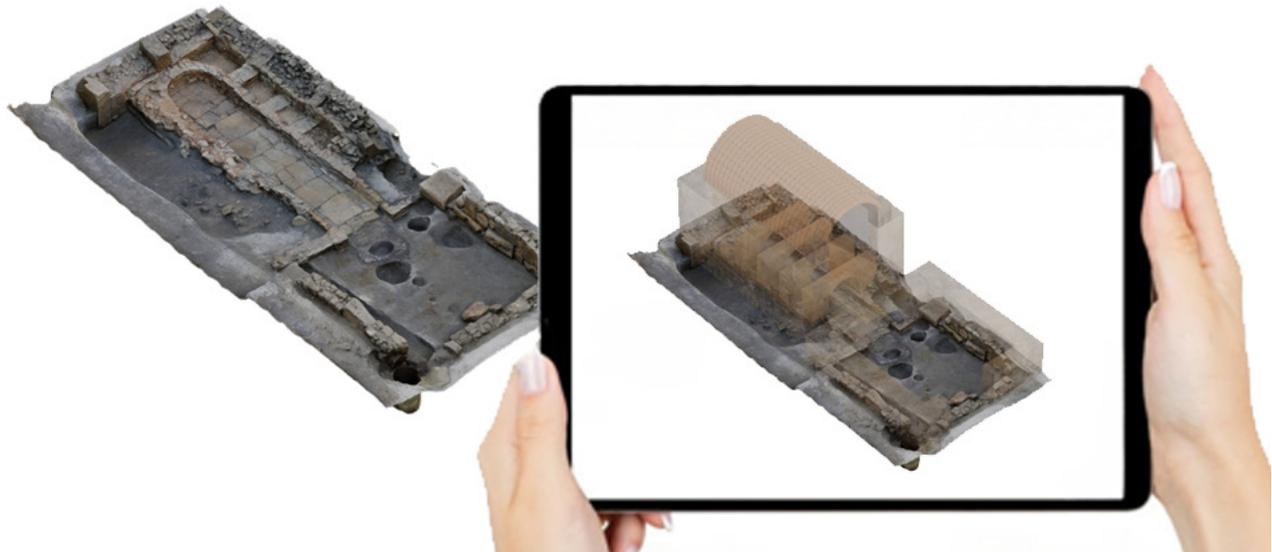


Fig. D.3 - Visione aumentata dell'ipotesi ricostruttiva della fornace ellensica tramite tablet. Elaborazione a cura dell'autrice

## APPENDICE D

esplorare edifici storici, accedere a informazioni dettagliate sui materiali utilizzati, sperimentare ricostruzioni virtuali di ambienti passati o ipotetici, e persino interagire con personaggi virtuali che narrano la storia dell'edificio (fig. D.3).

Nonostante le numerose applicazioni e i vantaggi offerti dalla realtà aumentata per l'architettura, esistono alcune sfide da affrontare. Tra queste la necessità di acquisire dati accurati degli edifici, di creare modelli 3D dettagliati ma leggeri, la calibrazione dei dispositivi di visualizzazione AR e l'interoperabilità tra i diversi *software* e piattaforme.

### D.2.2 La realtà virtuale (VR)

Anche la realtà virtuale ha avuto inizio negli anni '60<sup>17</sup> con esperimenti condotti da scienziati e ricercatori, ma a causa delle limitate risorse disponibili ha subito una fase di stagnazione durata fino agli anni '80 e '90 in cui ha finalmente vissuto una rinascita grazie ai nuovi sviluppi tecnologici. Infatti in questo periodo i dispositivi di visualizzazione sono diventati più accessibili e si sono registrati progressi nella grafica e nell'elaborazione dei *computer*. Nel 1989, Jaron Lanier ha coniato il termine 'realtà virtuale' e ha fondato la società *VPL Research*<sup>18</sup> per sviluppare e commercializzare dispositivi VR [Lanier, Frank Biocca, 1992]. A partire dagli anni 2000, la VR ha iniziato a interessare l'industria dei videogiochi e dell'intrattenimento, tuttavia, è stato solo nel 2010 che ha vissuto una vera e propria esplosione grazie al lancio di dispositivi come l'*Oculus Rift* e l'*HTC Vive*<sup>19</sup>, che hanno offerto esperienze immersive di alta qualità.

Lo sviluppo simultaneo di cuffie VR di livello *consumer*<sup>20</sup>, di motore di gioco 3D, di dispositivi mobili e l'aumento della potenza di calcolo per l'elaborazione di contenuti multimediali ha consentito l'emergere di tecnologie VR nei settori più disparati. Ciò ha generato un crescente interesse da parte di aziende e sviluppatori nel campo della VR, con l'applicazione della tecnologia in settori come l'intrattenimento, l'educazione, la medicina, l'architettura e la formazione<sup>21</sup>.

Attualmente quando si parla di *Virtual Reality* si intende una tecnologia capace di trasportare in una realtà diversa da quella che stiamo vivendo. Questo avviene grazie ai visori che, una volta indossati, sono capaci di isolare dal mondo ed immergere altrove. Tutto quello che vediamo e sentiamo è mutato con qualcosa generato al *computer*, che ci avvolge a 360 gradi producendo un'esperienza immersiva in cui possiamo interagire<sup>20</sup>. Questi visori

sono spesso utilizzati associati anche dei dispositivi di *input*, come *controller* o guanti, per consentire agli utenti di interagire<sup>22</sup> con gli oggetti virtuali usando anche le mani, proprio come nella realtà (fig. D.4).

Con l'utilizzo di questi strumenti è quindi possibile navigare all'interno dello spazio virtuale, visitando la scena 3D messa a disposizione ed effettuando una vera e propria esplorazione.

La realtà virtuale permette quindi di fruire in modo unico di modelli creati *ex novo*, ma anche di riproduzioni fedeli di siti storici che possono essere pubblicate e diffuse tramite diversi media e piattaforme.

Tali riproduzioni possono essere utilizzate per realizzare giochi educativi e favorire il



Fig. D.4 - Interazione tramite Oculus Quest 2 nell'applicazione Unity con un bollo ed altri elementi collocati all'interno della fornace in cui probabilmente sono stati cotti nel tra il III e il IV sec. a.C. [Fregonese L. et al., 2023].

## APPENDICE D

processo di insegnamento-apprendimento della storia [Todino, 2018].

La creazione di questi modelli virtuali però richiede un attento rilievo dell'ambiente e un alto livello di precisione geometrica e di dettaglio per rendere l'esperienza virtuale autentica.

Questo permette di superare le limitazioni di accesso dei siti, facilitando la diffusione e la conoscenza del Patrimonio Culturale. L'automazione dei processi di creazione e la ricerca di soluzioni a basso costo rendono queste applicazioni accessibili a un pubblico più ampio. Inoltre, la portabilità e la flessibilità delle applicazioni consentono agli utenti di esplorare il patrimonio virtuale su diverse piattaforme e di godere di un'esperienza personalizzata [El-Hakim *et al.*, 2004].

La realtà virtuale ha fatto importanti progressi nel corso degli anni, con miglioramenti nella qualità delle immagini, nella resa grafica e nella sensazione di immersione. Tuttavia, ci sono ancora sfide da affrontare, come la riduzione del costo dei dispositivi, la necessità di migliorare il comfort e la comodità nell'uso, e la gestione di eventuali problemi di nausea. Nonostante le sfide, la realtà virtuale ha dimostrato un grande potenziale nel trasformare la nostra esperienza di interazione con il mondo digitale e sta diventando sempre più diffusa nella nostra società, aprendo nuove possibilità di esperienze e applicazioni innovative.

Ovviamente per godere appieno dell'esperienza della realtà aumentata e virtuale, è fondamentale disporre di modelli di alta qualità. Questi modelli, come già detto, devono essere realistici per rendere l'esperienza coinvolgente, ma allo stesso tempo devono essere semplificati per garantire una risoluzione temporale adeguata. È di grande importanza minimizzare gli artefatti visivi, come lo sfarfallio e il *ghosting*<sup>23</sup>, che possono disturbare l'esperienza e compromettere l'illusione di realtà. Inoltre, è essenziale ridurre al minimo il ritardo tra l'azione dell'utente e la risposta dell'ambiente virtuale, per creare una sensazione di fluidità e reattività<sup>24</sup>.

### D.3 Applicazioni VR nei beni culturali

La realtà virtuale è già diventata un potenziale strumento che permette ai fruitori di navigare ed interagire in una scena in totale simbiosi con l'ambiente virtuale. Il sistema ha un impatto accattivante perché aggiunge nuove informazioni e consente un accesso diretto e intuitivo agli oggetti digitali [Forte *et al.*, 2006].

Le tecnologie virtuali permettono infatti di instaurare un 'dialogo' più intimo e

profondo e di ricreare virtualmente scenari di vita, dove manufatti, paesaggi, ambienti e personaggi possono (ri)vivere insieme in una combinazione coerente [Drossis *et al.*, 2018]. Le potenzialità della VR sono fondamentali soprattutto quando si ragiona in termini di *Educational Technology* al servizio della diffusione della cultura e della creatività tra i ragazzi, gli studenti, i ricercatori e tutto il vasto pubblico.

Questi sistemi, con il semplice utilizzo di un visore o altre periferiche<sup>25</sup>, consentono di sentirsi inclusi ed ‘essere presenti’ nell’ambiente virtuale, abbandonando la consapevolezza dello spazio reale in cui si è inseriti. Inoltre, la possibilità di integrare i movimenti del corpo e la libertà di movimento nella VR - grazie a dispositivi manuali o strumenti di tracciamento<sup>26</sup>- contribuisce a stimolare il senso di immersione [Foni *et al.*, 2010]. Il visore, in particolare, permette al fruitore di isolarsi e vivere l’esperienza in maniera immersiva e senza distrazioni esterne<sup>27</sup>. Il vantaggio di questa tecnologia è un approccio positivo all’interazione dell’utente con l’ambiente circostante attivando in tal modo la componente emotiva, che è un potente ‘strumento’ per l’archiviazione e il richiamo delle informazioni [Lenzi, 2005]. L’acquisizione della conoscenza non avviene infatti attraverso processi lineari, ma è sollecitata dalle nostre emozioni e dalla qualità delle nostre esperienze. Ovviamente per mantenere alto il livello di attenzione e motivazione è fondamentale lavorare sui contenuti e sull’accuratezza della ricostruzione 3D basata su rilievi ad altissima risoluzione [Pietroni *et al.*, 2019].

La visita, o meglio l’immersione, in un luogo tramite realtà virtuale è vantaggiosa per tanti aspetti. La rappresentazione del Patrimonio Culturale nella realtà virtuale trascende lo spazio e il tempo: gli utenti possono visitare luoghi remoti non accessibili o luoghi troppo lontani; oppure possono visitare i luoghi come erano in un diverso periodo attraverso la ricostruzione digitale di un edificio storico (fig. D.5).

Tramite queste ricostruzioni ci si può avvicinare a degli oggetti, si possono approfondire dei dettagli e soffermarsi più tempo su qualcosa senza dover seguire un percorso e dei tempi di vista prestabiliti.

La realtà virtuale, partendo da dati spaziali come nuvole di punti o modelli 3D, consente di sperimentare e conoscere in modo nuovo e coinvolgente, favorisce l’interazione e aiuta a rendere la cultura potenzialmente più accessibile ai fruitori con prospettive diverse.

## APPENDICE D



Fig. D.5 - Pulsante per passare dalla 'scena di rilievo' alla 'scena di ricostruzione' in modalità desktop [Fregonese et al., 2023].

### Note

1 *Information and Communications Technology* sono tutti i processi e le pratiche connesse alla trasmissione, ricezione ed elaborazione dei dati e delle informazioni e comprendono le tecnologie digitali.

2 Il *visual design* è un ramo del *design* industriale e il suo scopo è progettare, definire e ottimizzare prodotti grafici e multimediali. Permette di comunicare e veicolare un messaggio nella maniera più appropriata ed efficace possibile tramite l'utilizzo di immagini e grafiche.

3 Riguarda l'intero ambito del Patrimonio Culturale (monumenti, oggetti, luoghi, tradizioni) e i contesti della sua conservazione e fruizione pubblica (musei e biblioteche, eventi e installazioni temporanee o permanenti) attraverso un approccio metadisciplinare in grado di coniugare il rigore della documentazione scientifica con il necessario storytelling funzionale a una fruizione pubblica e condivisa.

4 Ad esempio antichi manoscritti non consultabili per la loro rarità e fragilità, oppure luoghi inaccessibili per calamità naturali o altri impedimenti.

5 La più importante è la possibilità di interagire in tempo reale con l'oggetto rappresentato cambiandone il punto di vista o esplorandone i contenuti aggiuntivi.

6 *Extended Reality* è un termine che si riferisce a tutti gli ambienti combinati reali e virtuali e alle interazioni uomo-macchina generate dalla tecnologia informatica e dai dispositivi indossabili, dove la 'X' rappresenta una variabile per qualsiasi tecnologia di calcolo spaziale attuale o futura.

7 Ciò garantisce un'esperienza di navigazione semplice e comprensibile, facilitando l'accesso alle informazioni e ai contenuti disponibili a diversi livelli.

8 Come video, immagini interattive e audio. Questi contenuti possono rendere l'esperienza di fruizione dell'architettura ancora più coinvolgente e forniscono approfondimenti, racconti storici e commenti esplicativi sull'architettura, arricchendo l'esperienza complessiva.

9 Il primo vero visore di realtà virtuale è stato inventato da Ivan Sutherland tra il 1965 e il 1968 presso l'Università dello Utah. Il dispositivo era composto da due tubi a raggi catodici - uno per occhio - ed elementi ottici per proiettare le immagini generate dal *computer* negli occhi dell'operatore. Gli elementi ottici permettevano agli utenti di vedere immagini 3D sovrapposte a oggetti reali, rendendolo in verità un visore di realtà aumentata. Il primo prototipo era così grosso e pesante che per usarlo i ricercatori dovevano montarlo su un braccio collegato al soffitto. Questa versione venne per questo chiamata 'la spada di Damocle'.

10 Le prime sperimentazioni relative alla realtà aumentata ebbero luogo presso le università americane. Nel 1992, Tom Caudell e David Mizell coniarono il termine 'realtà aumentata' per descrivere l'integrazione di elementi virtuali nelle scene reali. Precedentemente, i due ricercatori furono incaricati dalla Boeing di sviluppare un sistema innovativo per semplificare il cablaggio delle parti elettroniche all'interno degli aeroplani. Tale sistema, visualizzato attraverso un visore, guidava gli operai passo dopo passo, consentendo loro di lavorare in ambienti angusti senza dover costantemente consultare manuali [www.marcopucci.it].

11 Nel 1997, presso la Columbia University, Steven Feiner, Blair Macintyre e Tobias Höllerer svilupparono il primo prototipo mobile, noto come '*Touring Machine*'. Questo dispositivo consentiva la visualizzazione di informazioni relative agli edifici del *campus* e combinava un rilevatore di posizione GPS, un visore, un *display* palmare e un *computer* contenuto in uno zaino per agevolare l'esplorazione all'interno dell'università.

12 "La realtà aumentata migliora la percezione di un utente e l'interazione con il mondo reale e permette di utilizzare il *computer* come uno strumento che semplifichi la vita e renda un compito più facile per l'essere umano" [Brooks, 1996].

13 O '*transparent display*' è un *display* elettronico che consente all'utente di vedere ciò che viene mostrato sullo schermo pur essendo in grado di vedere attraverso di esso.

14 Devono essere dotati necessariamente di GPS e di bussola e devono poter permettere la visualizzazione di un flusso video in tempo reale, oltre che di un collegamento *internet* per ricevere i dati *online*. L'apparecchio inquadra in tempo reale l'ambiente circostante e al mondo reale vengono sovrapposti i livelli di contenuto, dai Punti di Interesse (POI) geolocalizzati agli elementi 3D.

15 Da inquadrare per visualizzare le informazioni associate. Il più comune è il *QR code*.

16 Gli architetti possono utilizzare la AR per presentare in modo interattivo i loro progetti, mostrando modelli virtuali agli *stakeholder* e al pubblico, evidenziando dettagli specifici e simulando l'esperienza dell'edificio finito. Questa forma di comunicazione coinvolgente aiuta a trasmettere l'intento progettuale e a favorire una comprensione più approfondita dell'architettura da parte di tutti i soggetti coinvolti.

## APPENDICE D

17 Uno dei primi esempi di realtà virtuale fu il Sensorama, ideato da Morton Heilig nel 1962. Questo dispositivo, descritto fin dal 1955, offriva un'esperienza immersiva con film in 3D, suoni, odori e sensazioni tattili. Era composto da un *display* stereoscopico a colori, ventilatori, emettitori di odori, audio stereo e una sedia mobile. Il Sensorama non ebbe successo a causa di limitazioni finanziarie e tecniche, ma resta una realizzazione fondamentale nell'evoluzione della realtà virtuale [Sorge, 2023]

18 *VPL Research* è stata un'azienda pionieristica nel campo della realtà virtuale fondata da Jaron Lanier negli anni '80. È stata responsabile dello sviluppo di dispositivi e sistemi VR innovativi, tra cui i primi visori *head-mounted* e guanti di tracciamento, contribuendo in modo significativo alla crescita e all'avanzamento della tecnologia VR.

19 L'*Oculus Rift* e l'*HTC Vive* sono entrambi visori di realtà virtuale di alta qualità, ma presentano alcune differenze significative. L'*Oculus Rift* è sviluppato da *Oculus* (di proprietà di *Facebook*) ed è apprezzato per la sua comodità e facilità d'uso, mentre l'*HTC Vive* è prodotto in collaborazione con Valve ed è noto per il suo sistema di tracciamento delle stanze (*room-scale tracking*) più avanzato, che consente ai giocatori di muoversi liberamente nello spazio fisico. Inoltre, l'*HTC Vive* offre un maggiore campo visivo, mentre l'*Oculus Rift* è noto per la sua solida integrazione con la piattaforma *Oculus Store* e per la sua vasta libreria di giochi e applicazioni.

20 Il termine livello *consumer* si riferisce all'accessibilità e alla disponibilità di un determinato prodotto o tecnologia per l'uso da parte dei consumatori comuni. Nel contesto della realtà virtuale, il livello *consumer* indica la disponibilità di visori VR e dispositivi correlati, come *Oculus Rift*, *HTC Vive* e *PlayStation VR*, che sono progettati e commercializzati per un utilizzo diffuso da parte del pubblico generale, a differenza dei dispositivi VR di fascia alta utilizzati principalmente in ambiti professionali o accademici.

21 Nei videogiochi, trasporta i giocatori in universi alternativi ricchi di azione e coinvolgimento; in ambito educativo, permette agli studenti di esplorare concetti complessi, luoghi storici e simulazioni pratiche in modo esperienziale. In medicina, supporta la simulazione di interventi, la riabilitazione e il trattamento di disturbi psicologici. Inoltre, consente di visitare edifici ancora in fase di progettazione o luoghi inaccessibili, offrendo uno spazio sicuro per apprendere, sperimentare e innovare.

22 Con iterazione si intende che oltre alla possibilità di girare la testa e vedere intorno a sé, si possa interagire liberamente con l'ambiente virtuale e con tutti gli oggetti che sono presenti nel campo visivo. Ovviamente prima è necessario che le interazioni vengano appositamente programmate.

23 Il *ghosting* è un fenomeno visivo indesiderato che si verifica nelle visualizzazioni di contenuti digitali, inclusi i visori di realtà virtuale. Si manifesta quando l'immagine visualizzata lascia una sorta di 'ombra' o 'fantasma' residuale di un oggetto precedente che si è spostato rapidamente. Questo effetto può essere causato da una varietà di fattori, come la latenza nella risposta dello schermo, la persistenza delle immagini o la velocità di *refresh* dell'immagine.

24 La qualità dei modelli e la fluidità dell'esperienza sono elementi chiave per garantire un'immersione convincente nella realtà virtuale e un'integrazione armoniosa della realtà aumentata nel contesto reale [Christodoulos, 2023].

25 Il Visore è un casco con o senza fili ed è la periferica più diffusa, altrimenti si possono utilizzare dei semplici occhiali in cui gli schermi vicini agli occhi annullano il mondo reale dalla visuale dell'utente. Il visore può inoltre contenere dei sistemi per la rilevazione dei movimenti, in modo che girando la testa da un lato si ottenga la stessa azione anche nell'ambiente virtuale.

26 I *wired gloves*, sono dei guanti che possono essere utilizzati per i movimenti, per impartire comandi, digitare su tastiere virtuali, ecc. La *cybertuta* è una tuta che avvolge il corpo, può simulare il tatto flettendo su se stessa grazie al tessuto elastico e può realizzare una scansione tridimensionale del corpo dell'utente e trasferirla nell'ambiente virtuale.

25 Tuttavia bisogna sempre considerare che alcune persone potrebbero provare un senso di disorientamento, affaticamento e mal di testa. Per ovviare questi problemi, negli anni, si sta arrivando alla progettazioni di sensori che assecondino in maniera sempre più fluida ed istantanea il movimento che si compie sia della testa che corporeo. In questo modo più la scena creata è realistica e il movimento è coerente più il fruitore viene "ingannato" e immerso e non prova disturbi.



## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Ablan, D. (1998). *LightWave 3D 5.5: Guida completa*. Apogeo.

Achille, C., Fassi, F., Mandelli, A., & Fiorillo, F. (2018). Surveying cultural heritage: Summer school for conservation activities. *Applied Geomatics*. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0225-3>.

Achilli, V., Fabris, M., Menin, A., Targa, G., De Gennaro, M., Milan, P., Trivelloni, U., Zampieri, A., Baroni, L., & Maseroli, R. (2013). Il problema della discontinuità fra fusi cartografici: Una soluzione pensata per la Regione Veneto utilizzabile anche in altre realtà. In *Atti della 17a Conferenza Nazionale ASITA*, Riva del Garda.

Adami, A., Fregonese, L., Gallo, M., Helder, J., Pepe, M., & Treccani, D. (2019). Ultra light UAV systems for the metrical documentation of cultural heritage: Applications for architecture and archaeology. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, 15-21. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-15-2019>.

Adami, A., Fregonese, L. (2020). Geomatics in the management of built heritage through BIM systems: The training of new experienced professional figures. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B5, 9-14. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B5-2020-9-2020>.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Adami, A., Fregonese, L., Rosignoli, O., Scala, B., Taffurelli, L., & Treccani, D. (2019). Geometric survey data and historical sources interpretation for HBIM process: The case of Mantua Cathedral façade. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11, 29-35. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-29-2019>.

Adami, A., Fregonese, L., Vizioli, S. H. T., Taffurelli, L., Treccani, D., Rosignoli, O., & Helder, J. (2021). HE.SU.TECH. Laboratory: Academic research combined with practice applied in the documentation, representation, and preservation of the architectural heritage. The case of the Palladio Villa Forni Cerato. *Gestão & Tecnologia de Projetos*. Sao Carlos, V16, n3, 2021. <https://doi.org/10.11606/gtp.v16i3.172008>.

Agosti, G. (2005). *Su Mantegna I*. Milano, Italia: Feltrinelli.

Alberti, E., & Tedeschi, C. (2016). Spazio virtuale e architettura dipinta a cavallo del Po. In G. Valenti (Ed.), *Prospettive architettoniche* (Vol. II, pp. 3-20). Sapienza Università Editrice.

Algarotti, F. (1756). *Saggio sopra la pittura*. Società tipografica de' classici italiani.

Algeri, G. (a cura di). (2003). *Il Palazzo Ducale di Mantova*. Mantova, Italia: Sometti.

Amadei, F. (1955). *Cronaca universale della città di Mantova* (Vol. I-II, edizione integrale a cura di E. Marani & G. Praticò). Mantova, Italia: C.I.T.E.M.

Amadei, G., & Marani, E. (a cura di). (1982). *Signorie padane dei Gonzaga*. Mantova, Italia.

Amadei, G., & Marani, E. (a cura di). (1975). *I Gonzaga a Mantova*. Milano, Italia: Cassa di Risparmio delle Provincie Lombarde.

Andreasi, E. (2021). *Marsilio Andreasi e la Camera degli Sposi*. La reggia: Società per il Palazzo Ducale di Mantova, XXI(3), 10.

Andrews, C., Southworth, M. K., Silva, J. N. A., & Silva, J. R. (2019). Extended reality in medical practice. *Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine*, 21(18).

Annibaletti, G. (2009). *Un declino irreversibile? I rapporti tra Mantova e l'Impero tra il 1627 e il 1708*. Annali di storia moderna e contemporanea, 15. ISBN 978-88-343-1880-5.

Azuma, R. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>.

Ballarin, M., Balletti, C., Buttolo, V., Balestrini, E., Gottardi, C., Guerra, F., Mander, S., Pilot, L., & Vernier, P. (2013). Survey methods for earthquake damages in the “Camera degli Sposi”. *ISPRS Archives*, XL-5/W2, 265-270. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-265-2013>.

Balsa-Barreiro, J., & Fritsch, D. (2015). Generation of 3D/4D photorealistic building models. In *4D Cultural Heritage World Project* (pp. 361-372). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27857-5\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27857-5_33).

Barba, S., et al. (2019). *Integration of active sensors for geometric analysis of the chapel of the Holy Shroud*. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W15, 149-156.

Barbarella, M. (2015). Il nuovo Sistema Geodetico Nazionale. *Bollettino della Associazione Italiana di Cartografia*, 153. <https://doi.org/10.13137/2282-472X/11146>.

Baroni, L., Cauli, F., Donatelli, D., Farolfi, G., & Maseroli, R. (2009). La rete dinamica nazionale ed il nuovo sistema di riferimento ETRF2000. *Servizio Geodetico - Istituto Geografico Militare*.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bartolomei, C. (2010). La documentazione dei Beni Culturali. *DisegnareCon*.
- Bekele, M. K., & Champion, E. (2019). Cultural learning in virtual heritage. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 91.
- Bellonci, M. (1947). *Segreti dei Gonzaga*. Verona, Italia.
- Bellonci, M. (2003). *Mantegna*. Milano, Italia: Skira.
- Bellonci, M. (2006). *Ritratto di famiglia. I Gonzaga del Mantegna*. Mantova, Italia: Tre Lune.
- Bellonci, M., & Garavaglia, N. (1966). *L'opera completa di Mantegna*. Milano, Italia: Rizzoli.
- Belotti, P., Conzi, F., Dell'Orto, C., Federici, M., Fregonese, L., Garnero, G., Guastamacchia, E., Guzzetti, F., Pinto, L., & Scaioni, M. (2021). *The project to complete the regional topographic geodatabase in Lombardy, Italy*. Proceedings of the ICA, 4, 1-8. <https://doi.org/10.5194/ica-proc-4-12-2021>.
- Beltrame, C., & Costa, E. (2018). 3D survey and modelling of shipwrecks. *Journal of Cultural Heritage*, 29, 82-88.
- Beltramini, G., & Gaiani, M. (2017). PALLADIOLibrary: A virtualization project. *SCIRES-IT*, 7(2), 73-84.
- Benzoni, G. (1995). *Federico II Gonzaga, duca di Mantova e marchese del Monferrato*. In Dizionario biografico degli italiani (Vol. 45). Roma, Italia: Istituto dell'Enciclopedia Italiana.
- Beraldin, J. A. (2004). Integration of laser scanning and close-range photogrammetry. *ISPRS Congress Proceedings, Commission VII*, 972-983.
- Bertocci, S., & Farneti, F. (Eds.). (2020). *L'architettura dipinta: storia, conservazione e rappresentazione digitale*. Firenze University Press.

Bezoari, G., Monti, C., & Selvini, A. (2002). *Topografia generale con elementi di geodesia*. Torino, Italia: UTET.

Bianchini, M. (2008). *Manuale di rilievo e documentazione digitale in archeologia*. Aracne.

Bigongiari, M., & Lumini, A. (2022). Il rilievo fotogrammetrico. In G. Minutoli (Ed.), *Rocca San Silvestro: Restauro per l'archeologia*. Firenze University Press.

Bignotti, L. (1984). *La Zecca di Mantova e Casale (Gonzaga)*. Mantova, Italia: Grigoli.

Blunt, A. (1966). *Le teorie artistiche in Italia dal Rinascimento al Manierismo*. Torino, Italia: Giulio Einaudi Editore.

Bogdanovych, A., Papaleo, L., Ancona, M., Mascardi, V., Quercini, G., Simo, S., Cohen, A., & Traverso, A. (2009). Integrating agents and virtual institutions for sharing cultural heritage on the web. In *Workshop on Intelligent Cultural Heritage*.

Bognar, F., Markus, O., Van der Auweraer, H., & Duy Son, T. (2022). Virtual reality assisted human perception: A Munich 3D model study.

Bolognesi, M., Obradovic, M., Abu-Zeid, N., Peresani, M., Furini, A., Russo, P., & Santarato, G. (2015). *Integrazione di rilievi laserscan e fotogrammetrici con metodologie geofisiche applicata ad una cavità pleistocenica con stratificazione archeologica*. Atti Accademia Rov. Agiati, ser. IX, vol. V, B, 21-30.

Bonacini, E. (2014). Google e il patrimonio culturale italiano. *SCIRESS-IT*, 4(1), 25-40.

Bonfigli, C., & Braggio, C. R. (1987). *Geometria descrittiva e prospettiva*. Hoepli.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bonnefoy, Y. (2005). *Mantegna*. In *La civiltà delle immagini. Pittori e poeti d'Italia*. Roma, Italia: Donzelli.
- Bonora Previdi, C. (2009). *Mantova e le difese imperiali (1707-1797)*. Mantova, Italia: Casa del Mantegna. ISBN 9788879430579.
- Bornaz, L. (2006). *I sistemi a scansione laser*. CISM.
- Boulenger, M. (1965). *Mazarino*. Milano, Italia: Dall'Oglio.
- Braglia, R. (2002). *I Gonzaga. Il mito, la storia*. Artiglio.
- Breymann, G. A. (2003). *Costruzioni in pietra e strutture murali* (Vol. I). Dedalo Edizioni.
- Brooks, F. (1996). What's real about virtual reality? University of North Carolina.
- Brunelli, R. (a cura di). (2011). *Un collezionista mantovano del Rinascimento. Il vescovo Ludovico Gonzaga nel V centenario della morte*. Atti del convegno di studi di Mantova (29 gennaio 2011). Mantova, Italia: Publi Paolini.
- Brusaporci, S., & Trizio, I. (2013). La Carta di Londra e il patrimonio architettonico. *SCIRES-IT*, 3(2), 55-68.
- Bucher, J. (2017). *Storytelling for Virtual Reality*. Routledge.
- Camesasca, E. (2007). *Mantegna*. In AA.VV. *Pittori del Rinascimento*. Firenze, Italia: Scala. ISBN 88-8117-099-X
- Camesasca, E., & Coletti, L. (1959). *La Camera degli Sposi del Mantegna a Mantova*. Milano, Italia: Rizzoli.
- Campi, M., di Luggo, A., Catuogno, R., Iovane, D., & Palomba, D. (2019). Discovering hidden architectures of ancient time. *ISPRS Archives*, XL-5, 121-128.

- Campi, M., di Luggo, A., Monaco, S., Siconolfi, M., & Palomba, D. (2018). Indoor and outdoor mobile mapping systems. *ISPRS Archives*, XLII-2, 201-208.
- Campi, M., di Luggo, A., Palomba, R., & Palomba, D. (2019). Digital surveys and 3D reconstructions. *ISPRS Archives*, XLII-2/W9, 205-212.
- Canciani, M., Cecili, F., Gallo, M., & Persiani, C. (2018). La Porta Tiburtina delle Mura Aureliane a Roma. In *Drawing as (in)tangible representation*, 381-388.
- Canciani, M., Conigliaro, E., Del Grasso, M., Papalini, P., & Saccone, M. (2016). 3D survey and augmented reality. *ISPRS Archives*, 931-937.
- Canobbio, A. (1593). *Origine della nobilissima e illustrissima Famiglia Canossa*. Discepolo.
- Capone, M. (2005). *Prospettiva e misura*. Edizioni Arte Tipografica.
- Capone, M. (2009). *La genesi dinamica della forma*. Fridericiana Editrice Universitaria.
- Capone, M., & Lanzara, E. (2019). Scan-to-BIM vs 3D ideal model HBIM. *ISPRS Archives*, XLII-2/W9, 219-226.
- Carlson, W. E. (2017). *Computer graphics and animation: A retrospective*. Ohio State University.
- Carpeggiani, P., & Tellini Perina, C. (1987). *Giulio Romano a Mantova*. Banca Agricola Mantovana.
- Carpiceci, M., & Colonnese, F. (2018). Il modello digitale come cerniera. In *UID 2018*, 457-464.
- Cassoli, P. (1985). CURTI, Girolamo. In *Dizionario Biografico degli Italiani* (Vol. 31).

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Castagna, M. (2002). *Stemmi e vicende di casate mantovane*. Montichari.
- Catastini, L., & Ghione, F. (2004). *Le geometrie della visione*. Springer.
- Caudell, T., & Mizell, D. (1992). Augmented reality: Heads-up display in manufacturing. *HICSS Proceedings*, 2, 659-669.
- Cecili, F., & Gallo, M. (2023). Porta Tiburtina: rilievo 3D e ricostruzione virtuale. In *Le Mura Aureliane nella storia di Roma 2*, 159-165.
- Cerati, C. (1993). *I Trionfi di Cesare di Andrea Mantegna*. Casa del Mantegna.
- Christodoulos, A. (2023). Augmented and virtual reality: Extensive review. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 10.
- Cipolla, C., & Malacarne, G. (2006). *El più soave et dolce et dilectevole et gratioso bochone*. Franco Angeli.
- Cleri, C. (1991). Via Mantegna. *Art e Dossier*, 55.
- Colonna, G. (2006). Sacred architecture and the religion of the Etruscans. In *The Religion of the Etruscans* (p. 141). University of Texas Press.
- Coniglio, G. (1967). *I Gonzaga*. Dall'Oglio.
- Cordaro, M., (a cura di). (1993). *Mantegna's Camera degli Sposi*. Electa, Milano.
- Cordaro, M., (2006). *La Camera degli Sposi di Andrea Mantegna*. Electa, Milano.
- Crescenzi, C. (1999). *Superfici a semplice e doppia curvatura*. Roma.
- Cricco, G., & Di Teodoro, F. (2004). *Itinerario nell'arte* (Vol. 2). Zanichelli.
- Curoni, G. (1872). *L'arte di fabbricare* (Vol. III). Augusto Federico Negro Editore.

- D'Acunto, G., & Zoerle, S. (2016). Analisi geometrico-proiettiva e rilievo digitale degli affreschi della Cappella Ovetari. In G. M. Valenti (Ed.), *Prospettive architettoniche* (pp. 123-141). Sapienza Università Editrice.
- Damisch, H. (1992). *L'origine della prospettiva*. Guida Editori.
- Dell'Aquila, M. (1999). *Il luogo della geometria*. Arte Tipografica.
- De Rubertis, R. (1994). *Il disegno dell'architettura*. Carocci Editore.
- De Vecchi, P., & Cerchiari, E. (1999). *I tempi dell'arte* (Vol. II). Bompiani.
- di Luggo, A., Campi, M., Repola, L., Cera, V., Scandurra, S., & Pulcrano, M. (2019). Evaluation of historical heritage documentation. *ISPRS Archives*, XLII-2/W17, 115-122.
- di Luggo, A., Palomba, D., Pulcrano, M., & Scandurra, S. (2019). Theoretical and methodological implications in the information modelling of architectural heritage. In Bolognesi C. M., Santagati C. (Eds.), *Impact of Industry 4.0 on Architecture and Cultural Heritage* (pp. 20-48). IGI Global.
- Di Paola, F. (2007). *Il Complesso monumentale dello Spasimo*. Tecno Global.
- Dina, A. (1886). Ludovico il Moro prima della sua venuta al governo. *Archivio Storico Lombardo*, 2(3), fasc. 4.
- Docci, M. (2009). *Disegno e analisi grafica*. Laterza.
- Docci, M., & Maestri, D. (2009). *Manuale di rilievo architettonico ed urbano*. Laterza.
- Docci, M., & Maestri, D. (2009). *Scienza del Disegno*. UTET.
- Docci, M., & Migliari, R. (1992). *Scienza della rappresentazione*. Carocci Editore.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Donesmondi, I. (1612). *Dell'istoria ecclesiastica di Mantova*. Parte prima e seconda.
- Dong, S., Bremer, P. T., Garland, M., Pascucci, V., & Hart, J. (2006). Spectral surface quadrangulation. *ACM Transactions on Graphics*, 25, 1057-1066.
- Donghi, D. (1925). *Manuale dell'architetto* (Vol. I). UTET.
- Dorfles, G., Buganza, S., & Stoppa, J. (2008). *Storia dell'arte* (Vol. II). Atlas.
- Drap, P., Sgrendzaroli, M., Canciani, M., Cannata, G., & Seinturier, J. (2003). Laser scanning and close-range photogrammetry. In *XIX International Symposium CIPA* (pp. 629-636).
- Drossis, G., Birliraki, C., & Stephanidis, C. (2018). Interazione con ambienti immersivi del patrimonio culturale. In *Comunicazioni in Informatica e Scienze dell'Informazione* (pp. 177-183). Springer.
- El-Hakim, S., Beraldin, J. A., Picard, M., & Godin, G. (2004). Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(3), 21-29.
- Empler, T. (2015). APP design con uso della realtà aumentata. *Disegnare Idee Immagini*, 50, 60-69.
- Empler, T. (2016). Modello conoscitivo infografico della Galleria Prospettica di Palazzo Spada. In G. M. Valenti (Ed.), *Prospettive architettoniche* (pp. 519-540). Sapienza Università Editrice.
- Empler, T., Caldarone, A., & Fusinetti, A. (2019). Leonardo da Vinci: divulgazione delle sue opere attraverso i Serious Game. In P. Belardi (Ed.), *Riflessioni* (pp. 1553-1562). Gangemi Editore.

- Fabris, M., Achilli, V., Artese, G., Boatto, G., Bragagnolo, D., Concheri, G., Meneghello, R., Menin, A., & Trecroci, A. (2009). High resolution data from laser scanning and photogrammetry. *ISPRS Archives*, XXXVIII-3/W8, 43-48.
- Falcone, M., Origlia, A., Campi, M., & De Martino, S. (2021). From architectural survey to continuous monitoring. *ISPRS Archives*, XLIII-B4-2021, 47-53.
- Fallacara, G., Ferrero, M., & Minenna, V. (2015). *Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici*. Edizioni Gioffreda.
- Fallavollita, F. (2009). Le volte composte. In R. Migliari (Ed.), *Geometria descrittiva* (Vol. 2). Città Studi Edizioni.
- Fassi, F., Achille, C., & Fregonese, L. (2011). Surveying and modelling the main spire of Milan Cathedral. *The Photogrammetric Record*, 26, 462-487.
- Fassi, F., Fregonese, L., Ackermann, S., & De Troia, V. (2013). Comparison between laser scanning and automated 3D modeling. *ISPRS Archives*, XL-5/W1, 73-80.
- Fassi, F., Mandelli, A., Teruggi, S., Rechichi, F., Fiorillo, F., & Achille, C. (2016). VR for cultural heritage. In *AVR 2016*, Part II, 139-157.
- Fast Berglund, A., Gong, L., & Li, D. (2018). Testing and validating XR technologies in manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 25, 31-38.
- Fernández-Palacios, B. J., Morabito, D., & Remondino, F. (2017). Access to complex reality-based 3D models using virtual reality solutions. *Journal of Cultural Heritage*, 23, 40-48.
- Ferruti, F. (2021). *Andrea Mantegna e le antichità di Tivoli e Villa Adriana*. L'Erma di Bretschneider.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Fiasconaro, V., & Guiducci, S. (2011). Realizzazione di un prototipo di realtà aumentata applicato ai siti archeologici. In L. Bordoni (Ed.), *AI&Cultural Heritage Workshop* (pp. 39-47).
- Fichera, C. R. (2016). Rilievo e rappresentazione del territorio. Università Mediterranea di Reggio Calabria.
- Fidas, C., & Sylaiou, S. (2021). La realtà virtuale e le sue applicazioni nei beni culturali. *Applicato Scienze*.
- Filippini, M. A. (2015). Camera degli Sposi: nuove attribuzioni per i personaggi dipinti. *Gazzetta di Mantova*.
- Fiocco, G. (1937). *Mantegna*. Hoepli.
- Fiocco, G., & Pozza, N. (1969). *L'arte di Andrea Mantegna*. Venezia.
- Fiorillo, F., Limongiello, M., & Bolognesi, C. (2021). Image-based and range-based dataset integration for an efficient 3D representation. <https://doi.org/10.3280/oa-693.130>.
- Fiorillo, F., Limongiello, M., Bolognesi, C.M. (2021). Integrazione dei dati acquisiti con sistemi image-based e range-based per una rappresentazione 3D efficiente - image-based and range-based dataset integration for an efficient 3D representation. In: Arena, A., Arena, M., Mediatì, D., Raffa, P. (eds.) *Atti del 42° Convegno internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione*, pp. 2319–2327.
- Flaisch, T., Steinhäuser, M., & Schupp, H. T. (2019). Adaptive cognitive control attenuates the late positive potential to emotional distractors. *NeuroImage*, pp. 51-58.
- Foni, A. E., Papagiannakis, G., & Magnenat-Thalmann, N. (2010). A taxonomy of visualization strategies for cultural heritage applications. *Journal on Computing and Cultural Heritage*.

- Forte, M. (2010). Cyber-Archaeology: e scienza del passato. *Archeologia e Calcolatori*, 21, 231-247.
- Forte, M., & Danelon, N. (2015). Progetto Regium@Lepidi 2200. *Archeomatica*, VI(1), 42-48
- Forte, M., Pescarin S., & Pujol L. (2006). VR applications, new devices and museums: visitors' feedback and learning. *VAST2006 Short Papers*, 64-69.
- Francalanci, E., (2022). *Dell'Arte - Edizione quinquennale*. De Agostini.
- Frassine, M., De Francesco, S., (2015). Il webGIS RAPTOR e la tutela del patrimonio archeologico di Milano. In *Milano Archeologia per EXPO 2015. Verso una valorizzazione del patrimonio archeologico di Milano. Atti del Seminario (Milano 2014)*, L'ANX, 19, pp. 137-149.
- Fregonese, L., Adami, A., (2020). The 3D model of St. Mark's Basilica in Venice. In *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33570-0\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33570-0_31).
- Fregonese, L., Barbieri, G., Biolzi, L., Bocciarelli, M., Frigeri, A., Taffurelli, L. (2013). Surveying and monitoring for vulnerability assessment of an ancient building. *Sensors*, 13(8), pp. 9747-9773. <https://doi.org/10.3390/s130809747>.
- Fregonese, L., Gallo, M., Pulcrano, M., Scandurra, S., Del Vecchio, F. (2022). Find out the printing matrix of the Neapolitan marks with inverse readings of the survey data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-2/W1-2022, pp. 223-229. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-223-2022>.
- Fregonese, L., Taffurelli, L. (2004). Il pavimento musivo della Basilica di San Marco a Venezia: ortofoto digitale 3D a grande scala a supporto dell'attività di tutela, di progetto e di cantiere. *E-Arcom 2004 - Tecnologie per comunicare l'architettura*, Ancona, Italy.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Fregonese, L., Taffurelli, L., Adami, A. (2018). BIM application for the Basilica of San Marco in Venice: Procedures and methodologies for the study of complex architectures. In *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*. MDPI, Basel, Switzerland, pp. 348-373. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-685-1-16>.

Fregonese, L., Taffurelli, L., Fassi, F. (2010). Processi di analisi della forma: superfici digitali a confronto nel processo della conservazione. *Archeomatica*, 1(1). <https://doi.org/10.48258/arc.v1i1.116>.

Freina, L., Ott, M. (2015). A literature review on immersive virtual reality in education: State of the art and perspectives. In *The International Scientific Conference eLearning and Software for Education*.

Fry, R. (1906). Mantegna as a mystic. *The Burlington Magazine*, VIII, 88-98.

Fu, Z., Xu, R., Xin, S., Chen, S., Tu, C., Yang, C., & Lu, L. (2022). EasyVRModeling: Easily create 3D models by an immersive VR system. *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 5, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101526>.

Galati, V. C. (2016). Tipologie di saloni per le udienze nel Quattrocento padano tra Ferrara e Mantova. In F. Canali (a cura di), *Per Amor di Classicismo. Ricerche di Storia dell'Architettura e dell'Arte in memoria di Francesco Quinterio (Bollettino della Società di Studi Fiorentini)*, pp. 10-36).

Gallo, M., Fregonese, L., Pulcrano, M., & Del Vecchio, F. (2023). Virtual archaeology: Reconstruction of a Hellenistic furnace at the Duomo metro construction sites in Naples. In *Representation Challenges: New Frontiers of AR and AI Research for Cultural Heritage and Innovative Design* (p. 280).

Gallo, M. (2023). Il rilievo aereo come strumento di conoscenza e conservazione dei borghi e dei villaggi abbandonati in Campania. In G. Belli & F. Mangone (a cura di), *A cento anni dalla legge Croce. Nuove prospettive sul paesaggio*. LetteraVentidue, Siracusa.

Gallo, M., & Scandurra, S. (2023). Transizione urbana da preservare: Graffiti, Murales e Street Art tra tradizione e innovazione. In *44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione*.

Gálvez, A., Iglesias, A., & Cabellos, L. (2014). Cuckoo search with Lévy flights for weighted Bayesian energy functional optimization in global-support curve data fitting. *The Scientific World Journal*, 2014, 138760, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/138760>.

Gasch, C., Sotoca, J., Chover, M., Remolar, I., & Rebollo, C. (2022). Procedural modeling of plant ecosystems maximizing vegetation cover. *Multimedia Tools and Applications*, 81, <https://doi.org/10.1007/s11042-022-12107-8>.

Gherardini, F., Santachiara, M., & Leali, F. (2019). Enhancing heritage fruition through 3D virtual models and augmented reality: An application to Roman artefacts. *Virtual Archaeology Review*, 10(21).

Gionta, S., & Mainardi, A. (1844). *Il fioretto delle cronache di Mantova*. Fratelli Negretti, Mantova.

Giordano, A. (1999). *Cupole, volte e altre superfici: La genesi e la forma*. Utet Editore.

Gomasasca, M. A. (2004). *Elementi di geomatica: con elementi di geodesia e cartografia, fotogrammetria, telerilevamento, informatica, sistemi di ripresa, sistemi di posizionamento satellitare, elaborazione digitale delle immagini, sistemi informativi territoriali, sistemi di supporto alle decisioni, SIT in rete, INSPIRE e GMES, dizionario tecnico, acronimi*. Associazione Italiana di Rilevamento (AIT), Milano.

Gombrich, E. H., & Tafuri, M. (1989). *Giulio Romano: Saggi*. Electa, Milano.

Gottardi, C., & Guerra, F. (2018). Spherical images for cultural heritage: Survey and documentation with the Nikon KM360°. In *ISPRS The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII2, 385-390.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Guidazzoli, A., & Liguori, M. C. (2011). realtà virtuale e beni culturali: Una relazione in evoluzione vista attraverso i progetti sviluppati presso il Cineca. *Storia e Futuro: Rivista di Storia e Storiografia Contemporanea Online*.

Guidi, G., Angheluddu, D. (2016). Displacement mapping as a metric tool for optimizing mesh models originated by 3D digitization. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 9, pp. 1-23. <https://doi.org/10.1145/2843947>.

Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A., Ercoli, S. (2009). A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archaeological areas. *The International Journal of Architectural Computing*, 7(1), pp. 39-55.

Guidi, G., Russo, M., Beraldin, J.A. (2010). *Acquisizione e modellazione poligonale*. Milano: McGraw-Hill.

Hassan, A.T., Fritsch, D. (2019). Integration of laser scanning and photogrammetry in 3D/4D cultural heritage preservation: A review. *International Journal of Applied Science and Technology*, 9(4), pp. 76-91.

Hellman, T., Lahti, M. (2018). Photogrammetric 3D modeling for virtual reality.

Jakob, W., Tarini, M., Panozzo, D., Sorkine-Hornung, O. (2015). Instant field-aligned meshes. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH Asia)*.

Jiang, S., Jiang, L., Han, Y., Wu, Z., Wang, N. (2019). OpenBIM: An enabling solution for information interoperability. *Applied Sciences*, 9(24). <https://doi.org/10.3390/app9245312>

Kath, D. (2017). Storytelling with virtual reality in 360-degrees: A new screen grammar. *Studies in Australasian Cinema*, 11(3), pp. 161-171.

Kersten, T., Lindstaedt, M., Maziull, L., Schreyer, K., Tschirschwitz, F., Holm, K. (2015). 3D recording, modelling and visualisation of the Fortification Kristiansten in Trondheim (Norway) by photogrammetric methods and terrestrial laser scanning in the framework of ERASMUS programmes. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W4*, pp. 255-261. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-255-2015>.

Kersten, T., Tschirschwitz, F., Deggim, S., Lindstaedt, M. (2018). Virtual reality for cultural heritage monuments: From 3D data recording to immersive visualisation. In *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*, pp. 74-83.

Kharroubi, A., Hajji, R., Billen, R., Poux, F. (2021). Classification and integration of massive 3D point clouds in a virtual reality (VR) environment. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.

Kristeller Longmans, P. (1901). *Andrea Mantegna*. London, New York: Longmans, Green and Co.

Krull, F.N. (1994). The origin of computer graphics within General Motors. *IEEE Annals of the History of Computing*, 16(3), pp. 40-41. <https://doi.org/10.1109/MAHC.1994.298419>.

Kurt, M., Bulbul, A. (2021). Procedural 3D fountain modeling. *Mugla Journal of Science and Technology*, 7. <https://doi.org/10.22531/muglajsci.908164>.

L'Occaso, S. (2009). *Palazzo Ducale*. Electa, Milano.

Landes, T., Grussenmeyer, P., Voegtle, T., Ringle, K. (2007). Combination of terrestrial recording techniques for 3D object modelling regarding topographic constraints: Example of the Castle of Haut-Andlau, Alsace, France. In *XXI International CIPA Symposium* (Vol. XXI, pp. 435-440). CIPA Editore.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Lanier, J., Biocca, F. (1992). An insider's view of the future of virtual reality. University of North Carolina, Chapel Hill. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00816.x>.

Lanzara, E., Scandurra, S., Pulcrano, M., Acquaviva, S., Gallo, M., Palomba, D., di Luggo, A. (2022). VPL for HBIM: Algorithmic generative processes for the thematic mapping of information models. In *Architectural Graphics: Volume 1 Graphics for Analysis* (pp. 453-463).

Lanzi, L. (1834). *Storia pittorica della Italia* (p. 32). Piazzini, Firenze.

Lehtola, V. V., Kaartinen, H., Nuchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., Honkavaara, E., Rosnell, T., Vaaja, M. T., Virtanen, J., Kurkela, M., El Issaoui, A., Zhu, L., Jaakkola, A., Hyyppa, J. (2017). Comparison of the selected state-of-the-art 3D indoor scanning and point cloud generation methods. *Remote Sensing*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/rs9080810>.

Lenzi, L. (2005). *Neurofisiologia e teorie della mente*. Vita e Pensiero, Milano.

Levi, C. (1948). *Trattato teorico pratico di costruzioni civili, rurali, stradali, idrauliche*. Hoepli, Milano.

Levi, C. (1950). *Corso di costruzioni*. Hoepli, Milano.

Litta, P. (1835). *Famiglie celebri d'Italia: Gonzaga di Mantova*. Giulio Ferrario, Milano. SBN IT\ICCU\LO1\1405418.

Longhi, R. (1962). Crivelli e Mantegna: due mostre interferenti e la cultura artistica nel 1961. *Paragone - Arte*, XIII(145), 7-21.

Lopez, G. (2003). *I Signori di Milano - dai Visconti agli Sforza*. Newton Compton Editori, Roma. ISBN 88-8289-951-9.

Ma, L., Favier, R., Do, L., Bondarev, E., de With, P.H.N. (2013). Plane segmentation and decimation of point clouds for 3D environment reconstruction. In *Proceedings of the 10th Annual IEEE Consumer Communications & Networking Conference*, Jan. 2013.

Machidon, O.M., Duguleana, M., Carrozzino, M. (2018). Virtual humans in cultural heritage ICT applications: A review. *Journal of Cultural Heritage*, 33, pp. 249-260.

Maestri, R., (a cura di). (2008). La successione gonzaghesca del Monferrato: Un complesso quadro di politica internazionale. In *Atti del Convegno "Alba roccaforte gonzaghesca: tra impulsi autonomistici e fedeltà al Monferrato"*. Alessandria.

Malacarne, G. (1992). *Araldica Gonzaghesca*. Modena.

Malacarne, G. (1992). *Araldica Gonzaghesca. La storia attraverso i simboli*. Modena: Il Bulino Edizioni d'Arte.

Malacarne, G. (2019). *Gonzaga. Genealogie di una dinastia*. Modena: Il Bulino. ISBN 978-88-86251-89-1.

Mandelli, E., Velo, U. (2010). *Il modello in architettura. Cultura scientifica e rappresentazione*. Firenze: Alinea Editrice s.r.l. ISBN 9788860555717.

Manetti, A. (1976). *Vita di Filippo Brunelleschi. 1480 circa*, edizione a cura di D. De Robertis e G. Tanturli, Milano.

Mann, S., Furness, T., Yuan, Y., Iorio, J., Wang, Z. (2018). All reality: Virtual, augmented, mixed (X), mediated (X,Y), and multimediated reality. *arXiv*, Aprile 2018.

Marani, E., Perina, C. (1961). *Mantova. Le arti. Volume I. Dall'inizio del secolo XV alla metà del XVI*. Mantova: Istituto Carlo D'Arco per la storia di Mantova.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Marasco, A., Balbi, B. (2019). Progettare esperienze accessibili per i visitatori del patrimonio attraverso la realtà virtuale. *EReview of Tourism Research*, 17(3).
- Margani, L. (2009). *Archi e volte in muratura*. Edizioni Lussografica.
- Marini, F. (2005). *Mantegna*. Rizzoli. Milano.
- Marini, P., & Marinelli, S. (a cura di). (2006). *Andrea Mantegna e le arti a Verona 1450-1500*. Marsilio. Venezia.
- Marotta, F., Perfetti, L., Fassi, F., Achille, C., & Vassena, G. (2022). LIDAR IMMS vs handheld multicamera system: a stresstest in a mountain trailpath. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2022, 249-256. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-249-2022>.
- Maseroli, R. (2009). *La Rete Dinamica Nazionale (RDN) e il nuovo sistema di riferimento ETRF-2000*. Istituto Geografico Militare, Firenze.
- Masserano, S., & Sdegno, A. (2016). Il Convito in casa di Levi di Paolo Veronese: Analisi geometrica e ricostruzione prospettica. In G. M. Valenti (a cura di), *Prospettive architettoniche. Conservazione digitale, divulgazione e studio* (pp. 241-264). Sapienza Università Editrice. Roma.
- Mele, G. (2020). “Di sotto in su”: Analisi geometrica di alcuni esempi di prospettive in Lombardia. In S. Bertocci & F. Farneti (a cura di), *L'architettura dipinta: storia, conservazione e rappresentazione digitale. In ricerche, architettura design territorio*.
- Merlo, A., Fantini, F., Lavoratti, G., Aliperta, A., & López Hernández, J. L. (2013). Texturing e ottimizzazione dei modelli digitali reality based: La chiesa della Compañía de Jesús. In *DISEGNARE CON*. <https://dx.doi.org/10.6092/issn.1828-5961/3868>.

Michiel, M. (1800). *Notizia d'opere di disegno*. A cura di Jacopo Morelli. Bassano.

Micoli, L., Caruso, G., & Guidi, G. (2020). Design of Digital Interaction for Complex Museum Collections. *Multimodal Technologies and Interaction*, 4(2), 31.

Migliari, R. (2001). *Frontiere del rilievo. Dalla matita alle scansioni 3D*. Gangemi Editore.

Migliari, R. (2016). Le prospettive architettoniche: Un ponte tra arte e scienza. In G. M. Valenti (a cura di), *Prospettive architettoniche. Conservazione digitale, divulgazione e studio* (pp. 1-4). Sapienza Università Editrice. Roma.

Migliari, R. (a cura di). (1999). *La costruzione dell'architettura illusoria*. Gangemi Editore. Roma.

Mongelli, M., Canciani, M., Saccone, M., Spadafora, G., Migliori, S., Puccini, M., Quintiliani, A., Gallia, A., & Masetti, C. (2020). Modelli 3D e dati GIS: Una loro integrazione per lo studio e la valorizzazione dei beni culturali. *Archeomatica*, 11(2).

Monteleone, C. (2015). Il rilievo digitale per monitorare e interrogare la realtà: Il caso dell'astrolabio catottrico di Emmanuel Maignan a Trinità dei Monti. In G. M. Valenti (a cura di), *Prospettive architettoniche: conservazione digitale, divulgazione e studio* (vol. II, pp. 339-347). Sapienza Università Editrice. Roma. ISBN 978-88-9377-013-2.

Morel, L., Moudni, O., Durand, F., Nicolas, J., Follin, J. M., Durand, S., Pottiaux, E., Van Baelen, J., & de Oliveira Jr, P. S. (2021). On the relation between GPS tropospheric gradients and the local topography. *Advances in Space Research*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.008>.

Murgia, A. (1972). *I Gonzaga*. Mondadori. Milano.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Navvab, M., Bisegna, F., & Gugliermetti, F. (2013). Vivere il passato tangibile attraverso la ricostruzione virtuale: Patrimonio culturale degli edifici e loro confini ambientali. *Archeomatica*, IV(3), 36-41.
- Negrini, F. O. (1974). L'arte dei boccalari a Mantova. In U. Bazzotti (a cura di), *Tesori d'arte nella terra dei Gonzaga* (pp. 49-51). Electa. Milano.
- Nerli, A. (sec. XV). *Breve chronicon* (Ms. 909, 79 c., membr.).
- Nicodemi, G. (1951). *Gli Sforza, duchi di Milano*. Tip. Alfieri e Lacroix. Milano. SBN IT\ICCU\CUB\0482598.
- Nifosi, G. (2021). *L'arte svelata. Vol. 2. Rinascimento Barocco Rococò*. ISBN 9788842118534.
- Nosari, G., & Canova, F. (2003). Il nome e il volto: Personaggi della Camera Picta o degli Sposi di Mantova allo specchio e alla ribalta di nuovi studi e interpretazioni. ASIN B0BYK4913Y
- Nosari, G., & Canova, F. (2019). *I Gonzaga di Mantova. Origini di una famiglia dinastica*. Reggiolo. ISBN 978-88-99339-67-8
- Okanovic, V., Ivkovic-Kihic, I., Boskovic, D., Mijatovic, B., Prazina, I., Skaljo, E., & Rizvic, S. (2022). Interaction in eXtended Reality applications for cultural heritage. *Applied Science*.
- Pagano, N., Sonnessa, A., Cotecchia, F., & Tarantino, E. (2023). Integrated use of geomatic methodologies for monitoring an instability phenomenon. In *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2023 Workshops* (pp. 217-233). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-37114-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-37114-1_15).
- Pagano, A., Palombini, A., Bozzelli, G., De Nino, M., Cerato, I., & Ricciardi, S. (2020). ArkaeVision VR Game: User experience research between real and virtual Paestum. *Virtual Reality and Its Application in Cultural Heritage*.

Pagliano, A. (2002). *Il disegno dello spazio scenico. Prospettive illusorie ed effetti luminosi nella scenografia teatrale*. Hoepli.

Pagliano, A. (2024). Optical and perspective illusion. In *Geometries of anamorphic illusions*. [https://doi.org/10.1007/978-303147246-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-303147246-6_4).

Pagliara, P. N. (1989). La Rustica. In *Giulio Romano* (pp. 418-423).

Paladini A., Dhanda A., Reina Ortiz M., Weigert A., Nofal E., Min A., Gyi M., Su S., Van Balen K., 2019. Impact of virtual reality experience on accessibility of cultural heritage. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11, pp. 929-936. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-929-2019>.

Palomba, R., & Di Gioia, G. (2017). Lettura e interpretazione dei luoghi: La modellazione come strumento di conoscenza e integrazione di saperi. In *Territori e frontiere della rappresentazione UID 2017* (pp. 993-1000). Gangemi Editore.

Palladio, A. (1570). *I quattro libri dell'architettura* (C. Pierini, a cura di, edizione con note iconografiche e storico-critiche). Verona: Cierre Grafica, 2014. ISBN 978-88-97680-42-4.

Pallotti, R. (2022). Federico III d'Asburgo in Italia tra politica e retorica. In *École Française de Rome* (pp. 157-198).

Pan, Y. (2021). VR reality of the relationship between augmented reality and virtual reality in the context of virtual reality. *Journal of Physics: Conference Series*, 2066, 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2066/1/012056>.

Panza, P. (1994). *Leon Battista Alberti: Filosofia e teoria dell'arte*. Guerini.

Paris, L. (2010). Quantità e qualità nell'utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell'architettura. In *X Congresso International Expressión Gráfica aplicada a la Edificaciòn APEGA*.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Pascariello, M. I. (2005). *Oltre il punto di vista*. Alinea.
- Pasetti, G., & Pinotti, G. (1999). La camera in luce. La Camera degli Sposi di Andrea Mantegna in Palazzo Ducale a Mantova. *giovannipasetti.it*.
- Pauli, T. (2001). *Mantegna*. Leonardo Arte. ISBN 978-88-8310-187-8
- Pepe, M., Fregonese, L., & Crocetto, N. (2019). Use of SfM-MVS approach to nadir and oblique images generated through aerial cameras to build 2.5D map and 3D models in urban areas. *Geocarto International*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1700558>
- Pescio, C. (a cura di). (2018). *Dal Gotico internazionale al Rococò*. Giunti TVP editori. Vol. II.
- Pierattini, C. (1972). La Rocca Pia di Tivoli: Vicende storiche e funzione difensiva. *Atti e Memorie della Società Tiburtina di Storia e d'Arte*, LV, 133-190.
- Pietroni, E., Forlani, M., & Rufa, C. (2015). Livia's Villa reloaded: An example of re-use and update of a preexisting virtual museum, following a novel approach in storytelling inside virtual reality environments. In *Proceedings of Digital Heritage International Congress, Vol. 2* (pp. 511-518). IEEE.
- Pipitone, A. (2011). Deviazioni dalla norma prospettica nella pittura del XV secolo: Soluzioni eterodosse nel San Sebastiano di Antonello da Messina. *Cahiers d'études italiennes*, 12, 127-144.
- Poltronieri, E. (1989). Giulio Romano e Mantova, itinerario n. 51. *Domus*, 710, 5-10.
- Pöpl, F., Teufelsbauer, H., Ullrich, A., & Pfeifer, N. (2023). Mobile laser scanning with low-cost navigation sensors: Compensating for low-grade IMU with dual-GNSS and tightly-coupled LIDAR. *The International*

*Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-1/W1-2023, 403-410. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-403-2023>.

Pozzo, A. (1693). *Prospettiva de' pittori e architetti d'Andrea Pozzo della Compagnia di Gesù* (Parte I). Roma.

Prasad, A., Natrayan, B., Menon, V. A. (2022). An immersive virtual experience of Kathakali: An experiment in virtual reality. In *International Journal of Art & Design (IJAD)*. 6(2), pp. 118–130.

Pulcrano, M., Scandurra, S., Fragalà, E., Palomba, D., & di Luggo, A. (2021). Multi-sensor data acquisition and integration processes for the study and documentation of the church of Santa Maria degli Angeli in Pizzofalcone in Naples. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-M-1, 571-578. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-571-2021>.

Puppi, L. (1988, 2 novembre). Cianfrusaglie, reperti e un talent scout. In *Il Romanzo della pittura. Masaccio e Piero* (Supplemento al n. 29 de *La Repubblica*).

Pybus, C. (2019). New tools for cultural heritage tourism: Accessible virtual reality for Milan's Basilica Sant'Ambrogio. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11, 1003-1010.

Qi Liu, Q., Xu, S., Xiao, J., & Wang, Y. (2023). Sharp feature-preserving 3D mesh reconstruction from point clouds based on primitive detection. *Remote Sensing*, 15(12), 3155. <https://doi.org/10.3390/rs15123155>.

Quattrini, R., Pierdicca, R., Frontoni, E., & Barcaglioni, R. (2016). Virtual reconstruction of lost architectures: From the TLS survey to AR visualization. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 383-390.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Quintero, M. (2019). Impact of virtual reality experience on accessibility of cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2.

Ragozzino, M. (2003). Le imprese decorative di Federico II. In G. Algeri (Ed.), *Il Palazzo Ducale di Mantova* (pp. 151-182). Sometti.

Regione Lombardia. (2007). *Specifiche tecniche per l'aggiornamento di cartografie numeriche ed il loro adeguamento al database topografico Versione 2.0 - Dicembre 2007*.

Remondino, F. (2004). From point cloud to surface: The modeling and visualization problem. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34.

Remondino, F. (2011). Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104-1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104>.

Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: A review. *The Photogrammetric Record*, 21, 269-291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>.

Remondino, F., Guarnieri, A., & Vettore, A. (2005). 3D modeling of close-range objects: Photogrammetry or laser scanning? In *Videometrics VIII, Vol. 5665* (pp. 216-225).

Remondino, F., & Rizzi, A. (2010). Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites: Techniques, problems, and examples. *Applied Geomatics*, 2(3), 85-100.

Remondino, F., Rizzi, A., Aguiaro, G., Jimenez, B., Menna, F., Nex, F., Baratti, G. (2011). Rilievi e modellazione 3D. *Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA*, Reggio di Colorno.

Repola, L., di Luggo, A., Campi, M., Cera, V., Scandurra, S., Pulcrano, M., Scotto di Carlo, N., Pisano, F. (2019). La rappresentazione quale specchio del reale: le nuove tecnologie a servizio della conoscenza per la documentazione di ambienti complessi. In P. Belardi (a cura di), *Riflessioni. L'arte del disegno/Il disegno dell'arte* (pp. 961-968). Roma: Gangemi.

Revol, J. (1961, ottobre). Gustave Moreau. *La Nouvelle Revue française*, 106.

Rheingold, H. (1995). *Virtual reality* (1st ed.). New York, NY: Simon & Schuster.

Rodella, G. (1981). Fortificazioni nel mantovano e comunità rurali nel XV secolo. *Studi Mantovani*, 37-57.

Rosa, A. (2009). *Storia europea della letteratura italiana. Vol. I - Le origini e il Rinascimento*. Torino: Einaudi. ISBN 978-88-06-16718-9

Rossetti, E. (2018). Sforza, Alessandro. In *Dizionario biografico degli italiani* (Vol. 92). Istituto dell'Enciclopedia Italiana.

Rossi, M. (2016). Architectura picta e spazio virtuale. Incubazione e assestamento della cultura prospettica lombarda. In G. M. Valenti (a cura di), *Prospettive architettoniche. Conservazione digitale, divulgazione e studio* (pp. 303-323). Roma: Sapienza Università Editrice.

Roussou, M. (2002). Virtual Heritage: from the research lab to the broad public. In F. Nicolucci (a cura di). *Virtual Archeology. Proceedings of the VAST Euroconference* (pp. 93-100). Edizioni Archeopressa. ISBN 1-8417-1454-2.

Russo, M., Guidi, G. (2011). Reality-based and reconstructive models: Digital media for cultural heritage valorization. *SCientific RESearch and Information Technology*, 1(2), 71-86.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Russo, M., Remondino, F., Guidi, G. (2011). Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico. *Archeologia e Calcolatori*, 22, 169-198.
- Salvarani, R. (2014). *I Gonzaga e i papi. Roma e le corti padane fra Umanesimo e Rinascimento (1418-1620)*. Città del Vaticano:ibreria Editrice Vaticana.
- Salzotti, F. (2013). *Carta archeologica della provincia di Siena. Finalità, metodi, strumenti* (Vol. 11). NIE.
- Santachiara, M., Gherardini, F., Leali, F. (2018). An augmented reality application for the visualization and the pattern analysis of a Roman mosaic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 364, 012094, 1-8.
- Santagati, C., Galizia, M. (2012). Architettura e/è geometria: dalla forma architettonica alla costruzione geometrica. *DisegnareCon*, 135-144.
- Santoro, C. (1999). *Gli Sforza. La casata nobiliare che resse il Ducato di Milano dal 1450 al 1535*. Lampi di Stampa. ISBN 8848800564.
- Sarzi Amadè, L. (2019). *I Gonzaga: Una dinastia tra Medioevo e Rinascimento*. Laterza. ISBN 9788858135822.
- Scandurra, S. (2020). *La modellazione informativa del patrimonio architettonico. Sperimentazioni e processi Cloud-to-HBIM*. Aracne. ISBN 8825537018.
- Scandurra, S., Pulcrano, M., Cirillo, V., Campi, M., di Luggo, A., Zerlenga, O. (2018). Integrated survey procedures for the virtual reading and fruition of historical buildings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, 1037-1044.
- Severidt, E. (2002). *Familie, Verwandtschaft und Karriere bei den Gonzaga: Struktur und Funktion von Familie und Verwandtschaft bei den Gonzaga und ihren deutschen Verwandten 1444-1519*. DRW.

Sgarbi, V. (2007). *Mantegna. Supplemento 3 a Il Corriere della sera: I grandi maestri dell'arte*. Skira, Milano.

Sgrosso, A. (1996). *La rappresentazione geometrica dell'architettura*. Torino: UTET.

Shehade, M., Stylianou-Lambert, T. (2020). realtà virtuale nei musei: esplorare le esperienze dei professionisti dei musei. *Applicato Scienze*.

Signorini, R. (1985). *Opus hoc tenue. La Camera dipinta di Andrea Mantegna. Lettura storica, iconografica, iconologica*. Parma: Artegrafica Silva.

Signorini, R. (1992). *La più bella camera del mondo. La Camera dipinta di Andrea Mantegna detta "degli Sposi"*. Mantova: Editrice MP.

Signorini, R. (2003). La "Camera dipinta" detta "degli Sposi". In *Il Palazzo Ducale di Mantova* (pp. 117-136).

Signorini, R. (2015). *Vittorino da Feltre - Baldessar Castiglione*. Mantova: Sometti.

Simon, K. (2001). *I Gonzaga. Storia e segreti*. Ariccia. ISBN 88-8289-573-4.

Sobota, B., Mattová, M. (2022). 3D computer graphics and virtual reality. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102744>.

Soletti, A. (1996). Il rilievo dall'architettura concreta al suo modello immateriale. In *Atti del Convegno di Studi, Università degli Studi di Perugia* (pp. 69-72).

Soto-Martin, O., Fuentes-Porto, A., Martin-Gutierrez, J. (2020). Ricostruzione digitale di un edificio storico e reintegrazione virtuale di dipinti murali per creare un'esperienza interattiva e immersiva in realtà virtuale. *Applicato Scienze*.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Spallone, R. (2019). Volte a lunette nell'opera di Guarini. Modelli digitali fra Architettura Civile e Modo di misurare le fabbriche. *DISEGNO*, IV, 91-102. ISSN 2533-2899.

Steinicke, F., Ropinski, T., Hinrichs, K., Mensmann, J. (2006). Urban city planning in semi-immersive virtual reality system. In *Proceedings of the First International Conference on Computer Graphics Theory and Applications GRAPP*.

Strabone. (VII secolo a.C.). *Geografia. Volume 3, Libro V, Capitolo VII*.

Stylianidis, E., Georgopoulos, A., Remondino, F. (2016). Basics of image-based modelling techniques in cultural heritage 3D recording. In E. Stylianidis, F. Remondino (Eds.), *3D recording, documentation and management of cultural heritage* (pp. 253-304).

Susani, G. (1818). *Nuovo prospetto delle pitture sculture ed architetture di Mantova*. Adamant Media Corporation.

Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. In *AFIPS '68: Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I* (pp. 757-764). <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>.

Talha, A., Fritsch, D. (2019). Integration of laser scanning and photogrammetry in 3D/4D cultural heritage preservation: A review. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 9(4), 9. <https://doi.org/10.30845/ijast.v9n4p9>.

Teppati Losè, L., Chiabrando, F., Maschio, P. (2023). Direct georeferencing approaches for close-range and UAV photogrammetry in the built heritage domain. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M2, 1557-1564. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1557-2023>.

Tietze-Conrat, E. (1955). *Andrea Mantegna*. Firenze: Sansoni.

Timothy Jung, T., Dieck, M. C. T. (2017). *Augmented reality and virtual reality: Empowering human, place and business*. Cham, Switzerland.

Todino, M. D., Di Tore, S., De Simone, G., Sibilio, M. (2018). Virtual reality head-mounted display used in online & distance education. In G. Papanikos (Ed.), *ATINER's Conference Paper Series, No: EDU20172407* (pp. 1-21). Athens: Athens Institute for Education and Research. ISBN 9789605981150, ISSN 2241-2891.

Tonelli, E., Guzzetti, F., Baragetti, E., Colombo, P. F., Caspani, P., Viskanic, P., Scaioni, M. (2016). Un percorso per l'integrazione dei Banca dati Topografici con le informazioni del Catasto dei Terreni nelle zona 'UN perimetro aperto'. In *Proc. 20a Conf. Naz. ASITA, Cagliari, Italia, 8-10/11/2016* (pp. 623-630).

Trevisani, F. (2006). Andrea Mantegna e i Gonzaga. In F. Trevisani (Ed.), *Rinascimento nel Castello di San Giorgio* (pp. xx-xx). Milano: Electa.

Tucci, F. P., Cadolini, G. (1832). *Della misura delle volte rette ed oblique. Trattato teorico-pratico*. Roma: Angelo Monti Ed.

Vaglianti, F. M. (1998). Galeazzo Maria Sforza, duca di Milano. In *Dizionario Biografico degli Italiani*, 51. Roma: Istituto dell'Enciclopedia Italiana.

Valenti, G. M. (Ed.) (2015). *Prospettive architettoniche. Conservazione digitale, divulgazione e studio*. Roma: La Sapienza Università Editrice.

Vasari, G. (1550). *Le vite de' più eccellenti architetti, pittori, etscultori italiani, da Cimabue insino a' tempi nostri*. Firenze: Lorenzo Torrentino.

Vassena Giorgio P. , Sgrenzaroli M. (2007). *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*. Editore: Starrylink, Collana: Tesi e ricerca.

Ventura, L. (2006). *Mantegna e la corte di Mantova*. Milano: Giunti Editore.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Volta, L. C. (1807). *Compendio cronologico-critico della storia di Mantova*. Tomi I-V.

Voltolini, F., Remondino, F., Pontin, M., Girardi, S., Rizzi, A., Gonzo, L. (2006). Integrazione di fotogrammetria e laser scanner per la documentazione dei beni culturali. In *10a Conferenza Nazionale ASITA*.

Wiederhold, B. K. (2018). The next level of virtual reality isn't technology—it's storytelling. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 21(11), 671.

Zuffi, S. (2004). *Il Quattrocento*. Milano: Electa.

### - TESI DI LAUREA E DI DOTTORATO

Cassini, M., & Valli, L. (2010). *Rilievi e ipotesi sui cantieri di Giulio Romano* [Tesi di laurea]. Politecnico di Milano. Tutor: Prof. Arch. L. Fregonese.

Catellani, V., & Seletti, G. (2001). *Restauro e manutenzione nel Palazzo Ducale di Mantova dal 1815 al 1937* [Tesi di laurea]. Politecnico di Milano, I Facoltà di Architettura, Laurea in Architettura, A.A. 2000/01. Tutor: Prof. Arch. A. Grimoldi.

Garone, G. (2017). *Retopology di modelli 3D: Studio applicativo per il Cultural Heritage* [Tesi di laurea magistrale]. Politecnico di Torino. Tutor: Prof. Arch. R. A. S. Antonino.

Giacalone, E. (2019). *Tecniche geomatiche a supporto di analisi geomeccaniche* [Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile]. Politecnico di Torino. Tutor: Prof.ssa Ing. I. Aicardi.

Lumini, A. (2023). *L'HBIM per la fruizione virtuale interattiva del patrimonio architettonico e dei metadati informativi: Il caso studio della Scuola di Guerra Aerea di Firenze* [Tesi di dottorato]. Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura (DIDA), Curriculum in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente, Ciclo XXXIV. Tutor: Prof. Arch. S. Bertocci.

Palomba, R. (2010). *Bernardino di Betto: L'immagine dei luoghi attraversati da Enea Silvio Piccolomini* [Tesi di dottorato, XXIII ciclo]. Università degli Studi di Napoli Federico II. Tutor: Prof.ssa Arch. M. Dell'Aquila.

Picchio, E. (2020). *Virtual reality e beni culturali: Ricostruzione di una collezione del passato fruibile da remoto* [Tesi di laurea magistrale]. Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Architettura Costruzione Città. Tutor: Prof. Arch. M. Lo Turco, Prof.ssa Arch. E. C. Giovannini.

Piron, D. (2016). *Analisi e sviluppo di tecniche di registrazione di nuvole di punti per la ricostruzione di ampie scene* [Tesi di laurea]. Politecnico di Milano. Tutor: Prof. Ing. R. Sala.

Pulcrano, M. (2021). *Processi integrati per la virtualizzazione del patrimonio costruito: Dai rilievi reality-based a modelli interattivi e informatizzati* [Tesi di dottorato, ciclo XXXII]. Università degli Studi di Napoli Federico II, Dipartimento di Architettura. Tutor: Prof.ssa Arch. A. di Luggo.

Scandurra, S. (2020). *Processi di traduzione dei dati di rilievo strumentale per la realizzazione di modelli informativi del patrimonio architettonico esistente* [Tesi di dottorato, ciclo XXXII]. Università degli Studi di Napoli Federico II, Dipartimento di Architettura (DiARC), Curriculum Tecnologie sostenibili, recupero e rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente. Tutor: Prof.ssa Arch. A. di Luggo.

Tedeschi, C. (2006). *Tra stazione totale e laser scanner. Ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura* [Tesi di dottorato]. Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura. Tutor: Prof.ssa Arch. C. Vernizzi.

Valli, L. (2015). *Palazzo Ducale di Mantova. La metamorfosi architettonica del palazzo in museo (1887-1938)* [Tesi di dottorato in Conservazione dei beni architettonici]. Politecnico di Milano. Tutor: Prof. P. Carpeggiani.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

### - CATALOGHI DI MOSTRE

Agosti, G., & Thiébaud, D. (Eds.). (2008). *Mantegna 1431-1506* (Parigi, Musée du Louvre, 26 settembre 2008 - 5 gennaio 2009). Milano: Officina Libraria.

de Nicolò Salmazo, A., & Toniolo, D. (Eds.). (2006). *Andrea Mantegna e la cappella Ovetari a Padova*. Milano: Skira.

de Nicolò Salmazo, A., Banzato, D., & Spiazzi, A. M. (Eds.). (2006). *Mantegna a Padova 1445-1460*. Milano: Skira.

Paccagnini, G. (Ed.). (1961). *Andrea Mantegna*. Venezia: Neri Pozza.

Martineau, J. (Ed.). (1992). *Andrea Mantegna*. Milano: Electa.

Signorini, R. (Ed.). (2006). *A casa di Andrea Mantegna. Cultura artistica a Mantova nel Quattrocento*. Milano: Skira.

Lucco, M. (Ed.). (2006). *Mantegna a Mantova 1460-1506*. Milano: Skira.

### - FONTI ARCHIVISTICHE, ISTITUZIONALI E NORMATIVE

Archivio Centrale dello Stato. (s.d.). *Ministero Pubblica Istruzione, Antichità e Belle Arti, ASMn, AG, b. 3178, doc. 1715.01.10*. Roma, Italia.

Archivi della Soprintendenza per i Beni Storici, Artistici ed Etnoantropologici per le province di Mantova, Brescia e Cremona (ASopMn). (s.d.). *Fondi di Mantova*. Mantova, Italia.

Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione (ICCD). (s.d.). *Homepage*. <https://www.iccd.beniculturali.it>.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. (s.d.). *Specifiche tecniche del servizio di trasformazione di coordinate*. Geoportale Nazionale. <https://www.pcn.minambiente.it/wctscient>.

Open Geospatial Consortium (OGC). (2021). *Web Map Service (WMS)*. <https://www.ogc.org/standards/wms#overview>.

Regione Lombardia. (2007). *Specifiche tecniche per l'aggiornamento di cartografie numeriche ed il loro adeguamento al database topografico Versione 2.0 - Dicembre 2007*.

## **- RIFERIMENTI WEB E SITOGRAFIA**

Ado. (2018). *Incontro, Camera degli Sposi di Andrea Mantegna*. <https://www.analisedellopera.it>.

Arpal. (2022). *Capisaldi topografici*. <https://www.docvia.regione.liguria.it>.

Bonoldi, L. (2020). *La Camera degli Sposi. Il capolavoro di Andrea Mantegna a Mantova*. <https://www.finestresullarte.info>.

Borgia, R. (2018). *Tivoli nella Camera degli Sposi*. <https://www.tibursuperbum.it>.

Capturing Reality. (s.d.). *Homepage*. <https://www.capturingreality.com>.

Cecchin, G. (2021). *Il cielo in una stanza: Giacomo Cecchin racconta la Camera degli Sposi su Mantova Segreta*. <https://www.mantovastoria.it>.

Cocchi, A. (s.d.). *Camera degli Sposi*. <https://www.geometriefluide.com>.

Corchia, L. (2021). *Andrea Mantegna: il "volto" delle nuvole*. <https://www.restaurars.altervista.org>.

Folcini, M. (2021). *La Camera degli Sposi di Andrea Mantegna*. <https://www.progettostoriadellarte.it>.

Francalanci, E. L. (2021). *Indizi la nuvola*. <https://www.blog.arte.deascuola.it>.

Landoni, D. (2022). *Palazzo Ducale di Mantova racconta il Pisanello e il suo ciclo cavalleresco a lungo scomparso*. <https://www.artslife.com>.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Malaguti, B. (s.d.). *Camera degli Sposi*. <https://www.guideturistichemantova.it>.
- Marek, M. (2002). *Pico family*. <https://www.genealogy.euweb.cz>.
- Modena, S. (2015). Motto dell'impresa di Ludovico II Gonzaga. *Rialfri*. <https://www.rialfri.eu/opere/motto-dellimpresa-di-ludovico-ii-gonzaga>
- Mondini, M. (2023). *La mitologia negli stemmi mantovani*. <https://www.casadellettore.biblioteche.mn.it>.
- Moschin, M. (2022). *L'Oculo della Camera degli Sposi a Mantova di Andrea Mantegna*. <https://www.librarte.eu>.
- Pucci, M. (2015). *Augmented reality*. [www.marcopucci.it](http://www.marcopucci.it).
- Rhino 3D. (s.d.). *Funzionalità NURBS*. <https://www.rhino3d.com/it/features/nurbs>.
- Trenfo. (s.d.). *Homepage*. <https://www.trenfo.com>.
- Ushakov, D. (2011). NURBS and CAD: 30 years together. Retrieved from [http://www.isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=14924](http://www.isicad.ru/ru/articles.php?article_num=14924).



Prima edizione digitale: novembre 2025  
ISBN:978-88-6887-384-4  
DOI: 10.6093/978-88-6887-384-4  
© 2025 FedOAPress - Federico II University Press  
<http://www.fedoapress.unina.it>



Architetto e PhD, si occupa di rappresentazione con ricerche che spaziano dall'ambito archeologico a quello architettonico, dalla scala di dettaglio a quella urbana.

La sua attività si concentra sul rilievo e sulla documentazione digitale del patrimonio, con particolare attenzione ai processi di fruizione e divulgazione dei contenuti culturali.

**Mara Gallo**



Le nuove tecnologie digitali ridefiniscono il ruolo del rilievo come strumento di conoscenza e come mezzo per la fruizione e la comunicazione del patrimonio costruito. Il rilievo diventa un processo interpretativo capace di restituire la complessità materica, spaziale e simbolica dell'opera e di raccontarla a un pubblico sempre più ampio. In questa prospettiva, la ricerca applicata alla Camera degli Sposi di Andrea Mantegna sperimenta un metodo integrato di documentazione e valorizzazione basato su modelli 3D e ambienti immersivi, non in sostituzione dell'esperienza diretta, ma come strumento di approfondimento e accesso a spazi fragili o non più visibili.

