

Dottoranda  
Arch. **MARGHERITA PULCRANO**

Tutor  
Prof. Arch. **ANTONELLA DI LUGGO**

Co-tutor  
Prof. **ÓSCAR J. COSIDO COBOS**

# **PROCESSI INTEGRATI PER LA VIRTUALIZZAZIONE DEL PATRIMONIO COSTRUITO**

Dai rilievi *reality-based* a modelli interattivi e informatizzati

*La disseminazione e divulgazione del patrimonio costruito è da sempre un tema di grande interesse per le insite opportunità di presentazione dello stesso attraverso linguaggi che ne promuovono la valorizzazione e ne estendono la conoscenza. Nuove sfide emergono nell'individuare le possibili relazioni tra la realtà reale e la sua riproposizione digitale/virtuale e, ad oggi, particolare attenzione è data all'integrazione delle diverse tipologie di fruizione XR con la modellazione informativa, al fine di ottenere un flusso operativo continuo volto alla lettura, alla conoscenza e alla comunicazione del reale secondo modalità alternative e del tutto diverse dalle tradizionali forme di rappresentazione.*

*In tale ambito si inserisce la presente ricerca che mira ad esplorare le criticità e le potenzialità di approcci 'CLOUD-to-BIM-to-VR'. Il lavoro abbraccia un ampio quadro di indagine, affronta diverse tematiche e propone una soluzione applicativa per la costruzione di modelli interattivi e informatizzati visualizzabili in ambiente VR, delineando criticamente sia gli aspetti teorico-metodologici sia quelli prettamente pratico-operativi che hanno interessato la sperimentazione.*

*Il risultato a cui si è pervenuto pone in relazione, in un unico sistema di fruizione, i dati acquisiti e/o elaborati durante le diverse fasi della ricerca. Di fatto, è stata progettata e programmata un'App per dispositivi mobile che racconta l'Hospital Simón Ruiz di Medina del Campo (Valladolid, Spagna) attraverso un percorso di conoscenza 'multidimensionale' e 'multimodale'. I contenuti, visualizzabili in visione stereoscopica mediante dispositivi di supporto di tipo cardboard, sono differenziati rispetto alla tipologia (storico, descrittivo, tecnico, etc.) e alla forma in cui sono presentati (immagini sferiche e fotografiche, nuvola di punti, modello geometrico e informativo, descrizioni testuali, etc.). Mentre hotspots dedicati ampliano la conoscenza informativa e descrittiva del sito medinense. Nella definizione del sistema VR, infine, è stato implementato l'uso di un controller per consentire la navigazione senza schemi precostituiti, rendendo l'utente 'attivo' nella fruizione delle diverse ambientazioni.*

*A mio marito Daniele,  
ai miei nipoti  
Noemi, Raffaele e Matteo,  
e a tutta la mia famiglia  
che mi ha sempre supportata e  
che con grande pazienza  
ha sopportato le mie assenze.*

**Università degli Studi di Napoli “Federico II” - Dottorato di Ricerca in Architettura**

Curricula: Tecnologie sostenibili, recupero e rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente

Ciclo XXXIII

**Coord. del Dottorato di Ricerca in Architettura**

Fabio Mangone

**Collegio dei docenti**

Antonio Acierno	Andrea Maglio
Roberta Amirante	Pasquale Miano
Alfredo Buccaro	Lilia Pagano
Massimiliano Campi	Maria Federica Palestino
Renato Capozzi	Adelina Picone
Maria Cerreta	Renata Picone
Valeria D'Ambrosio	Maria Rita Pinto
Pasquale De Toro	Carmine Piscopo
Antonella di Luggo	Sergio Pone
Riccardo Florio	Michelangelo Russo
Carlo Gasparini	Valentina Russo
Ferruccio Izzo	Sergio Russo Ermolli
Laura Lieto	Maria Rosaria Santangelo
Mario Losasso	Paola Scala

**Tutor**

Antonella di Luggo

**Co-tutor**

Óscar J. Cosido Cobos

**Ringraziamenti**

Questo lavoro di tesi è frutto di grande impegno e dedizione, e vorrei ringraziare tutti coloro che durante il cammino mi hanno sostenuto e incoraggiato.

In particolare, la prof. *Antonella di Luggo*, che in questi anni trascorsi presso il DIARC mi ha guidata alla scoperta di temi interessanti e mi ha dato la possibilità di crescere coinvolgendo in tante attività. Il prof. *Óscar J. Cosido Cobos* e il team della *SturtUp UpIntelligence* che mi ha aperto ad altre prospettive e permesso di acquisire nuove competenze utili nello sviluppo della parte finale della sperimentazione. *David Muriel Alonso*, sempre gentile e disponibile nell'accogliere le mie richieste di accesso all'Hospital Simón Ruiz e nell'indirizzarmi nelle ricerche bibliografiche e d'archivio. Il prof. *Massimiliano Campi*, tutti i ricercatori e giovani colleghi del TIR-Lab del DIARC per il confronto continuo che ha stimolato nuove riflessioni e fatto emergere punti di vista differenti.

Vorrei anche ringraziare *Simona*, *Sabrina* e *Anita*, per la loro presenza costante e incondizionata, la leggerezza e i sorrisi che hanno portato in diversi momenti del percorso. E, infine, un *grazie* va a me stessa per il coraggio, la passione, la costanza e la tenacia con cui ho affrontato tutto il percorso.

Dottoranda  
Arch. **MARGHERITA PULCRANO**

Tutor  
Prof. Arch. **ANTONELLA DI LUGGO**

Co-tutor  
Prof. **ÓSCAR J. COSIDO COBOS**

# **P**ROCESSI **I**NTEGRATI PER LA **V**IRTUALIZZAZIONE DEL **P**ATRIMONIO **C**OSTRUITO

Dai rilievi *reality-based* a modelli interattivi e informatizzati

Università degli Studi di Napoli "Federico II"  
Dottorato di Ricerca in Architettura | XXXIII ciclo  
Area tematica: Rilievo, Rappresentazione e  
Comunicazione dell'Architettura e dell'Ambiente



## INDICE

INTRODUZIONE p. 7

## PARTE PRIMA

### METODOLOGIE E STRUMENTI PER LA COSTRUZIONE DI MODELLI INTERATTIVI ED INFORMATIZZATI DEL PATRIMONIO COSTRUITO

#### CAPITOLO PRIMO

#### ACQUISIZIONI *REALITY-BASED*

<b>Metodologie, tecnologie e <i>software</i> a confronto</b>	p. 19
1.1 Acquisizioni <i>reality-based</i> e tecnologie <i>no-contact</i>	p. 20
1.1.1 Sistemi di acquisizione dati tridimensionali: tecniche <i>range-based</i> e <i>image-based</i>	p. 24
1.1.2 Processi di acquisizione <i>reality-based</i> a confronto	p. 29
1.2 Nuvole di punti a confronto	p. 33
1.2.1 Metodologie di confronto bidimensionali e tridimensionali	p. 35
1.2.2 Osservazioni inerenti ricerche analizzate sul tema del confronto del dato di rilievo	p. 39

1.3	Procedure per l'integrazione delle nuvole di punti	p. 42
1.3.1	Tecniche di sovrapposizione delle nuvole di punti	p. 44
1.3.2	Fusione dei dati di rilievo <i>reality-based</i>	p. 48

CAPITOLO SECONDO

**MODELLI INFORMATIZZATI PER LA RAPPRESENTAZIONE DIGITALE  
3D DEL PATRIMONIO COSTRUITO**

	<b>Questioni teoriche e criticità applicative nei modelli <i>Heritage</i> - BIM</b>	p. 53
2.1	Modelli informativi del patrimonio costruito: l' <i>Heritage</i> - BIM	p. 55
2.1.1	<i>Workflow</i> di processo	p. 59
2.2	Criticità applicative nella costruzione dei modelli <i>Heritage</i> - BIM	p. 63
2.2.1	Criticità di tipo geometrico	p. 64
2.2.2	Criticità di tipo topologico e semantico	p. 69
2.3	Requisiti minimi e trasparenza delle informazioni nei modelli <i>Heritage</i> - BIM	p. 73
2.3.1	Evoluzione normativa e concettuale: dai LOD ai LOIN	p. 75
2.3.2	Le molteplici estensioni dei requisiti informativi: <i>Level of X</i>	p. 79

CAPITOLO TERZO

**COMUNICAZIONE E *VISUAL DESIGN* PER IL PATRIMONIO COSTRUITO**

	<b>Tecniche per la visualizzazione <i>Extended-Reality</i> e la fruizione multimodale e interattiva</b>	p. 83
3.1	Dal <i>Reality-Virtuality Continuum</i> all' <i>Extended-Reality</i>	p. 85
3.2	Definizione e formalizzazione delle fruizioni <i>Extended-Reality</i>	p. 91
3.2.1	AR – <i>Augmented Reality</i>	p. 92
3.2.2	AV – <i>Augmented Virtuality</i>	p. 97
3.2.3	VR – <i>Virtual Reality</i>	p. 99

## PARTE SECONDA

### FORMALIZZAZIONE E SPERIMENTAZIONE APPLICATIVA DELLA RICERCA: IL CASO STUDIO DELL'HOSPITAL SIMÓN RUIZ

#### CAPITOLO QUARTO

#### L'HOSPITAL SIMÓN RUIZ IN MEDINA DEL CAMPO (VALLADOLID, SPAGNA)

**Il caso studio per la definizione applicativa del lavoro di ricerca** p. 109

- 4.1 Il complesso dell'Hospital Simón Ruiz p. 112
  - 4.1.1 La costruzione nel tempo del complesso ospedaliero p. 116
- 4.2 Prime osservazioni sulla struttura formale e funzionale del complesso p. 123
  - 4.2.1 Descrizione degli ambienti che costituiscono il complesso p. 125
  - 4.2.2 Letture preliminari della composizione dei fronti del complesso p. 128

#### CAPITOLO QUINTO

#### L'HOSPITAL SIMÓN RUIZ ATTRAVERSO I RILIEVI *REALITY-BASED*

**Procedure di integrazione dati *range-based* e *image-based* per la documentazione del sito** p. 133

- 5.1 Il rilievo tridimensionale con tecnologie *range-based* p. 134
  - 5.1.1 Elaborazione e integrazione dei dati di rilievo *range-based* p. 140
  - 5.1.2 Operazioni di *post-processing* della nuvola di punti p. 144
- 5.2 Il rilievo tridimensionale con tecnologie *image-based*: applicazioni di *videogrammetria* p. 148
  - 5.2.1 Estrazione dei *frames* e processi SfM per l'elaborazione della nuvola di punti p. 149
  - 5.2.2 Validazione del metodo attraverso procedure automatizzate di confronto dati p. 157
  - 5.2.3 Osservazioni sui risultati ottenuti dalla procedura videogrammetrica p. 162
- 5.3 Restituzione videogrammetrica delle coperture e integrazione con la nuvola di punti laser scanner p. 164

CAPITOLO SESTO

**IL MODELLO H-BIM DELL'HOSPITAL SIMÓN RUIZ**

<b>Framework di progetto e sviluppi operativi della modellazione informativa</b>	p. 169
6.1 Scomposizione del sistema attraverso lo studio della documentazione acquisita	p. 171
6.1.1 Le regole compositive dell'Hospital Simón Ruiz	p. 173
6.1.2 L'organizzazione dei dati e la strutturazione di abacature grafiche e tabelle	p. 180
6.2 Fasi operative nella costruzione del modello H-BIM	p. 188
6.2.1 Predisposizione dell' <i>ambiente di progetto</i>	p. 190
6.2.2 <i>Modellizzazione</i> degli <i>smart-objects</i> : le componenti d'insieme	p. 193
6.2.3 <i>Modellizzazione</i> degli <i>smart-objects</i> : le componenti di dettaglio	p. 196
6.2.4 <i>Modellizzazione</i> degli elementi complessi: le superfici voltate	p. 203
6.3 Verifiche di aderenza del modello geometrico	p. 211
6.3.1 L'utilizzo delle <i>fasi temporali</i> nella caratterizzazione del modello geometrico e del modello reale	p. 215

CAPITOLO SETTIMO

**APPLICAZIONI DI VIRTUAL REALITY**

<b>Progettazione e fruizione di tour virtuali per l'Hospital Simón Ruiz</b>	p. 219
7.1 Dai modelli <i>Heritage</i> - BIM al <i>Virtual Heritage</i>	p. 221
7.1.1 Potenzialità delle fruizioni <i>Heritage</i> - BIM VR	p. 224
7.1.2 Strumenti <i>software</i> per il progetto di <i>Heritage</i> - BIM VR	p. 229
7.2 Definizione e strutturazione del progetto di fruizione <i>Heritage</i> - BIM per l'Hospital Simón Ruiz	p. 232
7.2.1 Finalità e obiettivi del sistema <i>Heritage</i> - BIM VR	p. 233
7.2.2 Individuazione delle componenti di riferimento per il sistema <i>Heritage</i> - BIM VR	p. 235
7.2.3 Scelta della modalità di connessione tra <i>Revit</i> e <i>Unity 3D</i>	p. 238
7.3 Struttura dell'applicazione e definizione delle <i>scene</i> in <i>Unity 3D</i>	p. 240

7.3.1	<i>Menu iniziale</i>	p. 243
7.3.2	<i>Scena 360°</i>	p. 248
7.3.3	<i>Scena Point Cloud</i>	p. 252
7.3.4	<i>Scena Modello</i>	p. 258
7.3.5	<i>Scena H-BIM</i>	p. 264
7.3.6	Generazione del <i>file APK</i>	p. 271
<b>CONCLUSIONE</b>		p. 275
<b>APPENDICE</b>		
<b>Strumenti di visione e dispositivi di supporto per le fruizioni <i>Extended-Reality</i></b>		p. 283
<b>GLOSSARIO</b>		p. 315
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		
Bibliografia di riferimento al testo		p. 321
Bibliografia di riferimento per l'Hospital Simón Ruiz		p. 336
Altri riferimenti		p. 337
<b>INDICE E FONTI DELLE ILLUSTRAZIONI</b>		p. 341



## INTRODUZIONE

### Ambito di ricerca e struttura della tesi

L'applicazione dell'*Extended-Reality* (XR) per la comunicazione e la fruizione del patrimonio storico-architettonico è un tema di grande interesse presso la comunità scientifica di settore. Infatti, pur non mancando esempi di studi in anni meno recenti, è un campo tutt'ora molto investigato sia per le potenzialità che accompagnano il costante sviluppo di tecniche e tecnologie XR (sempre più performanti), sia per gli spunti e gli interrogativi che emergono in seguito agli attuali progressi metodologici inerenti la costruzione di modelli tridimensionali del patrimonio costruito. Le prospettive di ricerca legate a tali tematiche, nell'ambito del Rilievo e della Rappresentazione, congiuntamente al perfezionamento di metodologie consolidate, all'utilizzo di nuovi strumenti e processi automatizzati e semi-automatizzati per la conoscenza e rappresentazione del costruito, impongono dunque un nuovo modo di leggere e riproporre la realtà.

Le acquisizioni massive prodotte dai sistemi *reality-based*, indipendentemente dalla tecnologia *no-contact* utilizzata e dalle operazioni di *editing* e *post-processing* eseguite sul dato rilevato, rappresentano ormai il riferimento metrico tridimensionale indispensabile nella costruzione di un

sistema eterogeneo di informazioni che funga da supporto per lo studio e le analisi, oltre che per gli interventi inerenti il manufatto. Le nuvole di punti ottenute per mezzo di strumentazioni *range-based* e *image-based*, infatti, consentono di documentare adeguatamente le complessità morfologiche, geometriche e spaziali dell'oggetto che rappresentano. Tali modelli, sebbene siano acritici e di per sé non producano conoscenza, costituiscono comunque un archivio illimitato di informazioni da cui ricavare altrettante rappresentazioni – anche molto diverse tra loro –. È chiaro che le differenze che possono sussistere nella lettura del modello puntiforme sono legate non solo agli obiettivi prefissati, ma soprattutto alla sensibilità del rilevatore che, con la propria personalità e il proprio *know how*, di fatto, ne influenza l'interpretazione.

Accanto alla nuvola di punti, le informazioni aggiuntive e ad essa associabili (diversificate in funzione delle analisi condotte e degli specialisti che intervengono) traspongono il manufatto reale nell'ambiente virtuale attraverso il suo clone digitale, in una commistione di dati qualitativi e quantitativi che ne descrivono caratteristiche metriche, geometriche, materiche, conservative, evolutive, etc. Nell'analisi congiunta di tali dati, dunque, si va oltre la mera rappresentazione geometrica pervenendo, in tal modo, a rappresentazioni sintetiche, ma coerenti ed esplicative degli aspetti che lo connotano e dei valori – intrinseci ed estrinseci, tangibili e intangibili, materiali e immateriali – di cui è portatore.

A tal fine, molteplici sono gli strumenti messi a disposizione dalle *Information and Communications Technology* (ICT) che, implementati con le tecniche del *game engines*, del *visual design* e della *computer graphics and animation*, portano a risultati soddisfacenti se relazionati ad obiettivi di ampliamento e miglioramento della comprensione del patrimonio costruito. L'impiego delle tecnologie digitali – in particolar modo quelle proprie dell'XR –, infatti, consente di programmare l'esplorazione dei contenuti secondo diversi livelli percettivi e di approfondimento, costituendo, di fatto, un'opportunità per fruire il bene in modo più ricco e completo, ma soprattutto in linea con l'attuale progresso tecnologico, frutto dell'era dell'industria 4.0 e dell'*Internet of Things* (IoT). Non vi è

dubbio che tale utilizzo va considerato una messa a disposizione di conoscenze e dettagli non raggiungibili con le tradizionali tecniche di fruizione (guide, pannelli espositivi, etc.) e, quindi, come un mezzo che attraverso modalità alternative mette in relazione l'utente con il manufatto reale, senza però sostituirsi all'esperienza dal vivo in sito.

Nella traduzione della nuvola di punti in fruizioni XR, spesso, è necessario individuare il supporto tridimensionale idoneo affinché il progetto di comunicazione risulti adeguato e rispondente agli obiettivi prefissati. Il ricorso a modelli digitali oltre a fornire una conoscenza del manufatto nella sua spazialità, permette di superare i limiti imposti dalle tradizionali rappresentazioni bidimensionali – che pur si rendono necessarie – innestando una corrispondenza diretta tra il modello reale e quello virtuale. Nell'attuale panorama scientifico internazionale grande interesse è posto alla documentazione del patrimonio storico-architettonico mediante la costruzione di modelli *Heritage-BIM*. Sono ampiamente note le difficoltà teorico-logiche e pratico-operative legate all'applicazione di un approccio *BIM-oriented* nella rappresentazione dei manufatti esistenti, per la strutturazione di *smart-objects* non previsti dalle attuali piattaforme *software* di *BIM authoring*, ma necessari per rendere assimilabile il modello virtuale a quello reale, e per le criticità legate alla corretta rappresentazione delle irregolarità che li caratterizzano. Ma sono altrettanto evidenti le potenzialità nella conformazione di banche dati digitali, dove raccogliere e sintetizzare la mole di informazioni eterogenee che li connotano, relazionarle tra loro e visualizzarle sottoforma di elaborati 2D e 3D, schede informative e abachi tematici. Da qui, quindi, muovono le ricerche degli ultimi decenni inerenti l'*H-BIM* e incentrate sulla costruzione di un *repository* digitale del manufatto atto a snellire e coordinare le attività dei diversi specialisti che operano nel settore e, al contempo, agevolare la gestione del patrimonio costruito, sempre complessa in termini di interventi, sia per quelli da attuare nell'immediato che per quelli da programmare. Cruciali restano le modalità di fruizione del modello BIM per la ricchezza di informazioni di cui è portatore, soprattutto per utenti non esperti del sistema utilizzato.

Su tale tematica, che si lega in particolar modo all'*open* BIM e all'usabilità del modello al di fuori delle piattaforme di BIM *authoring*, alcuni studi recenti mostrano spunti interessanti nell'integrare la metodologia BIM con le tecniche di fruizione XR, al fine, appunto, di agevolare la trasmissione del modello e delle informazioni ad esso associate.

Nella progettazione del nuovo, il ricorso a sistemi di visione artificiale consente di prefigurare situazioni future per validare le scelte progettuali o individuare gli opportuni correttivi ancor prima della messa in opera vera e propria, con un'ottimizzazione del processo ideativo e costruttivo dell'opera stessa. Analogamente, per il patrimonio storico-architettonico, tale espediente consente di vagliare le diverse attività di intervento, ipotizzando le possibili ricadute, e individuare quella più idonea da attuare. Al contempo, però, si configura anche come uno *storytelling* divenendo, quindi, uno strumento a duplice valenza conoscitiva: da un lato prettamente tecnica, per gli specialisti del settore AECO (*Architecture, Engineering, Construction and Operations*), dall'altro comunicativa, per una fruizione destinata ad una più ampia gamma di utenti.

Risultano quindi evidenti le potenzialità di un simile approccio, sia che riguardi applicazioni inerenti la prefigurazione di una realtà in divenire sia che interessi una realtà costruita ma tutta da riscoprire, tanto da suscitare un rinnovato interesse per le tecniche e le tecnologie XR, intese come la parte conclusiva di un *workflow* molto più ampio per la conoscenza e la condivisione del sapere.

In questo campo di indagine si inserisce il lavoro che segue.

Gli obiettivi che muovono la ricerca sono incentrati sullo sviluppo di un *framework* inteso come processo integrato di documentazione e comunicazione del patrimonio costruito. A partire dai dati di rilievo *reality-based*, infatti, il *focus* principale vede la costruzione di modelli interattivi e informatizzati, fruibili secondo modalità alternative attraverso le tecniche XR, ma con particolare riferimento alla *Virtual Reality* (VR). Nella restituzione della nuvola di punti, si è scelto di ricorrere alla modellazione BIM per ottenere il modello tridimensionale su cui impostare la fruizione

VR, in quanto in essa è stata riconosciuta la metodologia idonea a rispondere agli obiettivi prefissati. Molteplici sono gli interrogativi che nascono sulle modalità di manipolazione dei dati e sulla gestione delle possibili connessioni tra la nuvola di punti, il modello informativo e la fruizione virtuale, poiché diverse sono le questioni che entrano in gioco affinché ogni fase del processo sia caratterizzata non solo dalla medesima qualità e quantità informativa presente nella fase precedente, ma ulteriormente implementata laddove i dati raccolti lo permettano.

La ricerca si delinea, quindi, affrontando tre tematiche principali che possono essere così riassunte: (i) l'acquisizione di dati spaziali geometrici e colorimetri attraverso rilievi *reality-based*, (ii) la strutturazione del modello informativo come *database* e punto di accesso delle informazioni, e (iii) lo sviluppo del progetto VR con la messa a sistema finale dei dati secondo letture multilivello diversificate nelle modalità di esecuzione.

Al fine di testare la metodologia ipotizzata e pervenire a soluzioni specifiche per le criticità rilevate, è stato individuato nell'Hospital Simón Ruiz di Medina del Campo (Valladolid, Spagna) il caso studio su cui replicare le fasi operative per la validazione finale del processo teorizzato. Tale scelta è legata a diverse motivazioni, tra cui emergono l'interesse per le caratteristiche compositive e architettoniche che il manufatto presenta – dipendenti da ritmi geometrici ben precisi che regolano sia le parti generali che di dettaglio del complesso –, l'uso dei materiali da costruzione – il mattone in particolare, che tramuta la struttura portante in elemento decorativo, ridisegnandola con la tessitura muraria nelle pareti dell'edificio –, e l'importanza del sito, oltre che del suo fondatore Simón Ruiz Envito.

In tale ottica, il lavoro si presenta articolato in due macro-sezioni.

La prima, di introduzione al lavoro, è incentrata sulla definizione dello stato dell'arte; presenta un *excursus* sulle più recenti ricerche nazionali e internazionali – di cui si analizzano criticamente potenzialità e criticità – inerenti metodologie e strumenti per la costruzione di modelli interattivi e informatizzati.

In linea con le tre tematiche principali individuate, dapprima ci si sofferma sulle acquisizioni *reality-based* (capitolo primo), approfondendo la trattazione sulle procedure di confronto e integrazione del dato derivante da strumentazioni *range-based* e *image-based*. L'obiettivo di questa prima fase è legato alla comprensione dei processi metodologici attuati per costruire nuvole di punti accurate dal punto di vista geometrico, metrico e della resa realistica.

A seguire, si affrontano le questioni teoriche e le criticità operative dell'applicazione della metodologia BIM al patrimonio storico-architettonico (capitolo secondo). In particolare, dopo aver individuato il *workflow* di processo – tra reperimento del *corpus* documentale, sintesi e strutturazione delle ontologie del modello –, si analizzano le direttive, normate e non, da seguire nella modellazione vera e propria dell'informazione (geometrica, metrica, descrittiva, materica, etc.) al fine di garantirne l'affidabilità e la trasparenza. In tal modo sono state definite le linee guida per l'impostazione della modellazione del caso studio.

Infine (capitolo terzo), si esaminano le diverse forme di fruizione aumentata e virtuale – *Augmented Reality* (AR), *Augmented Virtuality* (AV), *Virtual Reality* (VR) – per comprenderne non solo le tecniche di realizzazione, gli strumenti – descritti in appendice – e gli *output*, ma anche le sensazioni, positive e/o negative, che insorgono durante la fruizione di una realtà *immersiva*, *interattiva* e *multisensoriale*. Si perviene, dunque, ad una messa a sistema metodologica e tecnologica inerente l'ampio settore dell'XR.

Tutti gli aspetti suddetti, trattati in linea teorica nella prima macro-sezione, sono poi ripresi nella seconda dove si delinea il percorso di ricerca attraverso l'applicazione dell'*iter* metodologico ipotizzato al caso studio. In questa parte del lavoro di tesi, diversi approfondimenti posti a corredo del testo generale consentono di inquadrare in modo specifico alcune questioni che, sebbene appaiano a prima vista marginali nel lavoro complessivo, in realtà sono di supporto per la messa a fuoco dei temi trattati.

Operativamente, la sperimentazione prende avvio dalle ricerche bibliografiche e d'archivio, grazie alle quali sono state desunte le informazioni storico-descrittive del complesso e le relazioni con l'intorno. Un primo momento di sintesi di tali dati (capitolo quarto) è stato utile per la definizione formale dell'Hospital Simón Ruiz, per la descrizione del contesto territoriale nel quale si è sviluppato e per la comprensione delle motivazioni che hanno spinto il fondatore Simón Ruiz Envito alla sua realizzazione. Un'opera di rilevante importanza non solo per la cittadina di Medina del Campo, ma per tutto l'intorno, tanto da giustificarne le dimensioni – forse eccessive, sia per l'epoca di costruzione che per la città in cui è collocato il complesso ospedaliero –.

Alle analisi documentali sono stati associati i rilievi strumentali condotti in sito (capitolo quinto); nello specifico, l'unione dei dati ottenuti da due campagne di acquisizione *range-based* hanno permesso la definizione spaziale di una parte consistente del manufatto. A completamento della nuvola di punti, sperimentazioni in linea con la revisione critica sul confronto e l'integrazione di dati provenienti da sensoristiche differenti hanno permesso di definire il volume del complesso restituendo le coperture attraverso elaborazioni videogrammetriche – in seguito integrate alla nuvola di punti *range-based* –.

Nella costruzione del modello H-BIM (capitolo sesto), il dato di rilievo ottenuto si è rivelato fondamentale per l'individuazione delle regole e dei ritmi geometrici che guidano la composizione formale del complesso ospedaliero, oltre che per la scomposizione del sistema in tutte le sue parti costituenti. Le analisi preliminari sugli ortofotopiani estratti dalla nuvola di punti, infatti, hanno restituito criteri di semplificazione che, applicati alla costruzione del modello geometrico, hanno snellito e reso speditiva la fase di modellazione vera e propria. Alcune delle soluzioni introdotte sono state vagliate in funzione degli obiettivi prefissati, individuando tra le diverse ipotesi operative quelle più idonee per le successive fasi del lavoro di ricerca. Le abacature grafiche e tabellari redatte come sintesi delle analisi documentali, invece, sono state di supporto per l'informatizzazione del modello geometrico. Un approfondimento sull'analisi del grado di

discostamento tra il modello così realizzato e la nuvola di punti ottenuta dai rilievi *reality-based* ha permesso di validare il processo di semplificazione geometrica attuato nella costruzione del modello H-BIM e, laddove necessario, indirizzare gli opportuni correttivi al fine di ottenere un dato digitale coerente con la realtà che rappresenta.

Infine, l'ultima parte del lavoro di ricerca (capitolo settimo) riguarda la condivisione delle informazioni desunte e/o elaborate nelle precedenti fasi di rilievo e modellazione. È quindi incentrata sulla strutturazione del progetto di comunicazione, per il quale è stato scelto di approfondire, tra le diverse soluzioni XR, l'ambito delle fruizioni VR. Nello specifico, è stata progettata un'applicazione (*App*) per dispositivi *mobile* la cui esecuzione prevede l'uso di uno strumento di visualizzazione di tipo *Cardboard* che l'utente dovrà indossare, per la corretta simulazione della tridimensionalità delle *scene* rappresentate. Il sistema di fruizione, inoltre, è stato implementato con un *controller* al fine di gestire gli *input* e rendere la VR interattiva. Lo sviluppo dell'*App*, ottenuto mediante il *software* di *gaming* *Unity 3D*, prevede diversi livelli di lettura e approfondimento informativo che si riflettono nelle modalità di esecuzione delle *scene* in essa contenute, fornendo gradi di interazione diversificati in funzione delle stesse e relazionando in un unico strumento i dati eterogenei precedentemente ottenuti. Analogamente a quanto descritto per le fasi della modellazione H-BIM, anche per la VR sono state esplicitate le scelte metodologiche e operative che hanno interessato lo sviluppo vero e proprio dell'*App*.





PARTE PRIMA

**METODOLOGIE E STRUMENTI PER  
LA COSTRUZIONE DI MODELLI  
INTERATTIVI E INFORMATIZZATI  
DEL PATRIMONIO COSTRUITO**



CAPITOLO PRIMO

**ACQUISIZIONI *REALITY-BASED***  
**Metodologie, tecnologie e *software***  
**a confronto**

Le metodologie e gli strumenti connessi alle scienze geomatiche, negli ultimi decenni, sono state interessate da notevoli sviluppi, che ne hanno esteso il campo di applicazione (documentazione, monitoraggio, analisi dei dati, etc.) e favorito la nascita di nuove prospettive e spunti di ricerca, sia nell'acquisizione che nella restituzione del dato rilevato. In particolare, le strumentazioni utili alle acquisizioni metriche tridimensionali, definite *reality-based*, hanno di fatto subito una radicale trasformazione nella prassi operativa in funzione del miglioramento di molteplici parametri, rivoluzionando nello specifico i tempi – sia nelle fasi di acquisizione, sia in quelle di elaborazione – e l'accuratezza del dato finale.

Nell'ambito del patrimonio storico-architettonico il rilievo *reality-based*, ad oggi, tende verso l'individuazione di procedure che consentano di ottenere dati il più possibile completi ed esaustivi del manufatto indagato, da cui estrarre tutte le informazioni metriche, materiche e colorimetriche ritenute

necessarie alla comprensione complessiva e di dettaglio. In tale ottica, sempre maggiore interesse viene posto dalla comunità scientifica di settore all'applicazione di metodologie che vedono l'integrazione di acquisizioni multisensore e al *post-processing* dei relativi dati, nell'ottica di migliorare i risultati ottenuti e massimizzare le potenzialità delle diverse procedure. Al contempo, sono valutate le specificità proprie di ogni manufatto – dalle caratteristiche morfo-geometriche, allo stato di conservazione e all'accessibilità degli ambienti di cui si compone – e le caratteristiche – intrinseche ed estrinseche – della strumentazione adottata.

Se è vero che l'integrazione dei sistemi di acquisizione *reality-based* è consigliata – e a volte necessaria soprattutto in condizioni di forte complessità, grandi dimensioni o dettagli minuti –, è pur vero che va valutata con molta attenzione. Ogni metodologia, infatti, presenta vantaggi e svantaggi, e l'*output* restituito, ossia la nuvola di punti, possiede caratteristiche differenti (precisione, accuratezza, formato del *file*, etc.) dipendenti dalla tecnologia utilizzata – *range-based* o *image-based* – e dal processo reiterato. Risulta dunque necessario, prima di procedere, operare delle valutazioni sui possibili risultati, in termini qualitativi e quantitativi, e sulle procedure di integrazione attuabili, al fine di ottimizzare le fasi di acquisizione ed elaborazione del dato, saturare le eventuali lacune e ottenere un effettivo miglioramento della qualità metrica e fotorealistica complessiva della nuvola di punti.

## 1.1 Acquisizioni *reality-based* e tecnologie *no-contact*

Alle tradizionali tecniche di rilevamento, oggi, si affiancano nuove metodologie operative, basate su processi di *reverse engineering*<sup>1</sup> e

---

<sup>1</sup> *The process of analyzing a subject system to identify the system's components and their interrelationship and create representation of system in another form [...] often involves an existing functional system as*

acquisizioni automatizzate, che consentono di ottenere una grande quantità di dati metrici, in tempi brevi e con un elevato grado di precisione. Nata nel settore ingegneristico per l'analisi *hardware* e *software* di componenti industriali, l'ingegneria inversa trova numerosi campi di applicazione (ortopedia, *design*, aerospazio, *automotive*, modellismo, prototipazione, etc.) che ne hanno adattato metodologie e tecnologie per rispondere alle esigenze specifiche. Sebbene, infatti, gli oggetti sottoposti ad indagine presentino caratteristiche differenti da quelli industriali – per forma, dimensione e materiali –, lo sviluppo di strumenti di acquisizione tridimensionale, sempre più performanti nella restituzione di forme complesse, e di metodologie di integrazione dati hanno portato alla strutturazione di rappresentazioni multilivello e dinamiche (Cardaci e Versace, 2012). Queste non sono più legate al disegno inteso come espressione grafica del segno, ma al modello in quanto disegno digitale contenente tutte le diverse e possibili visualizzazioni dell'oggetto virtualizzato (Amoruso e Manti, 2016). I modelli digitali su cui esse si fondano, dunque, sono capaci di fornire informazioni relative a diversi aspetti, come ad esempio la consistenza morfo-metrica, il colore, lo stato di conservazione e le caratteristiche topologiche, oltre che relazionali, delle diverse parti che compongono l'oggetto indagato. Si perviene, in tal modo, ad un'approfondita conoscenza dello stesso.

Com'è noto, le attuali metodologie per la ricostruzione tridimensionale delle forme reali sfruttano le tecnologie *reality-based*<sup>2</sup>, che restituiscono un

---

*its subject* (Chikofsky e Cross II, 1990, pag. 15). Rappresenta, dunque, la sequenza di operazioni messe in atto per definire la struttura e il funzionamento di un determinato oggetto reale, affinché possa essere replicato – ripercorrendo a ritroso il processo di ideazione e creazione della forma – o modificato per attuarne dei miglioramenti. Il processo consta di diverse fasi (Buonamici et al., 2018; Nicotra, 2002), ma è indubbio che quella relativa alla digitalizzazione dell'oggetto, ovvero alla sua ricostruzione tridimensionale, sia la più importante e delicata essendo le altre (analisi, variazioni, prototipazione, etc.), di fatto, basate su essa.

<sup>2</sup> Ovvero strumenti che documentano la realtà attraverso modelli 3D, ottenuti, ad esempio, con rilievi *image-based* e *range-based* (processi di *reverse engineering*) o con operazioni di modellazione parametrica, procedurale, algoritmica, etc.

Figg. 1.1 e 1.2 (pagina seguente)  
 – Nuvola di punti *range-based* e *image-based* della Congrega di Rosario di Palazzo (Napoli).

Lavoro di ricerca dipartimentale (DIARC – Università di Napoli “Federico II”, resp. scientifico Prof. Arch. A. di Luggo) inerente la valutazione dei risultati ottenuti da processi di acquisizione *range-based* e *image-based*. Gli esiti della sperimentazione sono riportati in Pulcrano et al., 2019.



clone virtuale rappresentativo della realtà, sotto forma di nuvola di punti (figg. 1.1 e 1.2), apparentemente avulso da errori, anche nella riproduzione delle più piccole irregolarità che le caratterizzano.

Nello studio del patrimonio costruito, sono indubbi i vantaggi e le opportunità che derivano dalla manipolazione di questo tipo di dato in ambiente digitale che si configura come una replica tridimensionale sempre disponibile a future interpretazioni e analisi. Il profondo cambiamento messo in atto dalle acquisizioni *reality-based* si riflette sulla prassi operativa della conoscenza, oltre che sul dato rilevato<sup>3</sup>, rinnovando il *modus operandi* tradizionale, dove la selezione dell’informazione avveniva prima di effettuare il prelievo delle misure, rendendo ogni rilievo un *unicum* permeato dall’interpretazione del rilevatore.

<sup>3</sup> Infatti, diversamente dai rilievi effettuati con metodologie tradizionali, quelli *reality-based* forniscono un’elevata quantità di dati, spesso sovrabbondante e ripetitiva, ma avulsa da discretizzazioni aprioristiche – ad eccezione di quelle derivanti dalle impostazioni dello strumento –. Inoltre, il grado di accuratezza che può essere raggiunto con le tecnologie digitali, oltre a consentire una maggiore rispondenza con la realtà rilevata, caratterizza la nuvola di punti come strumento di supporto anche per l’analisi dei più piccoli particolari del manufatto. Nonostante ciò, se non si progetta adeguatamente la fase di campagna, i dati rilevati possono incidere sensibilmente sulla qualità finale del risultato.



*Matterport PRO2 3D camera*

L'operazione di rilievo vera e propria – intesa non come semplice trascrizione della realtà, ma come sua interpretazione critica attraverso la lettura e la codifica del dato (Docci e Maestri, 2009) – viene, quindi, traslata nelle successive fasi comportando, di fatto, una netta separazione tra acquisizione e restituzione.

La nuvola di punti, dunque, può essere considerata a pieno titolo uno strumento di conoscenza: punti ontologicamente indistinti, ma esplicitati mediante coordinate di posizione, riflettanza e codici colorimetrici, che definiscono un modello digitale fedele e misurabile dell'oggetto rappresentato.

Strutturare la nuvola di punti di un manufatto storico è, però, un processo articolato e influenzato da un gran numero di fattori. Complessità di forma e di dimensioni, ad esempio, possono limitare il posizionamento, oltre che il campo visivo, della strumentazione, riducendo la quantità dei dati acquisiti e condizionando, di conseguenza, il risultato finale. Infatti, individuare la metodologia di rilievo più idonea – tra quelle messe a disposizione nel campo delle *reality-based* – non è mai operazione immediata e scontata. Ogni rilievo è un caso a sé, che, di volta in volta, pone quesiti in riferimento alla tecnologia da utilizzare in fase di acquisizione, alla programmazione delle operazioni da mettere in atto, alla

strumentazione, *hardware* e *software*, di cui si dispone per l'elaborazione del dato, alle caratteristiche del manufatto e, infine, ai risultati attesi.

Diversi, quindi, sono gli aspetti che delineano le differenze tra le tecnologie di acquisizione *reality-based*, sia per la sfera metodologico-applicativa che per i relativi risultati ottenibili. Una prima grande classificazione fa riferimento al sensore utilizzato per catturare l'informazione. Da un lato, infatti, si hanno radiazioni luminose codificate – sistemi attivi o *range-based* –, dall'altro è la luce naturale (o artificiale) ad essere necessaria per l'acquisizione del dato metrico e colorimetrico – sistemi passivi o *image-based* –. A ciò si aggiungono le specificità dei processi di acquisizione ed elaborazione del dato, le caratteristiche della nuvola di punti, la rispondenza foto-realistica col manufatto reale, etc.

### 1.1.1 Sistemi di acquisizione dati tridimensionali: tecniche *range-based* e *image-based*

Le acquisizioni tramite i sistemi *range-based* sono ampiamente affermate nel campo della documentazione del patrimonio architettonico. Tali sistemi, come è ben noto, consentono di registrare dati metrici attraverso l'emissione di una luce strutturata, ovvero un raggio LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), che intercetta l'oggetto e viene riflessa, fornendo direttamente l'informazione associata. Il dato metrico, caratterizzato tramite coordinate spaziali  $(x, y, z)$ , viene arricchito con l'informazione del colore in RGB, di riflettanza e di andamento delle normali<sup>4</sup>. La posizione di emettitore e ricevitore – elementi fondamentali

---

<sup>4</sup> Il colore, acquisito attraverso scatti fotografici contestuali alla scansione, viene mappato sui punti in fase di processamento del dato attraverso la ri-proiezione della porzione di fotografia corrispondente.

La riflettanza fornisce una prima informazione sui materiali che compongono l'oggetto rilevato in funzione della loro capacità di assorbire parte della radiazione luminosa; è tabellata con valori numerici (da 0 a 255) e per ogni materiale ne viene indicato il valore:

nelle tecnologie *range-based* –, la distanza che intercorre tra il laser e l'oggetto da rilevare, e le dimensioni stesse di quest'ultimo, definiscono il principio di funzionamento di questi strumenti, distinti in *triangulation scanner*<sup>5</sup> e *ranging scanner*<sup>6</sup>, la portata massima di acquisizione e l'accuratezza del dato metrico<sup>7</sup>.

---

i materiali che assorbono completamente la radiazione luminosa assumono valore 0, mentre quelli che presentano riflettanza massima hanno valore 255.

Le normali, utili nelle fasi di *post-processing* del dato, mostrano qual è la superficie dell'oggetto colpita dal raggio luminoso: aspetto molto importante, soprattutto, nella ricostruzione di un modello poligonale a partire dalla nuvola di punti.

<sup>5</sup> Emettitore e ricevitore non coincidono, ma sono posti ad una certa distanza prefissata; nota la geometria del sistema, il rilievo delle coordinate dei punti viene effettuato in analogia con il metodo della triangolazione topografica attraverso processi automatizzati e specifici algoritmi. Il dato può essere acquisito da un'unica camera (sistema monocamera) o da una coppia di camere (sistema bicamera). Il laser emesso caratterizza la tipologia di proiezione e consente di distinguere tra i sistemi *single spot*, *slit scanners* e *pattern projection*. Questi ultimi in particolare, definiti anche scanner a luce strutturata, utilizzano un'immagine codificata nota al sistema (*pattern*) che consente di ricostruire le caratteristiche geometriche della superficie scansata sulla base delle deformazioni che il *pattern* subisce. Rientrano nella categoria dei triangolatori anche gli *handheld scanner*, che si differenziano dagli altri sistemi per le dimensioni molto compatte, il peso ridotto e la libertà di movimento offerta.

<sup>6</sup> Altrimenti detti scanner a misurazione diretta della distanza, rilevano dati a distanze molto più elevate dei triangolatori – distanza massima di acquisizione due metri circa –, da poche centinaia di metri fino a chilometri, data la posizione coincidente di emettitore e ricevitore. Inoltre, movimenti motorizzati e meccanizzati consentono allo strumento (definito elettro-ottico meccanico) di ruotare su sé stesso e acquisire a 360° la scena inquadrata. La radiazione luminosa, continua (sottoforma di onda sinusoidale) oppure un breve impulso luminoso, definisce la tipologia di scanner e la portata massima di acquisizione – rispettivamente *Phase Shift* e *Time Of Flight* (TOF) –. Mentre l'ampiezza del campo visivo determina la differenza tra i *camera scanner*, i *panorama scanner* e gli *scanner ibridi* o *intermedi*. Va precisato che gli attuali *panorama scanner* sono implementati di funzioni che limitano il campo di acquisizione sul piano verticale, al pari degli *scanner ibridi*. Aspetto rilevante soprattutto per il rilievo degli esterni, dove è possibile, ad esempio, escludere la porzione corrispondente al cielo, ottimizzando, di fatto, tempi di acquisizione, elaborazione e *post-processing* della nuvola di punti.

<sup>7</sup> L'accuratezza e la precisione della misura, legati all'errore che risiede in essa, sono inversamente proporzionali alla distanza che intercorre tra lo strumento e l'oggetto da rilevare. Gli *scanner* a triangolazione presentano un'elevata rispondenza tra l'oggetto reale

Nelle acquisizioni *image-based*, invece, la misura è desunta in seguito all'elaborazione di immagini fotografiche (o *frame*) con *software* dedicati. Restringendo il campo alle attuali tecniche di fotogrammetria digitale automatizzata o semi-automatizzata, il risultato del rilievo è comunque una nuvola di punti dell'oggetto fotografato. L'intero processo e il relativo risultato sono però fortemente condizionati dalla qualità<sup>8</sup> dell'immagine sottoposta ad elaborazione e dalle condizioni di illuminazione – naturale o artificiale – dell'ambiente da rilevare. Riprendendo i principi della stereofotogrammetria, a partire da almeno due fotogrammi acquisiti da punti di vista differenti<sup>9</sup>, i metodi *image-based* utilizzano la corrispondenza tra punti omologhi (o *tie points*) e le equazioni di collinearità<sup>10</sup> per ricostruire tridimensionalmente la scena inquadrata.

---

e il suo clone virtuale (stimata nell'ordine del decimo di millimetro), mentre gli scanner a misurazione diretta della distanza presentano errori millimetrici su distanze di 80-100 metri circa, mentre centimetrici su distanze maggiori. Per tale motivo, i primi vengono utilizzati per applicazioni su oggetti medio-piccoli e studi di dettaglio, mentre i secondi per le attività inerenti il patrimonio storico-architettonico e i rilievi a scala urbana.

<sup>8</sup> Come è ampiamente noto, la qualità di un'immagine fotografica digitale è dipendente da molteplici fattori (dimensione del sensore, tipologia di obiettivo, impostazioni della camera, etc.) ognuno dei quali può influire significativamente sul risultato, anche se operazioni di pre-elaborazione (bilanciamento dei colori, regolazione luminosità e contrasti, etc.) sono utili per migliorarle e agevolare il processo fotogrammetrico (Gaiani et al., 2016). Sarà l'esperienza dell'operatore a guidare la scelta della camera, le impostazioni da settare e l'applicazione di appositi filtri per l'*editing* delle immagini, al fine di ottenere fotografie adeguate agli scopi del rilievo.

<sup>9</sup> Viene replicata in tal modo la visione binoculare dell'essere umano, che per effetto della parallasse generata dai due centri di vista leggermente diversi – gli occhi appunto – consente di percepire la profondità dell'ambiente circostante.

<sup>10</sup> Principio fondamentale della fotogrammetria è la condizione di collinearità, espressa mediante un sistema di equazioni, per il quale ad ogni punto dell'oggetto reale corrisponde uno e un solo punto dell'immagine fotografica. Sono equazioni a 9 incognite che definiscono l'orientamento interno (3 incognite) ed esterno (6 incognite: 3 per le traslazioni lungo gli assi del sistema di riferimento globale e 3 per le rotazioni intorno ad essi) della camera utilizzata. Le prime incognite consentono di individuare la posizione del centro di proiezione rispetto al sistema di riferimento dell'immagine e la distanza che

Tecnologie *range-based* e *image-based* come *handheld scanner*, *phase shift*, *multi-view camera*, etc., sono oramai consolidate, sia nell'uso che per i risultati ottenibili. Nel corso dell'ultimo decennio notevoli sviluppi si sono registrati in riferimento alle tecnologie SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), le quali, associate ai sensori ottici attivi o passivi, consentono di acquisire informazioni tridimensionali in modalità dinamica (fig. 1.3). I dispositivi SLAM rientrano nella più generica classificazione di sistemi di mappatura mobile<sup>11</sup> – MMS, *Mobile Mapping System* –, rappresentandone una vera e propria evoluzione. Si tratta, infatti, di sistemi multisensore in grado di determinare la propria posizione e rilevare gli spazi che percorrono senza la necessità di appoggiarsi alla rete satellitare, consentendo, in tal modo, risultati anche per rilievi *indoor*. Attraverso l'algoritmo SLAM, infatti, il sistema costruisce una mappa dell'ambiente in cui lo strumento si muove e restituisce, contestualmente, una nuvola di punti complessiva costruita in *real time*<sup>12</sup>. Tali strumentazioni sono

---

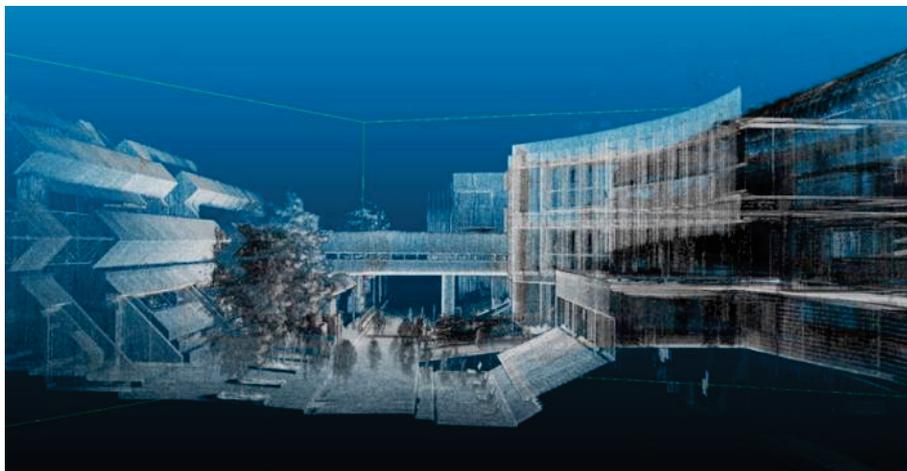
intercorre tra il piano di proiezione (o piano immagine) e il centro di proiezione stesso. Dipendono, quindi, dalla struttura della camera utilizzata, restano invariate nelle diverse acquisizioni e spesso sono rese note dalla casa produttrice attraverso i certificati di calibrazione. Le altre, invece, sono desunte indirettamente in seguito al calcolo delle coordinate dei punti dell'oggetto reale e definiscono la posizione e l'orientamento della camera in un sistema di riferimento globale.

<sup>11</sup> Sviluppati da oltre vent'anni per le acquisizioni di informazioni a vasta scala inerenti il territorio, i sistemi MMS sono costituiti da diversi sensori (sensori ottici attivi o passivi, sensori di navigazione IMU e sensori di posizionamento GNSS) che, attraverso un'unità di controllo e sincronizzazione, consentono di acquisire dati 2D e 3D geo-riferiti della scena inquadrata. All'interno della macro-categoria di MMS, i diversi strumenti vengono differenziati in base alla piattaforma *mobile* adottata e all'ambito di applicazione, *outdoor* o *indoor* (per il quale assumono l'acronimo IMMS).

<sup>12</sup> In pratica, l'algoritmo SLAM effettua una prima stima dell'ambiente in cui è collocato e degli elementi che lo compongono sulla base dei dati di posizione iniziale e delle informazioni acquisite dal sensore associato, *range-based* o *image-based*. Cambiando la posizione dello strumento, l'algoritmo, attraverso processi iterativi, è in grado di ricostruire la scena con le nuove informazioni di posizione. Maggiori saranno le iterazioni effettuate, migliore sarà la qualità del risultato in termini di accuratezza e precisione. Quindi, a differenza dei *-ranging scanner* statici o delle acquisizioni fotogrammetriche

Fig. 1.3 – Nuvola di punti ottenuta da rilievi *outdoor* eseguiti con strumentazione TIMMS (*Trimble Indoor Mobile Mapping System*).

Fonte: Campi et al., 2018



collocate su veicoli o movimentati da operatori, per acquisizioni terrestri, mentre per le acquisizioni aeree vengono integrate generalmente ai droni. Dal punto di vista dei risultati, sebbene sia garantita una precisione e un'accuratezza elevata, il movimento continuo della strumentazione può comportare differenze metriche tra la nuvola di punti e l'oggetto reale, dovute ad accumuli di errore e incertezze nella misurazione, ma che si possono limitare con opportune accortezze durante le acquisizioni<sup>13</sup>. Ciononostante, la velocità nei tempi di acquisizione – fino a dieci volte inferiori rispetto alle tradizionali tecnologie – rapportata alla quantità e qualità dei dati, consentono alle tecnologie SLAM di essere considerate una valida scelta nell'ampia gamma di strumentazioni *reality-based*.

---

tradizionali, la nuvola di punti costruita attraverso le tecnologie SLAM non necessita di processi di allineamento.

<sup>13</sup> Per ovviare o limitare tali imprecisioni, è opportuno procedere con la chiusura del ciclo, ovvero ritornare al punto iniziale del percorso, così da consentire all'algoritmo SLAM di migliorare l'unione dei dati acquisiti. In alcuni casi, se la strumentazione lo consente, è possibile costruire una rete topografica di appoggio su punti strategici per migliorare l'unione dei punti durante il percorso.

È indubbio, però, che la scelta della tecnologia da utilizzare è da valutare in funzione degli obiettivi che si intende perseguire e dell'accuratezza richiesta<sup>14</sup>, oltre che delle caratteristiche morfo-geometriche del manufatto, della sua posizione e del tempo a disposizione (Paris, 2010).

### **1.1.2 Processi di acquisizione *reality-based* a confronto**

Com'è ben noto, le metodologie di rilievo *reality-based* sono caratterizzate da processi operativi che, per quanto simili – progettazione del rilievo, acquisizione dei dati, registrazione della nuvola di punti, filtraggio, etc. –, sono diversificati in base alla tecnologia utilizzata, alle procedure di elaborazione del dato e ai risultati a cui si perviene. I molteplici fattori che influiscono sulla qualità della nuvola di punti e che entrano in gioco durante il rilievo, possono essere raggruppati in due macro-categorie coincidenti, di fatto, con la fase di acquisizione del dato e con la nuvola di punti stessa.

Nella prima rientrano criticità legate (i) alla pianificazione dei punti di stazionamento dello strumento e dei riferimenti artificiali utili al concatenamento delle varie riprese, (ii) al modo con cui viene effettuato il rilievo e (iii) alle condizioni di illuminazione della scena.

Per quanto riguarda l'acquisizione (i, ii), nello specifico, la ripresa vera e propria è considerata la fase più critica e delicata. Le tecnologie *reality-based* rilevano solo quello che viene visualizzato dal sensore, per cui è necessario valutare con attenzione la posizione della strumentazione in riferimento alla morfologia del manufatto e alle caratteristiche ambientali in cui esso è collocato, per evitare di ottenere una nuvola di punti caratterizzata dalla presenza di zone prive di informazione. Complessità di forma e di

---

<sup>14</sup> Le attività di rilievo del patrimonio storico-architettonico non sempre sono legate ad ottenere la massima accuratezza del dato metrico; spesso, infatti, viene richiesto che i risultati siano coerenti con gli obiettivi di conoscenza. Ciò inevitabilmente influenza le scelte pratiche, metodologiche e strumentali.

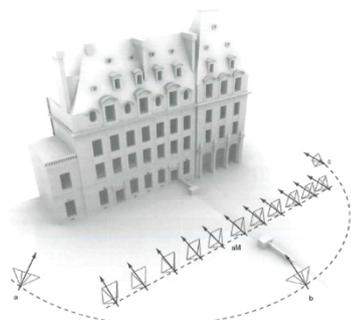


Fig. 1.4 – Esempificazione del processo di acquisizione del dataset fotografico per il rilievo *image-based* del fronte di un edificio: integrazione di riprese ad assi paralleli e convergenti.

Fonte: De Luca, 2011

dimensioni, o interferenze varie possono, infatti, limitare il posizionamento, oltre che il campo visivo, della strumentazione, riducendo la quantità di dati acquisiti e condizionando, di conseguenza, il risultato finale. A tal fine, è necessario pianificare accuratamente la fase di campagna in funzione, quindi, dell'oggetto da rilevare, oltre che della strumentazione che si intende utilizzare.

Nello specifico, con le strumentazioni *image-based*, alcuni espedienti nell'eseguire gli scatti fotografici sono ormai divenute regole consolidate, definendo le modalità di ripresa ad assi convergenti e ad assi paralleli (De Luca, 2011). Entrambe sono legate alla diversa posizione e orientamento della camera, e vengono integrate al fine di ottenere, da un lato la corretta lettura delle profondità, dall'altro un'elevata resa cromatica dell'oggetto rilevato (fig. 1.4). Inoltre, un'adeguata sovrapposizione dei diversi fotogrammi – tra il 60% e l'80%, sia nelle strisciate orizzontali che verticali – consente l'individuazione dei *tie points* e l'esatta ricollocazione delle immagini nello spazio digitale in relazione allo scatto nel reale<sup>15</sup>. Con le tecnologie *range-based*, invece, l'utilizzo di *target*<sup>16</sup> (fig. 1.5) riduce

<sup>15</sup> Se nella fotogrammetria terrestre, l'esperienza del rilevatore è fondamentale nel controllare la sovrapposizione dei diversi *frames*, nella fotogrammetria aerea, e in particolare in quella che viene eseguita tramite SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto), la pianificazione del volo del velivolo, attraverso applicazioni dedicate e dispositivi *mobile*, consente di definire il percorso da seguire e le modalità di acquisizione. In tal modo è possibile procedere con riprese automatizzate che rispettino la sovrapposizione necessaria. Inoltre, la presenza di ricevitore GPS, permette di registrare in ogni singolo *frame* anche il relativo dato di posizione, così da agevolarne l'allineamento in fase di elaborazione.

<sup>16</sup> Elementi noti al sistema che agevolano l'unione delle diverse riprese perché riconosciuti automaticamente, dai *software* di elaborazione *range-based*, come punti di riferimento. Sebbene siano codificati in forma, dimensione, colore e materiale, in base alla strumentazione utilizzata, in alcuni casi, quando le necessità operative lo richiedono, possono essere personalizzati ad *hoc* (Repola et al., 2019). Affinché assolvano correttamente alla funzione prevista, è necessario che ne vengano riconosciuti almeno tre da riprese consecutive, per consentire la corretta roto-traslazione di una *range map* rispetto all'altra. Esistono, però, degli scanner statici che effettuano un pre-allineamento delle

nettamente tale percentuale – in funzione dello scanner utilizzato, è sufficiente una sovrapposizione tra il 20% ed il 40% tra le diverse *range maps* –.

Alcuni strumenti<sup>17</sup> permettono di vedere, contestualmente all’acquisizione del dato, una *preview* della nuvola di punti attraverso specifici dispositivi di supporto o *consolle* collegate al sistema, aspetto molto importante per la verifica in sito di eventuali vuoti e per la possibilità di ricalibrare il percorso di acquisizione.

Altro fattore da valutare accuratamente è la luce (iii) dell’ambiente in cui si effettua il rilievo, poiché può influire significativamente sulla nuvola di punti. Nei rilievi *image-based* non si può prescindere da essa; particolare attenzione, infatti, va prestata alle condizioni di illuminazione per limitare la presenza di rumore o porzioni non elaborate (dovute, ad esempio, ad eccessive ombre nei *frames*), e di informazioni non coerenti con la realtà riproposta (legate all’elaborazione di immagini sovraesposte o sottoesposte). Nei rilievi *range-based*, invece, sebbene le strumentazioni restituiscano comunque il dato metrico e di riflettanza anche in assenza totale di luce, è bene valutare il riverbero e le riflessioni che potrebbero verificarsi nella nuvola di punti a causa di oggetti caratterizzati da materiali eccessivamente traslucidi e/o riflettenti (fig. 1.6). È indubbio che, sia per i rilievi *image-based* sia per quelli *range-based*, la possibilità di controllare le condizioni di illuminazione è determinante per l’ottenimento di risultati migliori e per la restituzione *texture* omogenee.

Gli aspetti che invece riguardano strettamente la nuvola di punti, sono legati (i) alla tipologia di dato acquisito dalle strumentazioni, (ii) ai processi di elaborazione ed *editing*, (iii) alle caratteristiche che presenta e (iv) alla struttura vera e propria della stessa.

---

diverse stazioni, ma il risultato non sempre è soddisfacente, comportando, difatti, la necessità di riallineare le nuvole di punti.

<sup>17</sup> Tra questi, ad esempio, vi sono la *Matterport Pro2 3D*, il *Trimble DPI-8 Handheld 3D10* o lo scanner *Artec 3D Eva11*.



Fig. 1.5 – Esempio di *target*, appositamente realizzato, per supportare processi di elaborazione fotogrammetrica e di integrazione dati multisensore.

Fonte: Repola et al., 2019



Fig. 1.6 – Le caratteristiche materiche del colonnato in marmo hanno generato molto rumore nella nuvola di punti con la duplicazione di porzioni della stessa all'interno delle strutture murarie e al di sotto del piano di calpestio.

Ricerca dipartimentale (DIARC – Università di Napoli “Federico II”, resp. scientifico Prof. Arch. A. di Luggo), inerente acquisizioni dati multisensore, della Chiesa di S. Maria degli Angeli a Pizzofalcone (Napoli). Gli esiti della sperimentazione sono in corso di pubblicazione.

Per quanto concerne il primo (i), i sistemi *range-based* acquisiscono le informazioni direttamente in quanto nuvola di punti, costruita sulla base di un sistema di riferimento locale, il cui centro è individuato proprio nella posizione dello strumento. L'elaborazione del dato (ii), basata su processi automatizzati e semi-automatizzati di individuazione e verifica dei *target* apposti nella scena, consentono di ricollocare le *range maps* secondo un unico sistema di riferimento relativo. La nuvola di punti, attraverso la sensoristica generalmente presente nel laser, sarà restituita in dimensioni reali e correttamente orientata; inoltre, sarà anche georeferenziata nel sistema di riferimento globale se lo strumento è dotato di rilevatore GPS. Infine, operazioni di ri-proiezione delle immagini fotografiche, scattate contestualmente all'acquisizione del dato metrico, caratterizzano i punti con le informazioni di colore.

I sistemi *image-based*, invece, necessitano di elaborazioni del *dataset* fotografico<sup>18</sup>, in *software* SfM (*Structure for Motion*)<sup>19</sup>, per allineare i diversi *frames* e restituire sia la nuvola di punti che il modello *texturizzato*.

Ulteriore differenza risiede nelle caratteristiche del dato (iii), che in questo tipo di acquisizioni risulta correttamente proporzionato ma in dimensioni

<sup>18</sup> Si compongono di diverse fasi (eseguite con procedure automatizzate, semi-automatizzate o manuali): calibrazione della camera utilizzata, con determinazione dei parametri di errore e correzione dipendenti dalle caratteristiche della camera e dalle impostazioni di scatto; orientamento della camera e individuazione dei *tie points* che costituiscono una prima nuvola di punti definita rada; infittimento e costruzione della nuvola densa; trasformazione della nuvola di punti in un modello *mesh*; *texturizzazione* del modello *mesh*, per ottenere un risultato caratterizzato dall'elevata resa foto-realistica. Fasi intermedie posso prevedere filtri della nuvola per ridurre il rumore o eliminare porzioni non significative.

<sup>19</sup> L'acronimo SfM, con cui si identificano i *software* di fotogrammetria digitale, viene dall'algoritmo utilizzato nelle procedure automatizzate di calibrazione e orientamento della camera, e di individuazione dei *tie points* costituenti la nuvola rada (*sparse point cloud*). All'SfM viene associato l'algoritmo MVS (*Multi-View Stereo*) della *computer vision*, grazie al quale, noto l'orientamento delle diverse camere, viene ricostruita la scena attraverso il processo di *dense matching* che restituisce la nuvola densa (*dense point cloud*). Tra i *software* in commercio e più utilizzati nell'ambito delle sperimentazioni SfM troviamo *PhotoModler*, *Pix4D mapper*, *3D Zephyr Pro*, *Agisoft Metashape*, *VisualSfM* e *RealityCapture*.

e orientamento casuali. Con il prelievo di misure di riferimento – di punti e oggetti facilmente riconoscibili – è possibile effettuare la messa in scala del modello; per l'orientamento, invece, è necessario associare al rilievo fotogrammetrico una battuta topografica di punti noti, individuati, ad esempio, mediante *marker*<sup>20</sup> apposti nella scena o su discontinuità evidenti del manufatto.

Infine, è la struttura stessa della nuvola di punti (iv) a differire nelle acquisizioni *range-based* e *image-based*. Nel primo caso, infatti, i punti sono distribuiti secondo una maglia regolare ma casuale, il cui passo è definito dai settaggi di risoluzione impostati in fase di acquisizione. La conformazione concentrica che assume la maglia, dipendente dal movimento rotatorio dello strumento sul piano orizzontale e verticale, determina la formazione di una sfera di punti che si diradano man mano che ci si allontana dal centro. Nei rilievi *image-based*, invece, la distribuzione è del tutto irregolare e dipendente dal modo con cui l'algoritmo elabora il *dataset* fotografico.

## 1.2 Nuvole di punti a confronto

Diverse sono le motivazioni che spingono studiosi e ricercatori del settore a sottoporre i risultati ottenuti dai rilievi strumentali a procedure di confronto per valutarne le differenze.

Come spesso accade, non sempre le condizioni in cui versa il manufatto e i vincoli imposti dal contesto in cui è collocato consentono di operare

---

<sup>20</sup> Analogamente ai *target* utilizzati nel rilievo *range-based*, anche in quello *image-based* è possibile apporre nella scena dei punti di riferimento noti riconosciuti automaticamente dai software SfM. Sebbene rappresentino un valido supporto nelle fasi di processamento del *dataset* fotografico, a differenza dei *target*, si può prescindere dall'utilizzo dei *marker* se strettamente legato alla creazione della nuvola di punti – per la quale sono sufficienti irregolarità geometriche e colorimetriche nell'oggetto rilevato –.

prediligendo metodologie e tecnologie univoche. Al contempo, non esistono, ad oggi, strumentazioni da utilizzare indistintamente per ogni situazione che si palesi. Inoltre, va considerato il continuo sviluppo tecnologico<sup>21</sup> che propone costantemente nuove tecnologie e strumenti *software*, descritti in alcuni casi come più performanti, in altri economicamente più vantaggiosi (tecnologie *low-cost*).

Per cui, diviene necessario, valutare e validare i risultati ottenuti dai rilievi *reality-based*, al fine di verificare la fattibilità dell'integrazione dei dati per costruire nuvole di punti coerenti nelle diverse porzioni e, al contempo, con le peculiarità del manufatto in oggetto.

Le ricerche condotte in merito mettono in evidenza potenzialità e criticità delle strumentazioni, dei processamenti analizzati e dei risultati, sulla base di parametri qualitativi e quantitativi<sup>22</sup>. Viene esaminata in particolare la rispondenza visiva, la coerenza morfo-geometrica, l'accuratezza metrica e il grado di infittimento del dato, oltre che il processo di elaborazione e la strumentazione con cui viene effettuato il rilievo (Chen et al., 2018; Masiero et al., 2017; Teppati Losè et al., 2018). È chiaro che molteplici sono i fattori che potrebbero influire non solo nella costruzione della nuvola di punti, ma anche sull'analisi stessa. Fattori che, come è ben noto,

---

<sup>21</sup> Le innovazioni introdotte dai continui e repentini cambiamenti, rendono indirettamente la tematica in oggetto sempre molto attuale – come mostrato anche dagli studi presi come riferimento per l'esplicitazione dei contenuti e delle riflessioni presenti nel paragrafo – proprio perché le nuove soluzioni proposte, sia strumentali che *software*, pongono quesiti in merito all'affidabilità del dato risultante nel documentare il patrimonio storico-architettonico.

<sup>22</sup> Precisione geometrica, acquisizione dei dettagli, foto-realismo, livello di automazione del processo – sia in acquisizione che in elaborazione –, costi, portabilità, flessibilità dell'applicazione, dimensioni del modello, etc., sono tutte caratteristiche che vengono individuate come parametri utili nei processi di confronto del dato di rilievo (El-Hakim et al., 2004; Landes et al., 2007; Voltolini et al., 2006). Non esiste, però, un unico sistema di rilievo in grado di assicurare la rispondenza massima a tutti i requisiti; per cui, volta per volta, si dovrà stabilire quale strumentazione si presta meglio a rispondere al processo di integrazione che si vuole mettere in atto (Cfr. par. 1.3) e, più in generale, agli obiettivi che si vogliono perseguire con il rilievo.

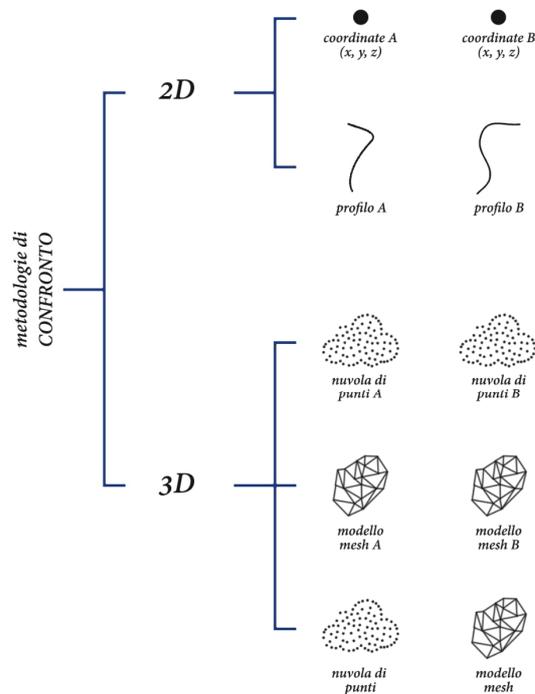


Fig. 1.7 – Schematizzazione delle metodologie di confronto applicate dalle ricerche analizzate per la valutazione e validazione dei risultati di rilievo.

Elaborazione M. Pulcrano

posso dipendere sia dalle caratteristiche dell'oggetto di studio (materiali, conformazione, stato di conservazione, irregolarità della superficie, occultazione visiva, etc.), sia dalle caratteristiche intrinseche della strumentazione (sensori, modalità di acquisizione, tipo di lente, etc.), che dai settaggi (risoluzione, campo di acquisizione, qualità del processo, etc.) impostati dal rilevatore nelle fasi di acquisizione ed elaborazione del dato.

### 1.2.1 Metodologie di confronto bidimensionali e tridimensionali

Le metodologie di confronto possono essere distinte in due macro-categorie diversificate sulla base dell'oggetto sottoposto a valutazione, ovvero se si tratta di elementi che si sviluppano su superfici piane da estrapolare dalla nuvola di punti per analisi puntuali e di dettaglio –



Fig. 1.8 – Punti di controllo noti – *marker* apposti sulla parete – acquisiti con diverse strumentazioni *range-based* per l'applicazione del metodo di confronto *point to point*.

Fonte: Tucker, 2002

confronti bi-dimensionali (2D) – o nello spazio – confronti tri-dimensionali (3D) – per analisi che interessano il modello 3D in generale (fig. 1.7).

Nella categoria bi-dimensionale, quindi, rientrano i confronti effettuati mediante punti (*point to point*) e profili.

Nello specifico, nel primo caso (Fabris et al., 2009; Tucker, 2002; Oniga et al., 2018) si individuano punti naturali o artificiali – *marker* e *target* apposti nella scena reale – come elementi di controllo noti<sup>23</sup> (fig. 1.8). Le coordinate dei punti sono generalmente collimate tramite stazione totale e rilievo topografico tradizionale. Durante le operazioni di confronto, viene individuato nello spazio digitale il punto corrispondente (CP, *Check Point*) e si verifica il discostamento nei valori delle coordinate acquisite dalla strumentazione o restituite dal processo di elaborazione. L'utilizzo dei punti di controllo, nelle fasi di *post-processing* e di integrazione di dati derivanti da acquisizioni diverse, agevola la registrazione della nuvola di punti complessiva in un unico sistema di riferimento. Inoltre, dall'analisi della letteratura emerge che, soprattutto in riferimento ai rilievi *image-based* restituiti attraverso la fotogrammetria digitale, il loro utilizzo in fase di elaborazione del processo SfM, oltre ad orientare e dimensionare correttamente il modello<sup>24</sup>, produce risultati metricamente più accurati. Il confronto *point to point*, però, implica la corretta individuazione dei CPs al fine di non invalidare la verifica del discostamento: procedura che pone comunque delle difficoltà se relacionada alla quantità di punti che caratterizza il modello digitale.

<sup>23</sup> Se apposti al suolo e utilizzati nei rilievi *image-based* aerei vengono definiti *Ground Control Points* (GCPs).

<sup>24</sup> Sono necessari almeno tre punti di controllo, ma maggiore è il numero – distribuiti in modo omogeneo nella scena – migliore sarà il risultato ottenuto; se, invece, gli obiettivi sono legati al solo ridimensionamento del modello, in assenza di punti georeferenziati, è possibile operare attraverso CPs e distanze note.

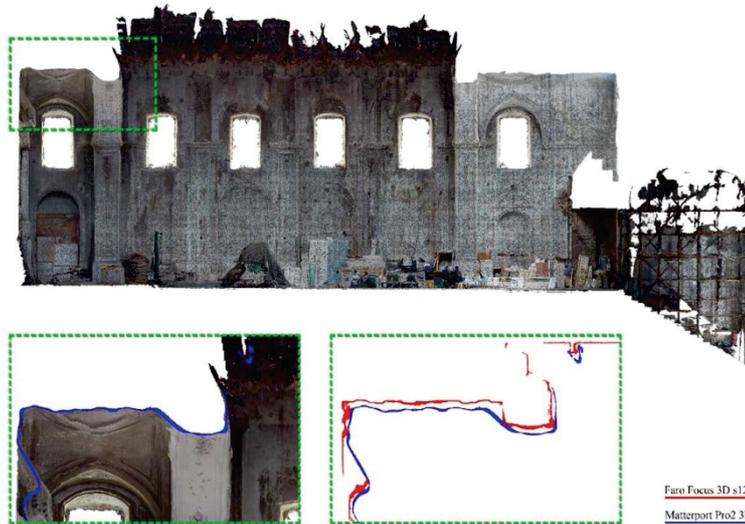


Fig. 1.9 – Confronto tra profili di nuvole di punti acquisite da tecnologie *range-based* e *image based*.

Fonte: Pulcrano et al., 2019

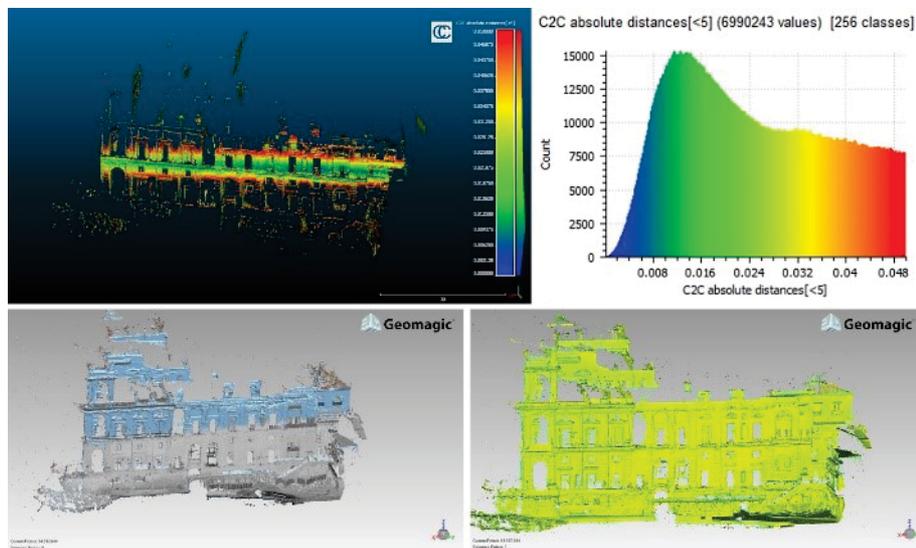
Nel secondo caso (Landes et al., 2007, Holdener et al., 2017; Pulcrano et al., 2019) è necessario estrapolare dalla nuvola di punti profili di sezioni orizzontali e verticali (fig. 1.9), attraverso procedure manuali o automatizzate. Scelto il punto d'interesse, attraverso piani di supporto, vengono generati degli ortofotopiani da sottoporre a rilucidatura in ambiente CAD, con il ridisegno manuale della porzione interessata. Diversamente, con *software* specifici per l'estrazione automatizzata dei bordi<sup>25</sup> (*CloudCompare*, *3DF Zephyr*, *Reconstructor*, *3DReshaper*, etc.), è possibile ottenere polilinee vettoriali giacenti sul piano di intersezione con la nuvola di punti. I profili da confrontare vengono, in seguito, allineati e si valutano le differenze dimensionali. Le operazioni di verifica possono interessare sia le dimensioni totali (ampiezza di un ambiente, sviluppo del fronte, etc.) sia elementi di dettaglio come porte e finestre.

---

<sup>25</sup> Sebbene ad una prima analisi l'estrazione dei bordi appare una valida procedura nella manipolazione e restituzione della nuvola di punti, va precisato che pone quesiti in merito all'operazione messa in atto che, di fatto, risulta acritica e non cosciente, in quanto rende sottoforma di polilinea qualsiasi cosa venga intercettata dal piano senza alcuna distinzione.

Fig. 1.10 – Confronto tridimensionale *cloud to cloud* di nuvole di punti *range-based* ottenute da strumentazioni differenti.

Fonte: di Luggo et al., 2019(a)



La categoria tri-dimensionale<sup>26</sup>, invece, raggruppa le analisi delle divergenze che vengono eseguite sui modelli digitali con confronti *cloud to cloud*, *cloud to mesh* e *mesh to mesh* (di Luggo et al., 2019(a); Di Salvo et al., 2011; Fabris et al., 2009; Gottardi e Guerra, 2018; Grussenmeyer et al., 2008; Oniga et al., 2018) (figg. 1.10 e 1.11). I discostamenti sono valutati con procedure automatizzate, basate su algoritmi di confronto, che analizzano i modelli nella loro interezza ed esprimono i risultati di un'analisi complessiva e globale (distanza minima, distanza massima, distanza media e deviazione *standard*) sia in termini di valori numerici che grafico-visivi. È necessario per eseguire i confronti, che i modelli siano registrati nel medesimo sistema di riferimento. Spesso si verifica che i dati da confrontare, provenendo da acquisizioni con varie strumentazioni e/o

<sup>26</sup> Nel trattare i confronti tri-dimensionali, vengono volutamente tralasciati quelli effettuati tra le nuvole di punti e i modelli tridimensionali costruiti con i *software* di modellazione (di Luggo et al., 2018), non perché ritenuti superflui o meno importanti, ma perché in questa fase si analizzano i soli prodotti derivanti dalle acquisizioni strumentali. Viene comunque sottolineato che, tali confronti, seguono procedure del tutto analoghe a quelle eseguite per i confronti *cloud to cloud*, *cloud to mesh*, e *mesh to mesh*.

elaborazioni, presentino una registrazione differente che impedisce, di fatto, il confronto. Di conseguenza, è necessario procedere preliminarmente con operazioni di allineamento – eseguite secondo le procedure descritte nel paragrafo 1.3.1 –, che divengono, quindi, propedeutiche al confronto vero e proprio.

Esistono diversi applicativi che consentono di effettuare le procedure di confronto tridimensionali (*Geomagic Qualify*, *3D Zephyr*, *PolyWorks*, *3D Reshaper*, *MeshLab*, etc.), ma spesso si ricorre all’uso del software open *CloudCompare*<sup>27</sup>. Generalizzando, il processo viene eseguito a partire dalla definizione del modello di riferimento e l’analisi viene effettuata calcolando la distanza che intercorre tra punti (*cloud to cloud*), tra superfici triangolari delle *mesh* (*mesh to mesh*), o tra punti e triangoli (*cloud to mesh*).

### 1.2.2 Osservazioni inerenti ricerche analizzate sul tema del confronto del dato di rilievo

Le ricerche analizzate, mostrano evidenti differenze nei risultati derivanti dall’applicazione delle diverse metodologie di acquisizione, che si possono sintetizzare con alcuni concetti chiave:

- l’accuratezza (morfo-geometrica, metrica e visiva) della nuvola di punti,
- la gestione del dato,
- i tempi di acquisizione ed elaborazione,
- la gestione vera e propria della strumentazione.

In sintesi, l’elevata resa foto-realistica dei rilievi *image-based* consente analisi dettagliate della composizione materica degli elementi (per definirne, ad esempio, lo stato di conservazione o la tessitura muraria) perché è immediata la comprensione visiva e il riconoscimento degli elementi, essendo di fatto la metodologia basata sul processamento di immagini

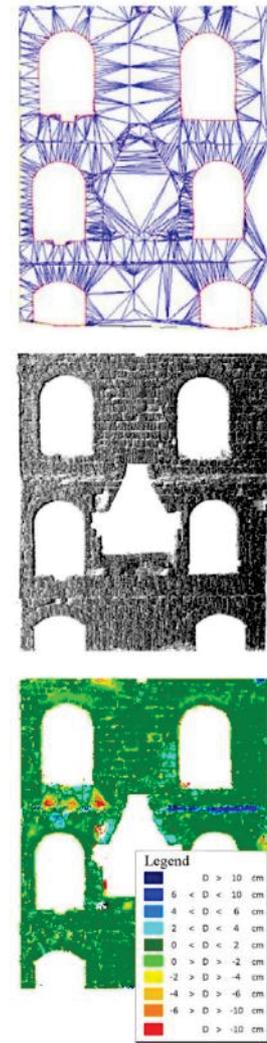


Fig. 1.11 – Esempio di confronto *cloud to mesh* di una porzione muraria: modello poligonale, nuvola di punti e calcolo della divergenza.

Fonte: Grussenmeyer et al., 2008

<sup>27</sup> <http://www.cloudcompare.org/>

fotografiche. Questo aspetto, congiunto alle modalità di elaborazione del dato, spesso destinate alla costruzione di mesh *texturizzate*, rendono le tecniche *image-based* maggiormente idonee a progetti di comunicazione del patrimonio storico-architettonico, laddove il modello su cui si basano è ottenuto tramite acquisizioni 3D e non derivato da esse.

Dal punto di vista metrico, invece, è più volte ribadito che l'accuratezza che deriva dai rilievi *range-based* – in alcuni casi nettamente superiore a quella mostrata dalla nuvola di punti fotogrammetrica – è necessaria a garantire una maggiore precisione al rilievo. Va segnalato, però, che in punti particolari il dato acquisito da tali strumentazioni presenta aree non chiaramente definite, nonostante i settaggi impostati alla massima risoluzione. Ciò deriva dalle caratteristiche di funzionamento dello strumento stesso; infatti, a differenza di altre tecnologie *range-based* che consentono di collimare punti specifici (stazione totale, tacheometro, teodolite, etc.) perché basati su rilievi punto per punto, il modello tridimensionale prodotto, ad esempio, dai laser scanner è una discretizzazione acritica delle superfici, dipendente dal movimento rotatorio dello strumento, sul piano orizzontale e verticale, e dal passo di acquisizione impostato. Per cui, è facile intuire che non sempre vengono intercettati i punti che definiscono i margini o gli spigoli di una parete. Ciononostante, l'informazione può essere resa completa nel *post-processing* attraverso operazioni di interpolazione lineare che ricostruiscono le porzioni mancanti a partire dai punti attigui che giacciono sul medesimo piano.

Alla gestione del modello 3D, in termini di peso e visualizzazione, viene data particolare attenzione. Sebbene le acquisizioni *range-based* siano ampiamente riconosciute come metodi ad alta efficienza metrica – tanto da esser utilizzate come elemento di riferimento noto per i confronti sia 2D che 3D –, la registrazione di dati superflui e ridondanti comporta

ulteriori processi di pulizia e diradamento<sup>28</sup> della nuvola di punti al fine di consentirne una più agevole gestione, a volte a discapito della qualità e della definizione complessiva delle superfici rappresentate e dei dettagli che le caratterizzano. Nella nuvola *image-based*, invece, è possibile controllare la densità del modello durante l'elaborazione dello stesso. Diversamente dai sensori *range-based*, infatti, con l'impostazione di settaggi per ogni fase del processamento è possibile diversificarne i risultati: aspetto rilevante soprattutto nella definizione delle modalità con cui processare le diverse porzioni del manufatto, definendo, ad esempio, una qualità molto alta per gli elementi di dettaglio (cornicioni modanati, capitelli, decorazioni, etc.) così da leggerne correttamente le forme.

A ciò si collega la tematica dei tempi, di acquisizione ed elaborazione, necessari per ottenere una nuvola di punti. Generalmente risultano inversamente proporzionali tra loro, ovvero, a tempi lunghi di acquisizione delle strumentazioni *range-based*, si contrappongono tempi piuttosto brevi di elaborazione del dato. Viceversa, per i rilievi *image-based*, è il processamento del *dataset* fotografico ad impiegare un tempo maggiore. Va però considerato che la durata del rilievo è fortemente dipendente anche dall'*hardware* destinato alla gestione del progetto, oltre che – come già accennato – dalle impostazioni dei settaggi di acquisizione ed elaborazione.

Nella definizione delle tempistiche, inoltre, un'aliquota è legata all'automazione del processo – che, ad oggi, caratterizza prevalentemente il processamento fotogrammetrico –, orientato a produrre soluzioni che limitano le attività dell'operatore in favore di una riduzione dei tempi.

Infine, aspetti legati alla trasportabilità, alla più agevole manovrabilità e reperibilità dello strumento, influiscono nella scelta della metodologia e

---

<sup>28</sup> Se da un lato si può limitare la quantità di dati acquisiti agendo sulle impostazioni di risoluzione dello strumento, dall'altro con settaggi che la riducano in modo drastico, si incorre nella possibile perdita di definizione negli elementi di dettaglio. Inoltre, la sovrabbondanza di dati sarà un aspetto comunque presente data la sovrapposizione delle diverse *range maps* necessarie all'acquisizione completa del manufatto.

della specifica tecnologia da adottare nelle diverse situazioni che si palesano.

### 1.3 Procedure per l'integrazione delle nuvole di punti

L'integrazione delle metodologie di rilievo *reality-based* e degli strumenti di cui si compongono non è un processo innovativo, ma necessita ancora di applicazioni e sperimentazioni per essere perfezionato, al fine di limitare gli errori nella nuvola di punti risultante, date le differenze che sussistono come visto nei precedenti paragrafi (Cfr. par. 1.1.2 e 1.2.2).

La combinazione di dati acquisiti con sensori e risoluzioni diverse può influire notevolmente sull'accuratezza del modello tridimensionale finale. Va, infatti, considerato, ad esempio, che la densità della nuvola di punti prodotta dai sistemi *range-based*, generalmente, è superiore a quella dei sistemi *image-based*, con la conseguenza che, nell'unione dei due dati, si avranno zone più o meno fitte distribuite in modo arbitrario e casuale se non correttamente progettata la fase di integrazione. Ipotizzare di ottenere nuvole di punti con un simile grado di infittimento, può portare, però, a risultati non soddisfacenti. Ridurre la risoluzione delle acquisizioni *range-based* comporterebbe, come accennato in precedenza, la perdita di dettagli nella definizione delle geometrie che caratterizzano l'oggetto; viceversa, una densità di punti elevata nei rilievi *image-based* richiederebbe tempi notevolmente più lunghi per l'elaborazione della nuvola di punti e l'uso di strumentazioni *hardware* ad altissime prestazioni in grado di gestire l'intero processo.

Con particolari accorgimenti sia nella progettazione della fase di campagna del rilievo<sup>29</sup> – con la definizione della strumentazione da utilizzare nelle

---

<sup>29</sup> È sovente il ricorso a prassi operative scandite per fasi che prevedono l'integrazione di diverse strumentazioni e processi di elaborazione. A delle prime acquisizioni *image-based*

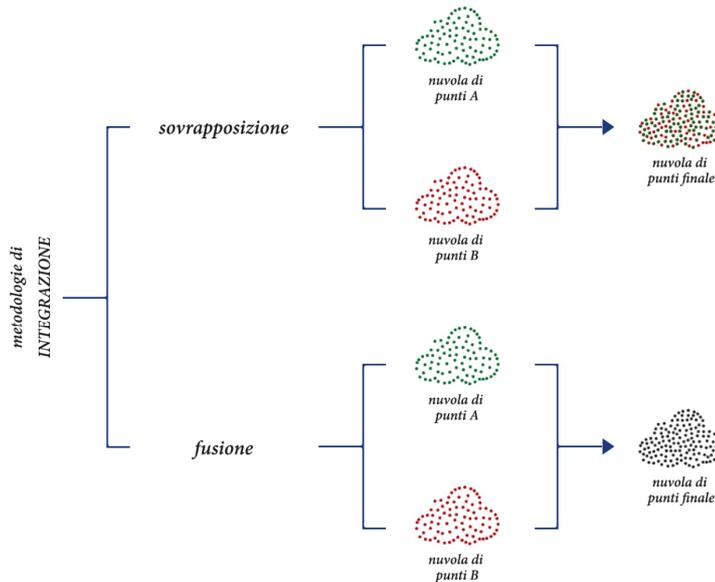


Fig. 1.12 – Schematizzazione delle metodologie di integrazione di dati derivanti da rilievi *reality-based*.

Elaborazione M. Pulcrano

diverse zone da acquisire in riferimento anche ai vincoli che il manufatto e il suo contesto impongono – che in quella di restituzione – legata, ad esempio, all'utilizzo di punti di controllo, mappe di profondità e *software* specifici –, si possono limitare gli errori di integrazione dei diversi dati.

È bene valutare il processo di integrazione anche in riferimento al *software* che si intende utilizzare per l'elaborazione, non solo per la qualità del risultato finale, ma anche per la tipologia di dato che può essere estrapolato.

---

aeree – con strumentazioni di supporto come droni, elicotteri, palloni aerostatici, etc. – volte alla definizione delle caratteristiche formali e dimensionali generali dell'area di studio, vengono integrate acquisizioni *range-based* e/o *image-based terrestri* per meglio definirne forma e colore. Elementi minuti, come cornici modanate ed elementi scultorei, infine, vengono restituiti con ulteriori acquisizioni *image-based* di dettaglio – e processamenti SfM con settaggi di qualità più elevata – al fine di restituire la plasticità reale nelle forme digitali (El-Hakim et al., 2004).

Alcuni, ad esempio, prevedono solo la roto-traslazione – ed eventualmente, il ridimensionamento se non correttamente in scala – di una nuvola di punti rispetto ad un'altra considerata di riferimento. In pratica, si perviene alla registrazione in un unico sistema di riferimento e ad un'integrazione, che, di fatto, risulta apparente poiché i due modelli (o più modelli, se l'operazione viene reiterata) sono sovrapposti ma individuabili distintamente.

Altri, invece, comportano una vera e propria fusione del dato, per cui, al termine del processo di integrazione, non è più possibile distinguere l'apporto di una nuvola di punti rispetto all'altra (*data fusion*).

Va, quindi, valutata con attenzione la scelta, non solo della strumentazione da utilizzare rispetto al caso in esame, ma anche del processo che si mette in atto in riferimento alla tipologia di dato che si vuole ottenere (fig. 1.12).

### 1.3.1 Tecniche di sovrapposizione delle nuvole di punti

Nelle integrazioni basate sulla sovrapposizione delle nuvole di punti, condizione imprescindibile è l'allineamento dei dati di *input*.

Ricettori di segnali GPS interni alle strumentazioni utilizzate – o associati ad esse – e battute topografiche di CGP e CP consentono di registrare le nuvole di punti secondo uno stesso sistema – assoluto o relativo a seconda che si faccia riferimento, rispettivamente, al sistema globale o locale –. Verificate, quindi, che le coordinate di suddetti punti siano le medesime, i modelli tridimensionali possono essere visualizzati in un unico spazio di lavoro mediante l'esportazione in formati compatibili (*.txt*, *.e57*, *.ptx*, *.las*, per citarne alcuni) e l'importazione in *software* dedicati. La posizione corrispondente sarà letta in automatico e non saranno necessarie altre operazioni per visualizzare il risultato complessivo.

Non sempre, però, questa condizione viene soddisfatta. Infatti, come visto in precedenza (Cfr. par. 1.1.2), se con la sensoristica associata alle strumentazioni *range-based* si ottiene, nella maggior parte dei casi, una nuvola di punti correttamente orientata e dimensionata, i processi *image-based* richiedono operazioni di calibrazione del modello per giungere ad un

analogo risultato. Per cui, in assenza di CGP e CP, affinché sia possibile leggere il dato unitario, è necessario eseguire operazioni di allineamento al fine di trovare le corrispondenze tra le nuvole di punti e procedere con la sovrapposizione richiesta.

Diverse metodologie si sono sviluppate negli anni e le varie *software house* che operano nel settore hanno programmato i propri applicativi sfruttando processi, automatici o manuali, e algoritmi di gestione per l'individuazione delle corrispondenze. In generale, possiamo distinguere i vari approcci in allineamenti *grezzi* o approssimativi, a cui appartengono, di fatto, le procedure manuali basate su spostamenti o sull'individuazione di riferimenti, e allineamenti *raffinati* (Huang et al., 2017; Pesci e Caputo, 2015), tra i quali il più noto è basato sull'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*). Al fine di eseguire le operazioni necessarie e ottenere buoni risultati con l'allineamento, è richiesta un minimo di sovrapposizione, ovvero di punti in comune, tra i modelli 3D.

Nelle procedure manuali, ad esempio, la registrazione può essere condotta su sole due nuvole di punti alla volta (o due gruppi di nuvole che si comportano come blocchi unitari), mediante operazioni di traslazione e rotazione gestite dall'operatore. Una delle nuvole è impostata di riferimento, ovvero è bloccata nella sua posizione, mentre la trasformazione della seconda nuvola di punti viene gestita attraverso rototraslazioni grafiche o numeriche, comportando, di fatto, il riposizionamento in sovrapposizione alla prima nuvola di punti, con risultati limitati in termini di precisione e accuratezza. Analogamente, si possono effettuare operazioni di ridimensionamento della nuvola di punti non registrata.

Diverso, invece, risulta l'allineamento manuale basato sull'individuazione di *features* (punti, linee, piani e dati che li identificano univocamente)<sup>30</sup>, sia

---

<sup>30</sup> Sono necessarie sole tre corrispondenze per effettuare l'allineamento, ma alcuni *software* richiedono un numero maggiore per affinare l'allineamento. Non sempre, però, un numero elevato è sinonimo di precisione.

Fig. 1.13 – Integrazione per sovrapposizione mediante punti di controllo di nuvole di punti fotogrammetriche aeree e terrestri.

Fonte: di Luggo et al., 2019(b)



per le fasi da condurre che per il livello di affidabilità dei risultati. Dopo aver caratterizzato una delle nuvole di punti come riferimento, è necessario individuare le corrispondenze tra i due modelli. Queste, riconosciute dal *software*, saranno i vincoli per ruotare e traslare la nuvola di punti non registrata – la trasformazione sarà rigida se i modelli presentano le stesse dimensioni –. Al termine delle operazioni viene estrapolata la matrice di spostamento, corredata anche con le informazioni di deviazione tra i valori delle coordinate dei punti, utile a replicare il procedimento senza ripetere la fase di individuazione degli elementi (fig. 1.13).

L'allineamento manuale, in ogni caso, comporta tempi lunghi e l'impossibilità di gestire un numero di nuvole di punti (o gruppi di nuvole di punti) superiore di due; per cui, nonostante sia molto applicato, sono state sviluppate altre procedure.

La registrazione per mezzo dell'ICP<sup>31</sup>, invece, è incentrata sull'individuazione, tra le possibili combinazioni, di quella che restituisce la matrice di spostamento con errore minimo, ovvero con valore di deviazione *standard* minimi. Si tratta di un processo iterativo, che viene eseguito per fasi automatizzate, dove viene valutata di volta in volta la convergenza dei due modelli attraverso trasformazioni rigide. Affinché il risultato sia accettabile, è necessario che le nuvole di punti<sup>32</sup> – o porzioni di esse – da sovrapporre siano già in parte allineate in quanto il processo lavora senza conoscere le corrispondenze tra i punti, ma si basa sulle distanze che essi presentano<sup>33</sup>. Spesso, infatti, l'allineamento attraverso l'ICP e, più in generale gli allineamenti *raffinati* sono eseguiti a valle di quelli *grezzi* al fine di migliorarne il risultato.

È il caso, ad esempio della *global registration* o *multiview registration*<sup>34</sup>, un altro metodo automatizzato che consente di affinare ulteriormente il risultato dell'allineamento e che lavora per coppie di *range maps* ridistribuendo l'errore per tutto il modello, ovvero restituendo la corrispondenza che

---

<sup>31</sup> Ideato negli anni '90 da Besl e McKay (Besl e McKay, 1992), ad oggi, le *software house* presentano delle varianti dell'ICP al fine di rendere il processo più elastico nell'individuazione della corrispondenza tra nuvole di punti. Ad esempio, come settaggi da impostare a monte del processo, è stato introdotto il numero massimo di confronti – o iterazioni – da eseguire e la definizione dell'errore minimo che rende accettabile l'allineamento a cui l'algoritmo è pervenuto.

<sup>32</sup> La registrazione mediante ICP può essere eseguita anche tra nuvole di punti e modelli *mesh*; in questo caso, l'algoritmo lavora sull'individuazione di piani di *best-fit* su cui vengono proiettati i punti della nuvola e sulla lettura delle distanze, secondo direzioni tangenti.

<sup>33</sup> A partire da due nuvole di punti, A e B, l'ICP calcola per ogni punto di A il punto più prossimo di B; analogamente se si è in presenza di una *mesh*, l'ICP stima per ogni punto di A il punto corrispondente della superficie che costituisce il modello poligonale. In base alle impostazioni dei settaggi, il processo viene reiterato tante volte fino a giungere alla convergenza dei due modelli, che, di fatto, non si potrà mai avere perfettamente in quanto le nuvole di punti A e B – e ancor di più la nuvola di punti A e il modello *mesh* –, per loro natura, non sono formate dagli stessi punti. Ciò tende ad influenzare il risultato dell'allineamento e ad avere stime non proprio corrette nel calcolo delle divergenze.

<sup>34</sup> Esistono delle varianti, diversificate in funzione dell'algoritmo utilizzato per gestire il processo – molte utilizzano proprio un ICP rivisitato –.

presenta il valore minimo di errore valutato rispetto alle diverse iterazioni eseguite – analogamente a quanto avviene per l'ICP –. A differenza delle tecniche precedenti, la *global registration* consente di elaborare una maggiore quantità di dati; se da un lato, però, questo può essere considerato un vantaggio, dall'altro va precisato che, data anche la complessità che sovente caratterizza le nuvole di punti, l'esecuzione del processo potrebbe comportare un carico computazionale maggiore, esiti negativi o errori elevati.

### 1.3.2 Fusione dei dati di rilievo *reality-based*

In seguito alle operazioni di allineamento, le diverse nuvole di punti che caratterizzano il rilievo di un manufatto, possono essere unite in modo da formare un unico modello tridimensionale. Sia che si tratti di rilievi *range-based* che *image-based*, la fusione del dato consente di ridurre la ridondanza dei punti – semplificando le aree di sovrapposizione – e di creare un unico modello poligonale. Tale processo, definito *meshing*, viene messo in atto per rispondere a diverse esigenze, tra le quali figurano la gestione agevolata del modello, per il numero inferiore di elementi da computare, e la restituzione in superfici dell'oggetto rilevato, in modo da visualizzarlo secondo forme figurative prossime al reale.

Scopo del *meshing* è trovare la giusta corrispondenza tra i punti e le superfici al fine di restituire un modello che meglio descriva l'oggetto nella sua conformazione<sup>35</sup>. Esistono diversi algoritmi per la costruzione di superfici poligonali, ma generalmente, i *software* che permettono tale operazione

---

<sup>35</sup> Essendo la superficie costruita sulla base dei punti del modello digitale, è possibile che venga approssimata se la distanza mutua tra loro è elevata. Quindi, più fitta sarà la nuvola, maggiore sarà la rispondenza della superficie con l'oggetto reale. Non sempre, però, è possibile mantenere *standard* elevati, soprattutto per la gestione che comporterebbe una nuvola di punti con tali caratteristiche. Per cui, buona norma, sarebbe avere aree a densità diversificata, più fitte in corrispondenza di curvature complesse, meno fitte per gli elementi piani discretizzabili con pochi punti o superfici.

sono basati sulla triangolazione di Delauney, definita bidimensionale (o 2D) perché si basa sul principio di proiezione dei punti tridimensionali su un piano. Definito il *range* di distanza, i punti più vicini vengono collegati fino a formare un reticolo continuo; condizione imprescindibile è che i cerchi<sup>36</sup> circoscritti a ciascun triangolo costruito non devono contenere nessun altro punto – o nodo – della *mesh*. In questo modo la triangolazione di Delauney e, quindi, la costruzione del modello poligonale, è univocamente definita.

La distribuzione dei punti nel modello digitale, posti a distanza variabile, influisce sull'andamento dei triangoli che formano la *mesh*, con la conseguenza che si rende necessario editare il modello poligonale con operazioni manuali o con *ri-meshing* per migliorarne la rispondenza visiva col reale – nel caso di triangoli fortemente irregolari – e saturare le eventuali zone vuote.

Nelle integrazioni tra nuvola di punti *range-based* e *image-based*, inoltre, ulteriori operazioni di ri-proiezione delle immagini – le medesime utilizzate per il rilievo fotogrammetrico –, possono migliorare la qualità delle *texture* del modello poligonale finale e associare ad ogni superficie le relative informazioni di colore.

Analogamente a quanto avviene per gli oggetti tridimensionali costruiti con *software* di modellazione, la mappatura delle immagini sul modello *mesh* segue regole di proiezione – o corrispondenza – planare, cubica, cilindrica, o sferica. Nel primo caso, quello di più semplice applicazione, siamo in presenza di una proiezione ortografica in cui la *texture* viene riprodotta perpendicolarmente alla superficie con coordinate  $(x, y)$ . Nella proiezione cubica, gli algoritmi preposti al processo gestiscono automaticamente la

---

<sup>36</sup> Congiungendo i centri dei cerchi si perviene al diagramma – o tassellatura – di Voronoi, che rappresenta una ripartizione del piano in regioni, costituite dall'insieme di punti più prossimi ai singoli punti P del piano. La relazione duale che lega la tassellatura di Voronoi con la triangolazione di Delauney, risiede nella proprietà che ad ogni centro dei cerchi, corrisponde un vertice del diagramma di Voronoi e l'unione dei suddetti vertici genera i bordi delle regioni.

selezione delle superfici, in base all'orientamento che prevale, e l'associazione con opportune proiezioni planari<sup>37</sup>. A seguire, nella proiezione cilindrica la superficie viene avvolta dal *frame* rispetto ad un asse di rotazione e le coordinate rettangolari dell'immagine  $(x, y, z)$  si trasformano in coordinate cilindriche  $(\rho, \varphi, z)$ <sup>38</sup>. Infine, nell'ultima proiezione, il *frame* viene modellato all'interno di una sfera prima di essere proiettato sulla superficie. Le coordinate  $(x, y, z)$  vengono, quindi, trasformate in coordinate sferiche  $(r, \theta, \varphi)$ <sup>39</sup>.

In generale, la scelta del tipo di proiezione viene fatta in funzione della morfologia dell'oggetto; nel caso specifico di modelli tridimensionali del patrimonio storico-architettonico, caratterizzati da un'elevata complessità delle forme, i *software* lavorano con processi automatizzati che discretizzano le superfici in elementi più semplici e applicano *sub-texture*, ovvero proiezioni parziali.

Il processo di *meshing* e *texturizzazione* pocanzi descritto, gestibile attraverso diversi applicativi (*3DF Zephyr PRO* e *Aerial, Reconstructor, Bentley*

---

<sup>37</sup> In generale, questo tipo di proiezione utilizza la *texture* suddivisa in sei parti, corrispondenti alle facce di un cubo virtuale, con la possibilità di mappare l'oggetto in tutta la sua tridimensionalità come accade nelle proiezioni cilindriche e sferiche. Ma il tipo di proiezione ortografica su cui si basa, al pari della proiezione planare, ne limita le deformazioni indotte dalla mappatura tridimensionale, rendendola, di fatto, maggiormente applicata soprattutto nella caratterizzazione degli elementi costruiti con i *software* di modellazione tridimensionale.

<sup>38</sup> Dato un punto P del *frame*, tali coordinate rappresentano, rispettivamente, la distanza radiale  $(\rho)$ , ovvero la distanza della proiezione del punto P sul piano  $xy$  e l'origine degli assi di riferimento, l'*azimut*  $(\varphi)$ , ovvero l'angolo formato tra l'asse  $x$  e la retta che congiunge l'origine del sistema con la proiezione P sul piano  $xy$ , e infine la quota del punto P  $(z)$ , ovvero la distanza tra il piano  $xy$  e il punto P.

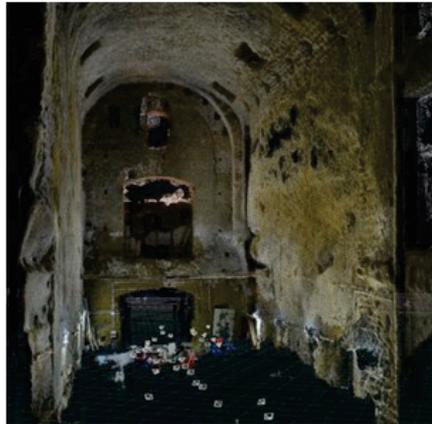
<sup>39</sup> Analogamente alle coordinate cilindriche, dato un punto P del *frame* esse rappresentano, rispettivamente, la distanza della proiezione del punto P sul piano  $xy$  e l'origine degli assi di riferimento – distanza radiale  $(r)$  –, l'angolo formato tra l'asse  $x$  e la retta che congiunge l'origine del sistema con la proiezione P sul piano  $xy$  – o angolo polare  $(\theta)$  –, e infine l'angolo formato tra l'asse  $z$  e la retta che congiunge l'origine del sistema con la proiezione P sul piano  $xy$  – o *azimut*  $(\varphi)$  –.



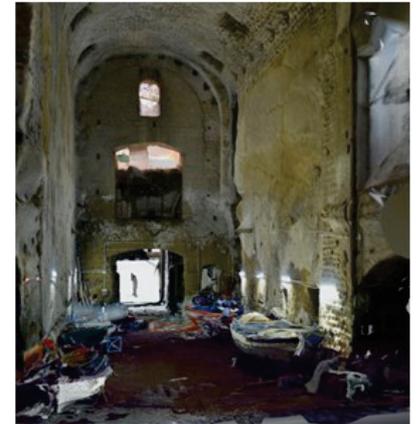
software: *REALITY CAPTURE*  
FUSIONE dei dati in un unico modello



Acquisizione *RANGE-based*



Acquisizione *IMAGE-based*



Integrazione delle acquisizioni  
*REALITY-based*

*ContextCapture*, etc.)<sup>40</sup> e in linea con la prassi ormai consolidata di *editing* delle nuvole di punti, è oggetto di ricerche e sperimentazioni al fine di migliorarne i diversi aspetti che lo connotano. Spesso infatti, operazioni lunghe e laboriose lo caratterizzano, alcune delle quali sono da svolgere ancora con processi manuali, che se da un lato sottolineano la fondamentale presenza dell'operatore, dall'altro – nel caso della verifica dell'integrazione tra i dati – sono connesse ad interpretazioni soggettive.

Gli sviluppi *software* degli ultimi decenni, però, hanno portato alla creazione di nuovi strumenti che, sebbene siano in fase di revisione e ulteriore evoluzione, propongono un nuovo modo di operare. È il caso, ad esempio, di *RealityCapture*<sup>41</sup> della *Capturing Reality*, un *software* di fotogrammetria digitale automatizzata che, importando la nuvola di punti

Fig. 1.14 – Restituzione di strutture amorfe costituenti ambienti ipogei attraverso l'integrazione di dati *reality-based*. Il processo di fusione con creazione di un modello poligonale *texturizzato* finale è stato gestito nell'applicativo *RealityCapture*.

Elaborazione M. Pulcrano

<sup>40</sup> Una lista più completa, ma non esaustiva, dei diversi *software* che consentono di editare nuvole di punti ottenute dai sensori attivi e/o passivi è disponibile su [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_programs\\_for\\_point\\_cloud\\_processing](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_programs_for_point_cloud_processing).

<sup>41</sup> <https://www.capturingreality.com/>

acquisita da strumentazioni *range-based*, consente di fonderla con il *dataset* fotografico da sottoporre al processo SfM.

Già dalle prime primissime fasi di allineamento, i dati laser scanner e i *frames* fotografici vengono elaborati insieme per restituire un modello uniforme e completo nelle parti mancanti derivanti dalle diverse acquisizioni. Il processo viene quindi eseguito basando sulla precisione morfo-geometrica e metrica, oltre che sull'orientamento, portata dalla nuvola di punti *range-based*, la costruzione della nuvola rada. A seguire, come avviene nel più tradizione processo SfM, si otterrà la nuvola di punti densa e il modello *mesh*, elaborati in sequenze automatizzate e con settaggi interrelati, gestendo in un unico processo la costruzione dei due modelli tridimensionali. Infine, nell'ultima fase di *texturizzazione* del modello poligonale, è possibile scegliere su quali foto eseguire la computazione, così da escludere quelle importate con la nuvola di punti *range-based* e rendere il modello finale caratterizzato anche da un'elevata resa fotorealistica (fig. 1.14).

CAPITOLO SECONDO

**MODELLI INFORMATIZZATI PER LA  
RAPPRESENTAZIONE DIGITALE 3D  
DEL PATRIMONIO COSTRUITO**

**Questioni teoriche e criticità applicative  
nei modelli *Heritage* - BIM**

Negli ultimi decenni, il settore AECO (*Architecture, Engineering, Construction and Operations*) ha vissuto una vera e propria rivoluzione che ha modificato i tradizionali approcci alla rappresentazione dell'Architettura, indirizzando verso l'utilizzo e lo sviluppo di oggetti tridimensionali associati a ricche banche di dati fortemente interconnessi, che definiscono ed esplicitano le caratteristiche qualitative e quantitative dei manufatti architettonici. La strutturazione e l'aggregazione di questi oggetti digitali, secondo logiche parametriche *object-oriented* e rapporti relazionali predeterminati, delineano i fondamenti su cui si basa la metodologia BIM (*Building Information Modeling*) e la costruzione di modelli informativi, individuati come interessante strumento per la gestione integrata delle attività di

progettazione e per il coordinamento ottimizzato di tutti i possibili specialisti di settore che intervengono nei processi AECO.

Concettualmente ideato negli anni '70 da Charles M. Eastman, il termine BIM viene formalizzato da Jerry Laiserin all'inizio del XXI sec. Il NIBS (*National Institute of Building Science*), oggi, lo definisce come *a digital representation of the physical and functional characteristics of a facility, which serves as a shared knowledge resource for information about a facility that forms a reliable basis for decisions during its lifecycle from inception onward*. Un nuovo linguaggio dove le tradizionali rappresentazioni di pianta, sezione e prospetto lasciano il posto a modelli interattivi basati su *smart-objects* – oggetti intelligenti, parametrizzati e informatizzati –. Non più, quindi, disegni bidimensionali statici, caratterizzati da linee e polilinee che descrivono l'architettura attraverso la costruzione di figure geometriche semplici (quadrato, cerchio, arco, etc.), ma modelli tridimensionali, costituiti da elementi digitali che emulano le diverse componenti dell'edificio (muro, solaio, finestra, porta, etc.) dal punto di vista geometrico, ma anche tecnico e funzionale. Sebbene negli ultimi anni sia stato ampiamente riconosciuto l'apporto migliorativo che il BIM ha introdotto nelle procedure operative e nell'intero ciclo di vita del manufatto – dalla fase di progettazione ed esecuzione fino a quelle di gestione e manutenzione –, esistono ancora difficoltà legate all'interoperabilità e alla strutturazione dei modelli secondo formati di scambio *open* (IFC, *Industry Foundation Classes*, e COBie, *Construction Operations Building Information Exchange*, sono tra i protocolli più comuni attualmente utilizzati). Tematiche fondamentali soprattutto in riferimento alla multi-disciplinarietà che chiaramente caratterizza il settore AECO.

Un nodo critico resta attualmente l'applicazione del BIM al patrimonio costruito, soprattutto per la strutturazione semantica e topologica di *smart (historical)-objects* non presenti nelle librerie oggetti associate di *default* alle attuali piattaforme *software*, eppure necessari per la caratterizzazione dei manufatti storici. A ciò, si aggiungono le difficoltà operative legate alla costruzione di forme complesse non sempre possibili con l'utilizzo dei *tools* di modellazione offerti dalle stesse. Ciò deriva, come è ben noto, dal fatto

che tali strumenti e processi sono nati per progetti di nuova realizzazione e dunque necessitano di adeguati compromessi laddove si vogliono ottenere risultati soddisfacenti nell'applicazione al costruito storico. Ad oggi, infatti, si evince un grande interesse da parte della comunità scientifica verso l'individuazione delle procedure più idonee atte a documentare e rappresentare il patrimonio storico-architettonico attraverso modelli *Heritage-BIM*, al fine di snellire e coordinare le attività ad esso inerenti – con particolare attenzione verso quelle di gestione e valorizzazione –.

## **2.1 Modelli informativi del patrimonio costruito: l'*Heritage - BIM***

L'applicazione della metodologia BIM al patrimonio storico-architettonico viene introdotta da Maurice Murphy agli inizi del XXI sec. come un nuovo modo per rappresentare gli edifici esistenti, basato sulla strutturazione di librerie di oggetti parametrici e rilievi *reality-based* (Murphy et al., 2009).

La standardizzazione e la ripetibilità<sup>42</sup> che connotano la costruzione di modelli BIM – a fronte di una semplificazione, ottimizzazione e riduzione

---

<sup>42</sup> Tutti i sistemi BIM sono basati su librerie di oggetti categorizzati (*smart-objects* o *BIM-objects*) – corrispondenti alle diverse componenti tecnologiche di un manufatto edilizio (solai, travi, pilastri, muri, porte, finestre, etc.) e agli elementi accessori (arredi, sanitari, etichette, etc.) –, ovvero su rappresentazioni virtuali di elementi reali, definiti da forme tridimensionali e parametri per la gestione delle informazioni correlate. Questi ultimi, in particolare, consentono di gestire le variazioni dei metadati (attributi geometrici e non) dell'oggetto, di replicarlo e adattarlo alle diverse esigenze che si palesano, senza comprometterne caratteristiche e logica di funzionamento. Completano la parametrizzazione i vincoli relazionali e gerarchici preimpostati per ogni categoria. Gli *smart-objects*, quindi, non sono pura astrazione grafica del reale ma oggetti intelligenti e autocoscienti (Garagnani, 2012).

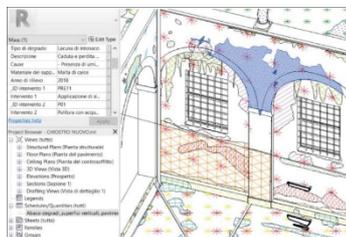


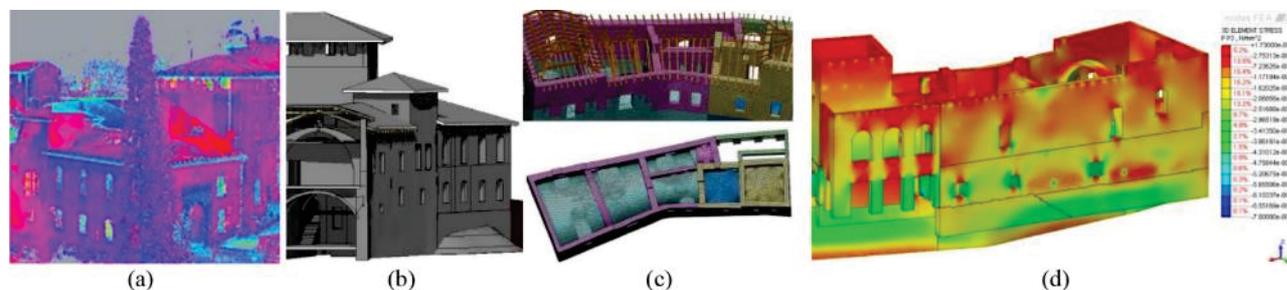
Fig. 2.1 – Mappatura delle diverse forme di degrado in ambiente BIM.

Fonte: Croce et al., 2019

dei tempi del processo ideativo e costruttivo di un'opera architettonica –, comportano per il patrimonio costruito riflessioni maggiori per le scelte da operare in fase di modellazione, poiché non sempre si rapportano adeguatamente all'unicità e non ripetibilità che caratterizza l'intero sistema (Bianchini et al., 2016). Inoltre, le relazioni che sussistono tra gli elementi che lo compongono – difficilmente incasellabili in strutture predefinite e spesso conseguenza delle trasformazioni susseguitesi nel tempo –, i materiali e le tecniche costruttive adoperate per la loro esecuzione, le forme che li connotano, etc., molto di rado sono replicabili in sistemi ritenuti analoghi. A ciò va aggiunto lo stato di conservazione che presenta l'edificio che, di fatto, lo rende un *unicum* nelle sue specificità. Ciononostante, sono innegabili i vantaggi apportati dall'H-BIM al patrimonio costruito che spaziano dalla costruzione di un *database* unico, quale sintesi coerente delle numerose informazioni eterogenee e supporto per la documentazione e gestione del manufatto (Chiabrando et al., 2017; Croce et al., 2019) (fig. 2.1), ad interventi preventivi, analisi specifiche e ipotesi ricostruttive (Amoruso e Mironenko, 2019; Previtali et al., 2019; Tucci et al., 2019) (fig. 2.2), eseguite per mezzo di *plugin* e *tools* dedicati, fino all'impostazione di progetti di fruizione con ricostruzioni virtuali e modalità interattive, multimediali e multisensoriali (Cfr. par. 7.1). Nasce quindi spontanea la necessità, pur mantenendo fermi i principi teorici alla base della metodologia, di diversificare gli approcci operativi del BIM nell'ambito H-BIM. La realizzazione del modello H-BIM, infatti, non può che avvenire attraverso un percorso a ritroso capace di simulare

---

Ad esempio, per poter essere collocata nel modello una finestra necessita di un muro – così come avviene nel reale –, il quale, di conseguenza, sarà forato automaticamente dal vano corrispondente all'apertura, visti i vincoli che sussistono tra le due categorie. Di fatto, ad ogni modifica dei parametri dell'oggetto finestra, corrisponderà la variazione del vano e, a sua volta, del muro; se nel modello sono presenti una pluralità di finestre della medesima tipologia, tale variazione potrà essere letta in contemporanea su tutte.



costruzione del manufatto<sup>43</sup>, divenendo, al contempo, chiarificatore delle eventuali incertezze – emerse durante le fasi di analisi – sulla storia e sull'esecuzione della fabbrica. In questo, il tempo, che rappresenta la quarta dimensione del BIM (4D)<sup>44</sup>, assume un ruolo fondamentale. Alla caratterizzazione delle fasi temporali come gestione delle sequenze esecutive, manutentive e gestionali nel processo costruttivo – accezione consolidata per i progetti sull'*ex-novo* – si associano le trasformazioni che il manufatto ha subito nei secoli: un nuovo significato per rinvenire la

Fig. 2.2 – Fasi sequenziali del processo *Cloud-to-BIM-to-FEM*: (a) nuvola di punti; (b) modello BIM; (c) modello elementi finiti; (d) analisi strutturale.

Fonte: Barazzetti et al., 2015

<sup>43</sup> Contrariamente a quanto avviene nel BIM per l'*ex-novo* che, invece, presenta un modello in divenire, che guarda al futuro dell'edificio piuttosto che al suo passato.

<sup>44</sup> Al fine di ordinare in un unico sistema e gestire correttamente l'eterogeneità delle informazioni inerenti il manufatto edilizio, la metodologia BIM è stata pensata secondo un'ottica multilivello o multidimensionale strutturata in sei sezioni. La prima (BIM 3D) corrisponde alla caratterizzazione geometrica del modello e alle attività di *model checking*, ovvero alla verifica della rispondenza alle richieste progettuali (*code checking*) e dei conflitti (o interferenze), geometrici e non, tra gli elementi del modello (*clashdetection*). Il BIM 4D, come detto, è legato alla gestione del tempo trasponendo il diagramma di Gantt nel modello affinché sia possibile controllare dall'esecuzione della commessa, ai cicli di manutenzione, fino all'eventuale dismissione dell'edificio. La quinta dimensione (BIM 5D) è relativa alla stima dei costi rapportata alla quantità di materiale e desunta in automatico dalla lettura degli attributi delle componenti del modello. Il concetto di sostenibilità non si perde nel processo BIM, ma viene espresso mediante la sesta dimensione (BIM 6D) e considera gli apporti positivi della metodologia sugli aspetti ambientali, economici e sociali. Il BIM 7D e il BIM 8D, infine, sono legati al *facility management* e alla prevenzione dei rischi durante i cantieri di costruzione e manutenzione. Ad ogni tipologia di informazione, quindi, viene associato un preciso livello dimensionale.

Fig. 2.3 – Vista comparativa del modello H-BIM con la caratterizzazione degli oggetti in relazione alle fasi di costruzione e demolizione.

Fonte: Scandurra et al., 2017



conformazione originaria del manufatto e quelle susseguites, mappando sugli *smart-objects* gli attributi rappresentativi delle diverse epoche (Rodríguez-Moreno et al., 2016; Scandurra et al., 2017) (fig. 2.3).

È il modello stesso, dunque, a connotarsi come strumento di conoscenza<sup>45</sup> della complessa articolazione multidimensionale e pluridisciplinare del manufatto (Centofanti et al., 2016), sottolineando ancora di più come, soprattutto per il patrimonio costruito, non si rimandi al concetto di *modellazione*, quanto piuttosto a quello di *modellizzazione*<sup>46</sup> – dicotomia che

<sup>45</sup> La relazione che lega i modelli, intesi come schematizzazione grafico-concettuale dell'architettura, alla conoscenza è un concetto ampiamente dibattuto e consolidatosi nel tempo, ma che trova nella metodologia BIM una nuova valenza espressiva, relazionata alle caratteristiche proprie del modello inteso, appunto, non come semplice rappresentazione ma come “*realtà virtualizzate*” con una capacità intrinseca di *interrogazione e analisi progettuale, conservativa, divulgativa, materica, numerica, tutte caratteristiche che vanno ben oltre la visualizzazione* (Maietti e Ferrari, 2018).

<sup>46</sup> Il termine *modellazione* esprime l'azione pratica del costruire, o riprodurre, un elemento tridimensionale (ad esempio, il vaso ottenuto modellando la creta o il bicchiere dal vetro); in ambiente digitale, in particolare, indica il processo operativo eseguito mediante *software*

da sempre accompagna la metodologia BIM –. In tal senso, infatti, un modello informativo, a differenza degli altri prodotti di modellazione<sup>47</sup>, richiede un’attenta analisi delle informazioni a disposizione al fine di ottenere risultati aderenti e coerenti con la realtà, non solo dal punto di vista morfo-geometrico, ma anche logico-funzionale, nei quali le caratteristiche dei diversi elementi che compongono il modello e le relazioni impostate tra essi siano correttamente esplicitate.

### 2.1.1 *Workflow* di processo

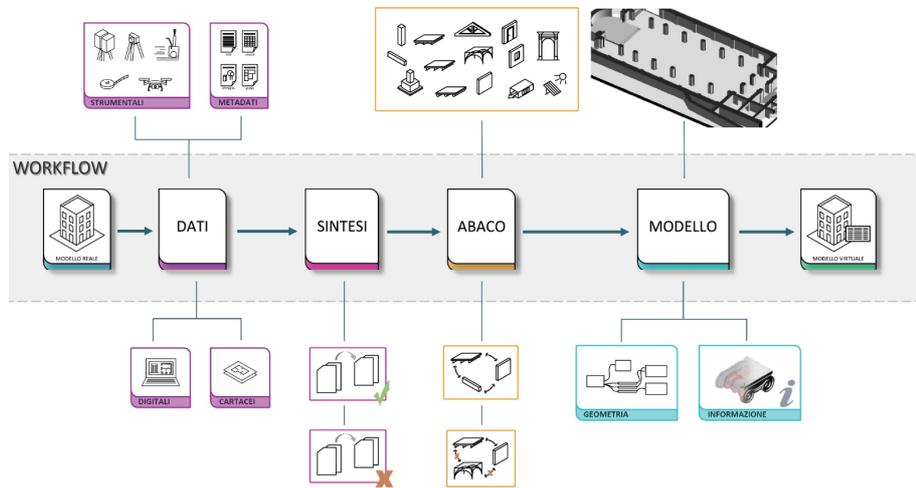
Alla luce di quanto detto al punto precedente, è chiaro che il *workflow* esplicativo della modellazione H-BIM consta di diverse fasi (Lopez et al., 2018) e presuppone necessariamente un’adeguata conoscenza del manufatto al fine di corredare il modello con le opportune informazioni. Questa conoscenza preliminare, come è ben noto, non si limita all’acquisizione dei soli dati morfo-metrici, che pur si rendono necessari per restituire negli *smart-objects* le corrette dimensioni e proporzioni, ma fa riferimento ad una più ampia gamma di informazioni (Empler, 2018). Per cui ricerche di tipo storico-documentale, archivistiche, iconografiche, etc., congiuntamente ad analisi tecniche e diagnostiche sono utili ad

---

di modellazione della forma e diversificato in funzione delle modalità con cui viene replicato (m. solida, m. per superfici, m. algoritmica, m. *free-form*, etc.). Il secondo termine – *modellizzazione* –, invece, è legato al processo di conoscenza necessario per definire, comprendere, interpretare e risolvere un problema; in tal senso, può essere considerata come l’azione mentale sottesa alla costruzione del modello tridimensionale vero e proprio (Cresti, 2016; Marotta e Lo Turco, 2014).

<sup>47</sup> Nei sistemi BIM, se un parallelepipedo viene caratterizzato come muro, esso sarà un muro a tutti gli effetti e come tale si comporterà. Diversamente, nelle altre forme di modellazione, quel parallelepipedo può assumere molteplici accezioni (finestra, porta, solaio, arredo, etc.) perché non è univocamente definito, ma rappresenta esclusivamente un’entità geometrica con quelle particolari caratteristiche morfo-geometriche e dimensionali.

Fig. 2.4 – Schematizzazione del workflow operativo che caratterizza la costruzione di un modello H-BIM: (i) acquisizione dati strumentali e non; (ii) confronto tra lo stato di fatto e le informazioni pregresse; (iii) redazione di abachi tematici con l'individuazione delle parti che compongono il manufatto e delle relazioni che li caratterizzano; (iv) modellizzazione degli smart-objects e creazione del modello H-BIM.



Fonte: contributo dal titolo *Sistemi voltati nei processi cloud to BIM*, presentato in occasione dell'evento *3DModeling&BIM*, Roma 2018, dal gruppo di ricerca di Luggo A., Scandurra S., Pulcrano M., Siconolfi M., Moncao S. I risultati della ricerca sono inoltre riportati nel contributo di Luggo et al., 2018.

implementare il rilievo metrico<sup>48</sup>. È ovvio che la conoscenza completa ed esaustiva di un manufatto è condizione (quasi) utopica poiché diversi sono i fattori che subentrano, limitandone la portata, e solo di rado si perviene a documentazioni tali da caratterizzarne ogni singolo aspetto che lo connota. Sovente, infatti, mancano o sono frammentarie le informazioni d'archivio e non è dato intervenire con analisi di dettaglio per conoscere, ad esempio, la stratigrafia di un solaio e valutare la rispondenza di un elemento murario alle sollecitazioni a cui è sottoposto. Laddove sia possibile, un supporto importante per la conoscenza del dato tecnico viene da analisi comparative con edifici coevi o siti nelle zone limitrofe, poiché spesso sono espressione delle tradizionali tecniche costruttive e dei materiali utilizzati per la messa in opera delle strutture. È indubbio che più dettagliato e aderente sarà il dato su cui strutturare gli elementi

<sup>48</sup> Sebbene la campagna di acquisizione del dato morfo-metrico sia condotta con rigore metodologico (Cfr. capitolo primo), prevedendo l'integrazione delle strumentazioni più performanti, ciò che viene restituito non è altro che la pelle del manufatto, essendo, nei fatti, la nuvola di punti rappresentativa della parte più superficiale. Per cui, anche laddove il rilievo riesca ad immagazzinare la totalità dei dati interni ed esterni – anche se praticamente impossibile poiché la nuvola di punti è pur sempre un modello discretizzato –, si dovrà necessariamente integrare con altre tipologie di informazioni e analisi.

tridimensionali, maggiore potrà essere la rispondenza e la verosimiglianza con l'oggetto reale.

Completata – fin dove consentito – la raccolta del *corpus* documentale, una fase propedeutica alla modellazione è dedicata all'analisi, al confronto e alla sintesi dei dati, al fine di rintracciare i diversi componenti costituenti il manufatto, le qualità che presentano e i parametri caratteristici da attribuire agli *smart-objects* durante la loro costruzione. Schematizzazioni in abachi grafici e testuali (fig. 2.5) sono utili per il riconoscimento e la suddivisione tra elementi che si ripetono e, dunque, assoggettabili a logiche di standardizzazione, ed elementi unici, che, invece, comportano riflessioni in merito alle scelte di modellazione e ai *tools* da utilizzare. È probabilmente questa la fase che comporta un maggiore impiego di tempo, poiché è necessario analizzare la documentazione reperita evitando di riportare informazioni errate; ma se condotta con attenzione e coscienza critica può notevolmente agevolare – per tempi e risoluzione delle complessità – la modellazione vera e propria per la base teorico-mentale risultante dal processo ontologico messo in atto.

Infine, con la fase pratico-esecutiva ogni elemento prende forma e trova la giusta collocazione all'interno del modello. Diverse sono le sequenze operative che la caratterizzano: (i) definizione della geometria e dei parametri che ne regolano le variazioni dimensionali, (ii) informatizzazione con attributi non geometrici e collegamenti esterni al

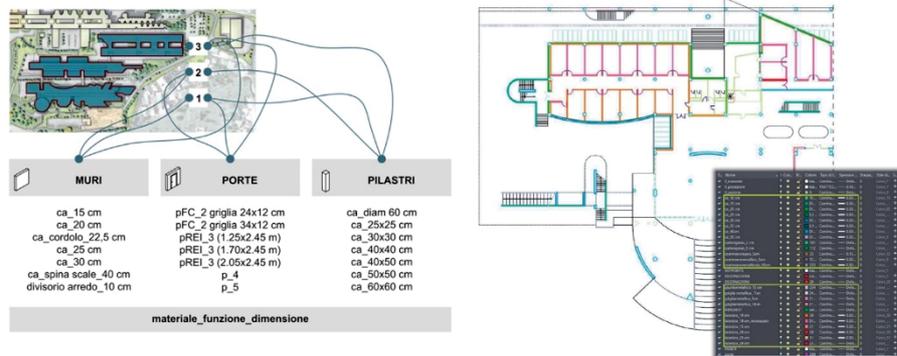


Fig. 2.5 – Sintesi dei dati strumentali, d'archivio e bibliografici con la redazione di schemi grafici e tabellari basati su codifiche per l'individuazione univoca delle componenti del sistema.

Lavoro di ricerca dipartimentale (DIARC – Università di Napoli “Federico II”, resp. scientifico Prof. Arch. A. di Luggo) inerente la costruzione di modello E-BIM per la gestione del complesso di Monte Sant’Angelo (Napoli). Gli esiti della sperimentazione sono riportati in di Luggo et al., 2019(b).

modello, (iii) definizione delle relazioni tra gli elementi, (iv) verifica delle incongruenze e dell'aderenza del modello alla documentazione reperita ed (v) eventuale aggiornamento del modello, per il sopraggiungere di nuove informazioni, nuove interpretazioni o per cambiamenti/alterazioni del manufatto. Il tutto può essere gestito con il supporto visivo della nuvola di punti, sia attraverso gli ortofotopiani sia con il modello puntiforme tridimensionale vero e proprio, la cui importazione è stata implementata nelle attuali piattaforme BIM<sup>49</sup>.

Dalla letteratura di settore emerge che operazioni manuali caratterizzano ancora il processo di modellazione, soprattutto per la costruzione delle forme tridimensionali, e che alcune ricerche – in numero esiguo rispetto alle precedenti – si sono soffermate sulla definizione di automatismi in grado di gestire il passaggio tra rilievi *reality-based* e modello H-BIM. Queste ultime, in particolare, mostrano come le procedure *Scan-to-BIM* (Cfr. par. 2.2.1), intese come conversione diretta della nuvola di punti in *smart-objects*, siano ancora un processo da sperimentare e perfezionare, seppur ricco di spunti interessanti per gli sviluppi futuri della metodologia.

In tale ottica, risulta necessaria l'implementazione del *workflow* con nuove fasi specifiche inerenti l'*editing* della nuvola di punti: segmentazione e riconoscimento delle geometrie sono dunque processi propedeutici alla conversione e caratterizzazione formale, topologica e semantica degli *smart-objects* (Previtali e Banfi, 2018). Tali operazioni sulla nuvola di punti vedono applicativi ormai consolidati (*CloudCompare*, *Geomagic Studio*, *3D Reshaper*, *Realworks*, etc.), ma i risultati che forniscono non sempre sono implementabili nelle piattaforme BIM, poiché non restituiscono oggetti parametrici, ma primitive geometriche 2D e 3D o superfici poligonali. Inoltre, l'esperienza dell'operatore in alcune fasi del processo – ad esempio, nell'individuazione del piano per l'estrazione del profilo e nella

---

<sup>49</sup>Ne esistono diverse in commercio (*Nemetscheck Vectorworks*, *Nemetscheck Allplan*, *Edificius* della *Acca software*, etc.), ma quelli più utilizzati nella creazione di modelli BIM sono *Autodesk Revit* e *Graphisoft ArchiCAD* (acquisito dalla *Nemetscheck*). (National BIM Report 2018, <http://www.thenbs.com/-/media/uk/files/pdf/nbs-national-bim-report-2018.pdf?la=en>).

definizione dell'oggetto intelligente – ne influenza, di fatto, il risultato. Per cui nuovi *software* e *plugin* (*EdgeWise*, *PointSense*, *Imaginit*, *Pointfuse*, *Scan-to-BIM*, *GreenSpider*, etc.) sono stati sviluppati al fine di implementare e agevolare la costruzione del modello H-BIM, ma il risultato che propongono è fortemente dipendente dalle caratteristiche geometriche che presenta il manufatto, oltre ad essere funzione del grado e della tipologia di automatismo previsto.

In conclusione, va precisato che non sempre è possibile seguire un *iter* sequenziale, per le implicazioni che sovente caratterizzano lo studio del patrimonio storico-architettonico (strumentazioni non disponibili, ritardi nelle autorizzazioni, etc.) e che impongono di operare intrecciando e/o alternando le diverse fasi del *workflow*. Questa particolare caratteristica, se da un lato può essere vista come espressione di negatività – soprattutto nelle tradizionali forme di documentazione –, dall'altro trova nell'H-BIM delle potenzialità applicative date, appunto, dalla possibilità di implementare e aggiornare costantemente il modello.

## **2.2 Criticità applicative nella costruzione dei modelli** ***Heritage* - BIM**

Ad oggi, nonostante le numerose ricerche condotte (Dore e Murphy, 2017; Paris e Wahbeh, 2016; Pocobelli et al., 2018; Volk et al., 2014), non si è ancora giunti alla definizione di un processo applicativo univoco nella costruzione dei modelli H-BIM, poiché molteplici criticità entrano in gioco riflettendosi sulla caratterizzazione geometrica e semantica degli *smart-objects*. Alle difficoltà operative, va poi sommata l'assenza di linee guida e riferimenti normativi che consentano di gestire secondo modalità univoche e condivise le semplificazioni introdotte per la *modellizzazione* di forme complesse e irregolari (Bruno e Roncella, 2019; Oreni et al., 2014),

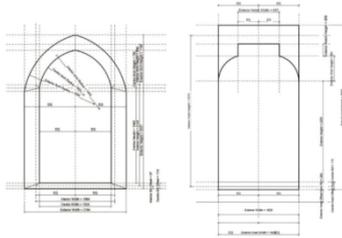


Fig. 2.6 – Costruzione geometrica di aperture mediante la definizione delle relazioni tra forme tridimensionali, piani di riferimento e parametri dimensionali.

Fonte: Fai e Rafeiro, 2014

oltre che la creazione di *smart-objects* – attualmente non previsti – coerenti e rispondenti agli *standard IFC*.

### 2.2.1 Criticità di tipo geometrico

Dal punto di vista geometrico, la parametrizzazione che regola i sistemi BIM, i *tools* implementati nelle attuali piattaforme e l'assenza di strumenti per la modellazione *free-form* non sempre consentono di replicare i componenti e le forme reali. Per questo, nel corso degli anni, si sono delineati diversi approcci per aggirare gli ostacoli imposti da procedure (forse) troppo vincolate e vincolanti: (i) modellazione per *primitive*, (ii) modellazione per *primitive e regole geometriche*, (iii) processi *Scan-to-BIM*.

La modellazione per *primitive* è caratterizzata da operazioni manuali per l'associazione dei parametri agli elementi grafici 2D e 3D e per la definizione delle relazioni che consentono di gestire le variazioni geometriche della forma tridimensionale (fig. 2.6). Comporta, quindi, un onere di modellazione direttamente proporzionale alla complessità dell'elemento che si sta rappresentando e al livello di dettaglio a cui si vuole tendere.

La modellazione per *primitive e regole geometriche* si differenzia da quella per sole *primitive*, per i vincoli geometrico-relazionali che caratterizzano la parametrizzazione del componente virtuale (Apollonio et al., 2012). Presuppone, quindi, l'individuazione delle regole geometriche e dei rapporti proporzionali che sottendono le forme (fig. 2.7), nelle singole parti e nella composizione generale, e la definizione del riferimento in base al quale gestire il ridimensionamento dell'oggetto. Diviene immediata, ad esempio, la caratterizzazione di un'apertura con arco a tutto sesto impostando la relazione che lega la freccia alla corda: definendo le dimensioni della corda, si otterrà automaticamente il valore della freccia corrispondente (o viceversa).

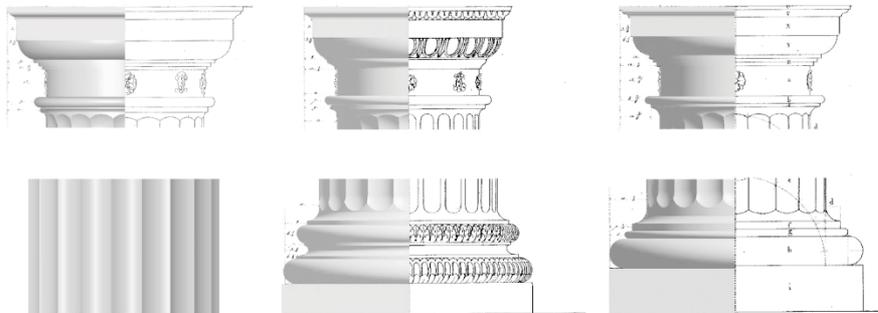


Fig. 2.7 – Modellazione in ambiente BIM degli elementi costituenti una colonna in ordine dorico, relazionando le diverse parti alle regole desunte dai trattati di Palladio, Scamozzi e Vignola.

Fonte: Apollonio et al., 2012

Gli oggetti, quindi, possono assumere dimensioni diverse consentendo la creazione di molteplici tipi dello stesso componente, ma mantenendo inalterata la configurazione formale. Per cui, un quadrato o un'ellisse rimarranno tali, pur variando il parametro di riferimento; cosa che, invece, non accade nella modellazione per *primitive* dove è possibile ottenere un rettangolo dal quadrato o un cerchio dall'ellisse.

Esemplificativo di questo approccio è il lavoro di ricerca svolto da Maurice Muphy (Murphy et al., 2013), volto alla costruzione di una libreria di oggetti tridimensionali, codificati per mezzo di linguaggi GDL (*Geometric Descriptive Language*) e proporzionati sulle regole geometriche desunte dalla trattatistica: gli *smart-objects* vengono relazionati al reale e correttamente dimensionati attraverso rilievi *reality-based* e nuvole di punti. In tal modo, è possibile adattare il componente in modelli H-BIM di altri monumenti che presentano le medesime caratteristiche.

Va precisato, però, che se da un lato la modellazione per primitive e regole geometriche consente di ottenere configurazioni differenti degli *smart-objects* definendo quali parametri sono di riferimento<sup>50</sup> per le variazioni

---

<sup>50</sup> Sebbene infatti il numero di parametri da impostare sia equivalente nelle modellazioni (i) e (ii), la gestione della variazione formale avviene in modo diverso, essendo legata non solo alla complessità dell'elemento ma anche ai vincoli relazioni di tipo geometrico che sussistono tra le parti. Infatti, diversamente da quanto avviene con la modellazione (i), pochi parametri di riferimento sono sufficienti per ottenere le differenti configurazioni dello *smart-object*. Per l'apertura considerata precedentemente, ad esempio, con la (ii) va

dimensionali, dall'altro introduce un grado di semplificazione tale che non sempre rende il componente coerente con la realtà che rappresenta. Inoltre, geometrie imperfette e irregolari, derivanti dall'esecuzione o delle trasformazioni indette dal passare del tempo, influiranno sull'aderenza del modello geometrico rispetto al modello reale.

Date le complessità operative che sovente caratterizzano modellazioni di questo tipo, non mancano esempi in letteratura (Banfi et al., 2018; Brumana et al., 2018) che integrano le potenzialità di più *software* per ottenere la forma desiderata. Questo espediente, però, va valutato con molta attenzione poiché *software* di BIM *authoring* e modellatori<sup>51</sup> esterni producono risultati differenti sia nella caratterizzazione geometrica che nelle logiche di associazione e variabilità, ovvero nei vincoli relazionali e parametrici che è possibile associare al componente per la definizione dell'intero sistema edificio. Nel primo caso, infatti, avremo uno *smart-object* che risponde appieno alle logiche di parametrizzazione e standardizzazione proprie del BIM, ma non è detto che sia particolarmente aderente all'oggetto reale. Viceversa, con i modellatori esterni, avremo un oggetto probabilmente morfologicamente molto accurato e dettagliato ma che, una volta importato nel *software* BIM, diviene una *massa* non modificabile e senza alcuna informazione di tipo dimensionale<sup>52</sup>. In altre parole, si perviene ad un oggetto privo di tutte le qualità che connotano gli *smart-objects*, per cui non replicabile né adattabile. Ciò comporta che, per una modifica dell'elemento, l'oggetto dovrà essere reimportato,

---

variata solo la dimensione della corda per ottenere l'arco desiderato, mentre con (i) è necessario definire manualmente anche la dimensione della freccia. La (i), quindi, richiede l'attribuzione dei valori per un numero maggiore di parametri.

<sup>51</sup> Col termine modellatori, generalmente, vengono classificati i *software* dediti alla costruzione di forme tridimensionali, che può avvenire secondo modalità differenti caratterizzando la tipologia di modellazione (solida, *mesh*, *nurbs* e algoritmica).

<sup>52</sup> Potranno essere associate delle informazioni descrittive per le diverse caratteristiche che l'oggetto presenta, ma nell'elaborazioni di abachi tematici o per informazioni di dettaglio, come ad esempio il conteggio dell'area o del volume, risulterà mancante.

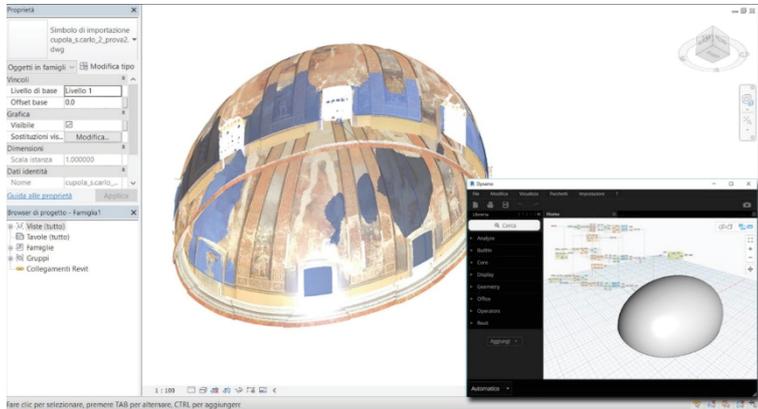


Fig. 2.8 – Modellazione di un solido di riferimento mediante l'applicazione di processi di *visual programming* in *software* esterni ma direttamente connessi alla piattaforma di BIM *authoring*.

Fonte: di Luggo et al., 2018

operazione che invece può essere evitata attraverso una corretta associazione dei parametri negli *smart-objects*.

La massa creata, però, può essere utilizzata come supporto (fig. 2.8) per generare gli altri componenti previsti nel *software* di BIM *authoring*; per cui, sebbene sia limitata nelle sue funzionalità, diventa uno strumento utile per rispondere agli scopi della modellazione (di Luggo et al., 2018).

Per ovviare alle problematiche sopracitate, diversi studi riportano i risultati ottenuti con approcci *Scan-to-BIM* per la conversione automatizzata e semi-automatizzata della nuvola di punti in *smart-objects*. Le metodologie sperimentate si differenziano nelle modalità di restituzione e caratterizzazione semantica degli elementi.

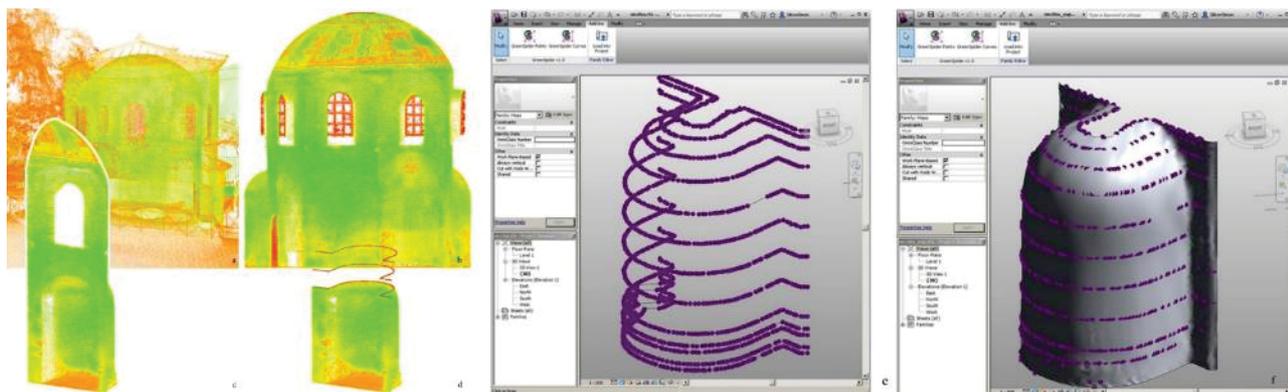
Le fasi che compongono il processo vedono l'integrazione di algoritmi per la segmentazione della nuvola di punti e per il riconoscimento geometrico – forma, dimensioni e posizione – degli elementi caratteristici (punti, profili, piani e superfici) (fig. 2.9). Questi ultimi, in particolare, sono strutturati con l'imposizione di vincoli geometrici, come la distanza tra i punti o le condizioni di ortogonalità tra superfici, e vincoli sulle informazioni associate alla nuvola di punti, come il colore e la riflettanza. Mentre per la classificazione semantica si ricorre a criteri di posizione definendo gli oggetti orizzontali come solai – superiore e inferiore in base alla quota di posizionamento –, gli oggetti verticali compresi tra solai come

Fig. 2.9 – Processi automatizzati *Scan-to-BIM*: (a) nuvola di punti complessiva; (b) segmentazione in parti ed (c) elementi; (d) individuazione dei profili di riferimento; (e) importazione in ambiente BIM attraverso il *plugin GreenSpider*; (f) ricostruzione della forma tridimensionale.

Fonte: Garagnani e Manfredini, 2013

muri, gli spazi vuoti tra solai e muri come porte, e sulla stessa logica anche gli altri oggetti (Previtali e Banfi, 2018). Sugli esiti del riconoscimento si fonda la modellazione della forma, che può avvenire con operazioni manuali, per gli approcci semi-automatizzati, o con ulteriori processi e algoritmi di ricostruzione, per quelli automatizzati.

I risultati nell'applicazione al patrimonio storico-architettonico mostrano, quindi, le potenzialità del processo *Scan-to-BIM*, ma al contempo ne mettono in luce le criticità: le prime sono legate alla possibilità di ottenere in tempi rapidi componenti altamente aderenti e rispondenti al reale, perché basati, appunto, sulla trasformazione diretta del dato di rilievo *reality-based*<sup>53</sup>; le seconde, invece, sono dipendenti dalle difficoltà di elaborare morfologie complesse e dal mancato riconoscimento ontologico degli oggetti. Di fatto, i *tools* e *plugin* finora sviluppati, riescono a fornire soluzioni accettabili, in precisione e accuratezza, per geometrie semplici, regolari e, soprattutto, per punti disposti sul medesimo piano, per cui risultano idonei per edifici contemporanei assimilabili a costruzioni *ex-novo*, ma sono ancora acerbi per essere applicati al costruito storico.



<sup>53</sup> Anche se ciò contrasta con i principi del BIM, poiché di fatto si ottiene un clone virtuale che non sempre garantisce la replica dell'elemento in altri modelli viste le caratteristiche che lo connotano, sono necessarie delle riflessioni più ampie in merito alla modellazione complessiva del manufatto in oggetto e agli elementi che richiedono un dettaglio così elevato.

### 2.2.2 Criticità di tipo topologico e semantico

Dal punto di vista della caratterizzazione topologica e semantica, invece, l'assenza di *smart-objects* dedicati al patrimonio costruito impone di effettuare compromessi affinché gli oggetti digitali abbiano una logica funzionale e relazionale rispondente a quella reale.

È noto che le piattaforme BIM sono progettate con precisi protocolli, sui quali si fonda la strutturazione ontologica del modello in tutte le sue parti e l'interoperabilità, ovvero lo scambio di informazioni, tra i diversi attori del processo e i vari applicativi (visualizzatori, modellatori e analizzatori) necessari per le attività connesse al settore AECO. In tale ottica, affinché il modello possa essere realmente condivisibile, senza perdite o modifiche dei dati associati e prescindendo dal *software* di BIM *authoring* utilizzato, sono stati ideati diversi formati di scambio *open*. Tra questi, l'IFC<sup>54</sup> è quello maggiormente riconosciuto a livello internazionale; progettato da *buildingSMART International*, è divenuto *standard* ISO ed è sottoposto a continui aggiornamenti – come mostrano le versioni rilasciate negli anni – per venire incontro alle esigenze di interscambio che si palesano, migliorandone le diverse specifiche e colmando le lacune presenti.

L'IFC codifica la scrittura e la lettura – e, quindi, l'esportazione e l'importazione – delle informazioni geometriche e non geometriche del modello BIM, attraverso *tag* associati agli oggetti che lo compongono.

---

<sup>54</sup> Accanto all'IFC, *buildingSMART International* ha sviluppato anche altri *standard* come l'IFD (*International Framework for Dictionaries o Data Dictionary*) e l>IDM (*Information delivery manual*).

Il primo (ISO 12006:2015) è legato alla definizione concettuale univoca dei prodotti, dei processi e delle relative proprietà; il bSDD (*buildingSMART Data Dictionary*), il dizionario ontologico internazionale, è fondato sullo standard IFD e relaziona termini analoghi nelle diverse lingue in base al significato che sottintendono. Per cui, ad esempio, le parole *porta* e *door* saranno accomunate poiché presentano lo stesso concetto di base.

Il secondo (ISO 29481:2017), invece, si occupa di delineare operativamente il processo BIM, ovvero chiarisce quando e in quale modalità deve essere eseguita la modellazione, trasferita/scambiata l'informazione, avviata l'attività verifica, etc.. L>IDM viene formalizzato attraverso l'MVD (*Model View Definition*) che contiene le istruzioni informatiche per organizzare i file IFC secondo le definizioni previste.

L'organizzazione dei dati avviene secondo un ordine gerarchico suddividendo le *entità* (o *istanze*) dei componenti in base al *tipo*, fino a rintracciare la *superclasse* di appartenenza, procedendo dal particolare al generale e viceversa. Nello specifico, i componenti tecnologici di un manufatto edilizio rappresentano le *superclassi* di un modello BIM (porte, finestre, travi, pilastri, etc.), scisse in *classi* in base alle caratteristiche tipologiche che presentano (porta rettangolare, porta centinata, porta timpanata, etc.). Un'ulteriore suddivisione in *tipi* consente di delineare maggiori specifiche per il componente (ad esempio, per le dimensioni, la descrizione o il materiale), mantenendo inalterata la struttura morfologica (porta rettangolare A, porta rettangolare B, porta rettangolare C, etc.). Infine, tutti gli oggetti digitali disposti nello spazio virtuale per costruire il modello BIM sono univocamente determinati e classificati come *entità*. L'insieme delle diverse *entità*, *tipi*, *classi* e *superclassi* definiscono il complesso sistema edificio virtuale.

Questa organizzazione gerarchica si riflette anche nella caratterizzazione dei parametri associati agli *smart-objects*, che, a loro volta, possono riguardare le modifiche dell'*entità* – interessano il singolo oggetto del modello e definiscono attributi specifici (ad esempio, il numero identificativo) – o del *tipo* – gestiscono contestualmente le variazioni di tutte le *entità* che appartengono al medesimo *tipo* –. La gestione parametrica, prescindendo dalla caratterizzazione come *tipo* o *entità*, consente di conformare un numero illimitato di oggetti appartenenti alla stessa *classe*, semplicemente variando le informazioni nei parametri associati. Ma alcune modifiche, ad esempio quelle geometriche per mutamenti della forma, per essere gestite impongono la creazione di una nuova *classe*.

Sono invece esclusi dalla parametrizzazione i vincoli relazioni che sussistono tra le diverse *superclassi*, perché dipendenti dalle caratteristiche funzionali dei componenti tecnologici reali: una finestra non potrà mai essere collocata su un oggetto diverso dal muro. Questo automatismo relazionale – che può essere riscontrato anche in altri elementi come pilastri, travi, solai, porte, etc. –, viene però a mancare quando si realizzano

elementi non previsti (volte, capitelli, paraste, elementi decorativi, etc.), con ripercussioni, a volte rilevanti, sulla struttura del modello stesso e sull'interoperabilità. La mancata categorizzazione – o l'inserimento nella *superclasse* che meglio ne simula il comportamento reale (ad esempio, le volte incluse nei solai) –, infatti, comporta che l'oggetto non viene correttamente descritto e interpretato nelle fasi di esportazione/importazione nel formato IFC; di conseguenza, si avranno delle incoerenze e perdite, totali o parziali, delle informazioni.

È indubbio che le difficoltà operative nell'applicazione del BIM al patrimonio storico-architettonico sono solo in parte attribuibili alle piattaforme utilizzate. In realtà, molteplici sono le implicazioni teoriche che concorrono a rendere complessa la strutturazione topologica e semantica dei modelli H-BIM: dalla diversa organizzazione gerarchica, all'assenza di *standard* dettagliati, fino alla complessa individuazione di ontologie specifiche<sup>55</sup> riguardanti gli elementi del costruito.

Diversamente dagli edifici contemporanei e di nuova realizzazione, in quelli storici la definizione delle componenti tecnologiche non è mai scontata, ma risulta fortemente permeata dalla soggettività e dall'esperienza dell'operatore che ne esegue il processo, oltre che dalla multi-disciplinarietà delle analisi condotte<sup>56</sup>. Per tali motivi, negli ultimi anni, le ricerche di settore (Quattrini et al., 2017) si sono interessate alla

---

<sup>55</sup> Aspetto che interessa anche i processi *Scan-to-BIM*, poiché, oltre alle problematiche già palesate nel punto precedente, si riscontrano difficoltà nella creazione di algoritmi che riescano a gestire correttamente l'individuazione degli elementi su basi critico-conoscitive.

<sup>56</sup> È noto che gli specialisti che operano nel settore AECO, e in particolare nell'ambito del patrimonio costruito, vedono e scompongono il sistema edificio in modalità differenti. Un caso esemplificativo può essere considerata la colonna e le sue parti, per le quali, ad esempio, uno strutturista concepisce la sequenza piedistallo – base – fusto – capitello in relazione alla funzione portante dell'elemento, piuttosto che su quella figurativa legata allo storico, o dei rapporti-geometrici proporzionali che potrebbero caratterizzare le analisi di un rilevatore/rappresentatore.

creazione di piattaforme *web* e applicazioni *desktop* per l'arricchimento semantico dei modelli H-BIM, al fine di implementare gli attuali strumenti e superare le limitazioni imposte. Con la definizione di protocolli di strutturazione ontologica, basati su vocabolari e tesauri riconosciuti a livello internazionale<sup>57</sup> – ad esempio, l'*Art & Architecture Thesaurus* (AAT)<sup>58</sup> del *Getty Research Institute* o l'ICOM CIDOC CRM *Conceptual Reference Model*<sup>59</sup> – viene generalmente gestita l'individuazione univoca degli elementi e l'implementazione semantica del modello.

Tra le diverse ricerche condotte, il progetto INCEPTION (*Inclusive Cultural Heritage in Europe through 3D semantic modelling*)<sup>60</sup> rappresenta una delle esperienze più significative nell'ambito del *web semantico*, affrontando i molteplici aspetti connessi alla conoscenza, valorizzazione e conservazione dei manufatti architettonici. Mossa dagli obiettivi di implementazione dei metadati associati al modello e dell'interoperabilità tra gli attori del processo AECO, INCEPTION è una piattaforma integrata basata sull'*openBIM – input* principale – in cui è possibile far confluire le informazioni inerenti il manufatto (fig. 2.10). Non è solo un *repository*, ma rappresenta un vero e proprio strumento per lo scambio interattivo bidirezionale dei dati, fruibile anche attraverso applicazioni *user-friendly* in realtà aumentata e virtuale (Maietti et al., 2019).

---

<sup>57</sup> In ambito nazionale, invece, l'Istituto Centrale per la Catalogazione e Documentazione (ICCD) si interessa di individuare adeguate procedure metodologiche per la catalogazione, attraverso modalità descrittive condivise, del patrimonio archeologico, architettonico, storico artistico, etnoantropologico, scientifico e tecnologico.  
<http://www.iccd.beniculturali.it/>

<sup>58</sup> <https://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/>  
È un *database* interrogabile di termini d'arte, architettura e cultura materiale; le definizioni e i concetti associati alle diverse parole sono esplicitati attraverso descrizioni e citazioni bibliografiche.

<sup>59</sup> <http://www.cidoc-crm.org/>  
Fornisce le ontologie formali per la comprensione condivisa delle informazioni inerenti il patrimonio culturale.

<sup>60</sup> <https://www.inception-project.eu/en>

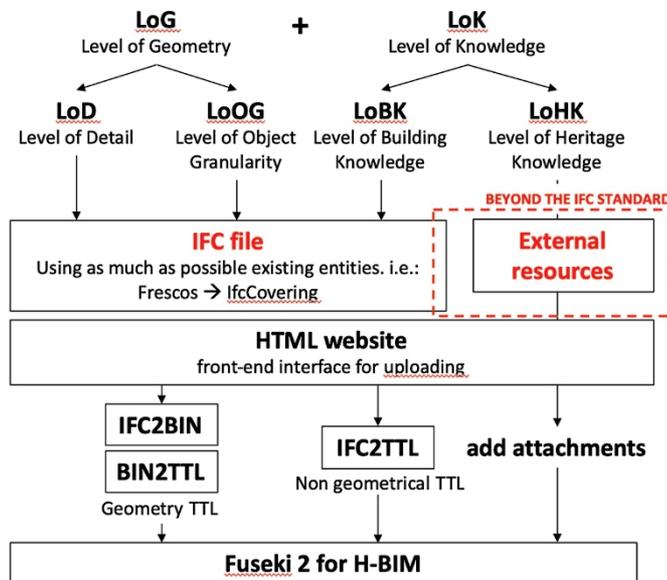


Fig. 2.10 – Piattaforma INCEPTION: modalità di aggregazione dei diversi dati, geometrici e non, e costruzione del *database* informativo relativo al manufatto indagato.

Fonte: Maietti et al., 2019

### 2.3 Requisiti minimi e trasparenza delle informazioni nei modelli *Heritage* - BIM

Le scelte di *modellizzazione* per la costruzione degli *smart-objects* dipendono dal livello di dettaglio a cui si vuole tendere, oltre che dagli obiettivi prefissati (Fai e Rafeiro, 2014). Questi sono espressi all'interno del *Capitolato Informativo* (CI, UNI 11337:2017) – *Employer Information Requirements* (EIR)<sup>61</sup> nella normativa inglese (PAS 1192:2013) –, dove

<sup>61</sup> Conseguenza diretta del EIR è il BEP (*BIM Execution Plan*, PAS 1192:2013), distinto in *pre* e *post-contract* in base alla fase della gara d'appalto a cui fa riferimento – proposta di offerta (*pre*) o assegnazione del lavoro (*post*) –. Nel BEP vengono dettagliate le attività del processo BIM in coerenza con quanto stabilito nel EIR e rappresenta un vero e proprio vincolo contrattuale tra appaltatore/progettista e committente. Analogamente, la normativa italiana in riscontro al BEP introduce l'oGI (*offerta per la Gestione Informativa*) e il pGI (*piano per la Gestione Informativa*), che saranno, quindi, esplicitivi del CI.

vengono specificate le esigenze e i requisiti informativi, geometrici e non, che le diverse componenti dovranno rispettare per caratterizzare correttamente e coerentemente il modello BIM<sup>62</sup>. Non sempre, infatti, si rende necessario ottenere un elevato dettaglio geometrico, ma vengono ritenuti sufficienti i metadati associati a forme semplificate per la definizione dell'oggetto digitale (Rodríguez-Moreno et al., 2016). Si perviene, in tal modo, ad un modello non appesantito da informazioni superflue e senza ripercussioni negative sulla gestione dello stesso e sul *framework* di progetto (Centofanti et al., 2016).

In tal senso, il progetto INNOVance<sup>63</sup> si è posto l'obiettivo di migliorare le attività della filiera AECO guardando, da un lato, alla strutturazione del contenuto informativo e, dall'altro, alle modalità di trasmissione dello stesso. La costruzione del modello e del *database* associato segue logiche ben determinate legate all'affidabilità e all'uso delle informazioni, al fine di limitare le incomprensioni e gli errori derivanti da un'errata condivisione delle stesse. Nell'ottica della trasparenza, quindi, ogni oggetto viene descritto in modo univoco in base alle caratteristiche che presenta (categoria, tipologia, riferimento normativo, caratteristiche prestazionali, caratteristiche geometriche, caratteristiche dimensionali, caratteristiche chimico-fisiche) e al livello di dettaglio 2D e 3D. Per la condivisione, invece, è stata strutturata un prototipo di piattaforma *web open*, ovvero una

---

<sup>62</sup> Le informazioni presenti nel CI non si limitano alla sola costruzione del modello BIM, ma riguardano tutto il *workflow* operativo, dagli aspetti tecnici a quelli contrattuali, fino alla definizione degli usi per i quali il modello viene predisposto. Quindi, il CI non solo chiarisce obiettivi da raggiungere e regole da rispettare, ma pianifica il lavoro secondo procedure collaborative e di condivisione dei dati. Quest'ultimo aspetto, in particolare, viene gestito attraverso l'ACDat (*ambiente di condivisione dati*) e l'ACDoc (*archivio di condivisione documenti*) introdotti dalla normativa italiana in risposta al CDE (*Common Data Environment*) inglese. Si tratta di piattaforme dedicate (*BIM360, usBIM Platform, STR Vision Teamwork Suite CDE, BIMX*, etc.) per la raccolta, la gestione e la condivisione dei dati in modo efficace ed efficiente, in cui vengono definite le azioni, i permessi e gli intervalli temporali per ogni membro collegato.

<sup>63</sup> Programma di Innovazione Industriale finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico nell'ambito di Industria 2015.  
<http://innovance.it/it/>

vera e propria libreria di oggetti digitali, contenente informazioni non solo di natura tecnica, ma anche scientifica, economica, legale, etc., migliorando in tal modo l'interoperabilità tra i diversi specialisti che intervengono nel processo edilizio (Pavan et al., 2014).

Le questioni pocanzi citate, assumono un ruolo ancora più rilevante se relate alla quantità e all'eterogeneità che caratterizza i metadati attribuibili ad un modello BIM del patrimonio storico-architettonico. A ciò si aggiunge la necessità di individuare approcci metodologici che consentano di determinare procedure preliminari di catalogazione, codifica e archiviazione per limitare la presenza di errori o la nascita di incomprensioni nel dominio informativo costituente il modello H-BIM.

Dal punto di vista normativo, al fine di valutare l'affidabilità e l'accuratezza del *database* associato agli *smart-objects* – in rispetto anche di quanto prescritto all'interno del CI – sono state individuate delle *metriche*<sup>64</sup> di riferimento nazionali e internazionali (fig. 2.11), che nel corso degli anni si sono evolute sempre più, mutando spesso il proprio significato o l'acronimo che li caratterizza.

### 2.3.1 Evoluzione normativa e concettuale: dai LOD ai LOIN

Introdotti nel 2004 come MPS (*Model Progression Specification*)<sup>65</sup>, i LOD (*Level of Development*)<sup>66</sup> – definiti dall'AIA (*American Institute of Architects*) nel

---

<sup>64</sup> Delineate con scale di valore crescenti in funzione del livello di dettaglio espresso dalla rappresentazione geometrica e dal contenuto associato ai metadati.

<sup>65</sup> Al fine di gestire l'implementazione graduale dei dati – geometria, costi e tempo –, la *Vico Software* (ad oggi è incorporata nella *Trimble*) delinea questo strumento per organizzare il livello di maturità informativa del modello BIM attraverso un piano contenente le istruzioni per la costruzione di contenuti coerenti alle diverse fasi che caratterizzano il progetto architettonico.

<sup>66</sup> Da non confondere con i *Level of Detail* – presentano lo stesso acronimo LOD –, che, invece, sono legati al grado di semplificazione grafica necessaria per gestire la computazione di forme complesse e articolate in *computer grafica* (ad esempio, per la realizzazione di render in *real time*, o per la progettazione di fruizioni virtuali). Per cui,

2008 e revisionati nel 2013<sup>67</sup> –, sviluppano ulteriormente il concetto regolamentando le fasi di costruzione del modello per *step*, in analogia con quelle della progettazione edilizia, attraverso una scala di valori progressiva che dal *concept* (LOD 100) conduce all'*as built* del manufatto (LOD 500): per ogni intervallo – 5 in totale (100, 200, 300, 400, 500)<sup>68</sup> –, sono individuati i requisiti minimi da rispettare in termini quantitativi e qualitativi.

Sorvolando sulle differenze presenti nelle specifiche tecniche dei livelli, è interessante notare come nel documento dell'AIA del 2013 siano state introdotte due importanti novità. La prima, è legata alla definizione dell'oggetto a cui riferire il LOD: nella consapevolezza che non tutti i componenti del modello debbano essere caratterizzati in egual modo, si arriva alla decisione che il LOD non può essere riferito al *model* (AIA Document E202™ – 2008), ma va attribuito al *model element* (AIA Document G202™ – 2013). La seconda, invece, è dipendente all'eterogeneità delle informazioni che connotano gli *smart-objects*: il documento introduce, nella descrizione testuale del livello, la suddivisione in proprietà geometriche e non geometriche, relazionando le prime alle caratteristiche grafiche dell'elemento. Quest'ultima, in particolare, sarà ripresa dalla normativa inglese<sup>69</sup> formalizzando la differenza con i due acronimi LOD (*Level of Model Detail*)<sup>70</sup> e LOI (*Level of Model Information*), che diventeranno lo spunto per le normative redatte in altri Paesi.

---

sono da intendersi come misura del numero di segni grafici necessari per veicolare il dato della sola rappresentazione (Garagnani, 2016).

<sup>67</sup> AIA Document E202™ – 2008, *Building Information Modeling Protocol Exhibit* e AIA Document G202™ – 2013, *Project Building Information Modeling Protocol Form*.

<sup>68</sup> Un livello intermedio, LOD350, viene introdotto nel 2011 da BIMForum con il *Level of Development Specification*.

<sup>69</sup> Aggiunge altri due livelli LOD, per un totale di 7, che vengono categorizzati come LOD1 – *brief*, LOD2 – *concept*, LOD3 – *developed design*, LOD4 – *production*, LOD5 – *installation*, LOD6 – *as built* e LOD7 – *in use*.

<sup>70</sup> Va precisato, però, che la specifica sulla geometria era stata già introdotta nel 2009 dall'AEC (UK) con i *graphic detail* o *grade* (G0, G1, G2, G3).

## MODELLI INFORMATIZZATI PER LA RAPPRESENTAZIONE DIGITALE 3D DEL PATRIMONIO COSTRUITO

### Questioni teoriche e criticità applicative nei modelli *Heritage* - BIM

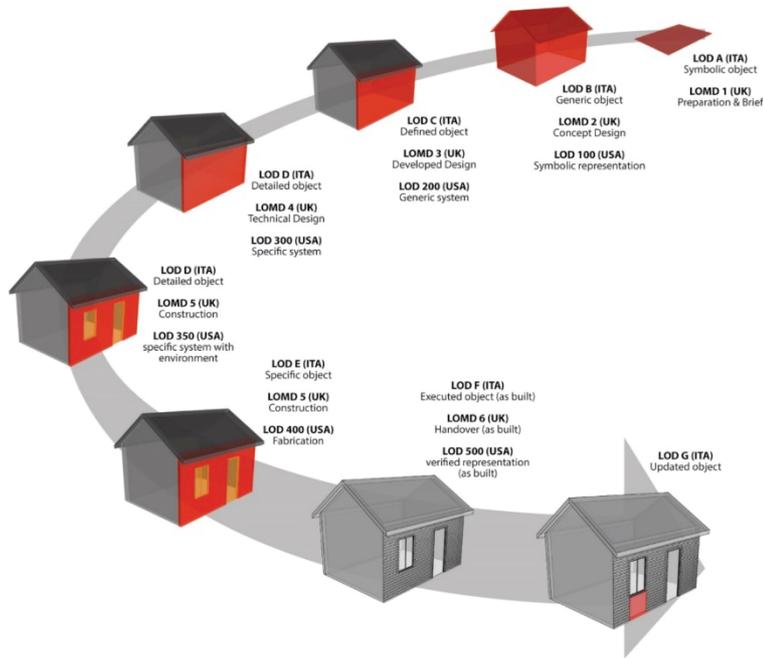


Fig. 2.11 – Le classificazioni LOD nazionali e internazionali: confronto dei requisiti grafici e informativi previsti dalla normativa italiana, americana e inglese.

Fonte: Carnevali et al., 2019

Al fine di fornire un supporto tecnico-organizzativo per la gestione manageriale del progetto, le direttive dell'AIA introducono il MET (*Model Element Table*) – ulteriormente implementato da *BIMForum* –, un foglio di calcolo aperto, per cui personalizzabile rispetto a situazioni specifiche, in cui i componenti del modello sono rapportati sia alle diverse fasi di lavorazione, sia agli attributi da associare.

Le fasi consentono l'organizzazione delle attività operative, per flussi tradizionali di progetto (*Standard Milestones*) e per processi di lavorazione (*Project Milestones*), specificando il LOD richiesto per il componente, la figura incaricata di eseguire il lavoro (MEA, *Model Element Author*) e le eventuali note aggiuntive. Gli attributi, invece, sono suddivisi in funzione dei requisiti minimi che gli *smart-objects* devono possedere (*Baseline*) e di quelli eventualmente da integrare (*Additional*).

Anche l'attuale normativa italiana (UNI 11337:2017) intende il LOD come connubio degli attributi geometrici LOG (*Level of Geometry*) e degli attributi informativi LOI, ma, a differenza delle altre normative, è la prima ad introdurre dei livelli di riferimento per gli edifici storici e una scala di valori codificata con lettere<sup>71</sup> da integrare con numeri (da 1 a 9), per impostare *step* intermedi, laddove le necessità di progetto lo richiedano. Nello specifico, gli ultimi due livelli F e G sono destinati a caratterizzare, rispettivamente, lo stato di fatto del manufatto e un eventuale aggiornamento del modello in conseguenza ad interventi di manutenzione, restauro, consolidamento, etc.

È indubbio che, soprattutto in riferimento al patrimonio storico-architettonico, non sempre è possibile attribuire un LOG e LOI univoco agli elementi del modello, viste le implicazioni che incorrono nella definizione geometrica e degli attributi necessari per la caratterizzazione informativa degli *smart-objects*. In parte, ciò è riscontrabile anche nella progettazione *ex-novo* dove, proprio nelle preliminari fasi concettuali, non è scontato che si abbia un pari livello geometrico e informativo. Risulta chiaro, quindi, che la *modellizzazione* dei diversi componenti è fortemente dipendente dagli usi del modello e dagli obiettivi prefissati.

Per cui, a livello normativo, si sta assistendo ad una svolta nel concetto di LOD e con la ISO 19650:2019<sup>72</sup> viene introdotto il LOIN (*Level of Information Need*), che consolida le componenti LOG e LOI, ma vi aggiunge il LOC (*Level of Documentation*) (fig. 2.12). La definizione del LOIN viene rapportata esplicitamente allo scopo del modello, dando la possibilità di utilizzare scale diverse per il LOG, LOI e LOC purché siano complementari nella definizione del livello di dettaglio richiesto.

---

<sup>71</sup> La scala di valori LOD nella normativa italiana prevede: LOD A – *oggetto simbolico*, LOD B – *oggetto generico*, LOD C – *oggetto definito*, LOD D – *oggetto dettagliato*, LOD E – *oggetto specifico*, LOD F – *oggetto eseguito* e LOD G – *oggetto aggiornato*.

<sup>72</sup> UNI EN ISO 19650:2019 - *Organization of information about construction works – Information management using building information modelling*. Attualmente, sono state pubblicate la Parte 1 – *Concepts and Principles* e la Parte 2 – *Delivery phase of the assets*.



Fig. 2.12 – Struttura formale posta alla base della definizione dei *Level of Information Need* (LOIN).

Fonte: Pavan et al., 2020

### 2.3.2 Le molteplici estensioni dei requisiti informativi: *Level of X*

Nonostante lo sforzo condotto dalla normativa italiana, è tutt'ora complesso applicare la classificazione LOD/LOIN al patrimonio storico-architettonico poiché le definizioni date ai vari livelli, ideate per le nuove costruzioni e adattate agli edifici esistenti, risultano ancora troppo rigide. Di conseguenza, ulteriori riflessioni nel concetto di requisito informativo si sono delineate nel tempo, in ambito accademico e non, al fine di quantificare e qualificare le informazioni inserite in un modello H-BIM (Bolpagni, 2016).

Le diverse estensioni, genericamente indicate con l'acronimo LO $x$  (*Level of X*)<sup>73</sup>, specificano la variabile  $x$  in funzione dell'aspetto su cui focalizzano l'attenzione.

Una prima classificazione, ad esempio, riguarda il LOA (*Level of Accuracy*)<sup>74</sup>, ovvero la differenza che sussiste tra l'accuratezza di un rilievo *reality-based*

<sup>73</sup> *Level of X is a generic term referring to all varieties of modelling specifications similar to Level of Development, Level of Definition, Level of Detail, and Level of Accuracy. Level of X (LoX) is not a real index but a collective reference to all current and future variations of the above.* (BIM dictionary) <https://bimdictionary.com/en/level-of-x/1>

<sup>74</sup> Le linee guida dell'USIBD (US *Institute of Building Documentation*) – attualmente alla terza versione – forniscono un *framework* per supportare i professionisti AECO e propongono il LOA per certificare il livello di accuratezza e i mezzi impiegati nella documentazione

e il modello H-BIM derivato da esso; definisce, di fatto, quanto si discosta la rappresentazione digitale tridimensionale dal manufatto reale. Brumana et al., 2019, derivano dal LOA il GOA (*Grade of Accuracy*), introducendo nella valutazione dell'accuratezza la tolleranza dimensionale e l'errore di graficismo, fattori influenzati dalla scala di rappresentazione virtuale scelta, dagli obiettivi del rilievo e della modellazione, dalle caratteristiche morfogeometriche degli elementi che caratterizzano il manufatto e dallo stato di conservazione in cui versa.

Tolmer et al., 2017, invece, associano all'acronimo LOA il concetto di *Level of Abstraction* relazionando la sua definizione alla necessaria semplificazione da introdurre nella modellazione della realtà costruita, che, anche in questo caso, è dipendente dagli usi del modello e dai requisiti che deve soddisfare. Alla rispondenza geometria e ontologica degli *smart-objects* guarda il LOR (*Level of Reliability*), espresso mediante scala numerica (*range* valori di riferimento 0 - 10) e cromatica semplificata (tre tonalità per indicare un livello basso, medio, alto di affidabilità dell'informazione) (Bianchini e Nicastro, 2018). Maiezza, 2019, amplia tale concetto definendo il LOR come sinergia tra il LOA, inteso come precisione geometrica, e il LOQ (*Level of Quality*) che guarda al contenuto informativo. Nello specifico, il LOA viene desunto in base alla deviazione tra la nuvola di punti e gli elementi del modello, relazionando la quantità di superficie (in percentuale) a determinati *range* di valori metrici al fine di stabilire un livello basso, medio, alto dell'informazione. Il LOQ, invece, è dipendente dalla tipologia di fonte (indiretta, primaria e diretta) da cui sono desunti gli attributi dei componenti.

LOA, GOA, LOR, LOQ, sono solo alcuni degli acronimi pensati per sintetizzare la qualità e la quantità degli attributi del modello H-BIM al fine di determinarne l'affidabilità e la rispondenza rispetto al manufatto reale. Il ricorso a tali *metriche* di valutazione – sono proposte e non sono norme

---

degli edifici costruiti. Operativamente, sono stati ideati un apposito foglio di calcolo e una piattaforma *on-line*.

– si riflette sulla necessità di garantire un’adeguata trasparenza delle informazioni – aspetto a cui tutte implicitamente rimandano –, comportando specifiche riflessioni sulle modalità di costruzione ed esplicitazione della scala valutativa. Nel modello, esemplificazione del processo logico sotteso all’interpretazione e alla sintesi critica dei dati, viene in tal modo chiarificato il grado di soggettività dell’operatore, oltre che l’affidabilità delle informazioni e il livello di astrazione resosi necessario.

È auspicabile, dunque, in un sistema multidisciplinare interconnesso – come quello rappresentato dalla metodologia BIM – pervenire a codifiche e *standard* di riferimento condivisi, non solo in ambito accademico ma anche normativo, al fine di limitare l’ambiguità che spesso caratterizza le scelte di gestione e rappresentazione del patrimonio storico-architettonico.



CAPITOLO TERZO

**COMUNICAZIONE E VISUAL DESIGN  
PER IL PATRIMONIO COSTRUITO**

**Tecniche per la visualizzazione *Extended-Reality*  
e la fruizione multimodale e interattiva**

Conoscenza, documentazione e comunicazione sono solo alcuni degli aspetti che riguardano l'applicazione delle ICT (*Information and Communications Technology*), del *visual design* e della *computer graphic and animation* al patrimonio storico-architettonico. Dalla digitalizzazione attraverso sistemi tridimensionali e nuvole di punti, alla fruizione in ambienti digitali con sistemi di realtà virtuale, l'intero processo di conoscenza, ri-presentazione e divulgazione del patrimonio costruito è permeato dall'utilizzo delle nuove tecnologie. È indubbio, infatti, che se da un lato tali tecnologie agevolino le attività di indagine, consentendo di costruire banche dati sempre più esaustive del manufatto in oggetto, dall'altro l'applicazione di nuove forme di comunicazione rende i beni presenti sul territorio maggiormente accessibili e fruibili, secondo modalità alternative e navigazioni multimodali.

Si aprono, dunque, scenari di ricerca dove ampio spazio viene dato alla visualizzazione *Extended-Reality* che, attraverso le tecniche e le tecnologie di cui si compone, delinea nuove relazioni tra l'ambiente reale e quello digitale, stravolgendo il tradizionale rapporto tra l'opera d'arte e il fruitore. Non più una relazione statica e passiva, ma, al contrario, dinamica e interattiva, con esperienze multisensoriali a diretto contatto con l'oggetto virtualizzato.

Diversi sono gli scopi che spingono le sperimentazioni verso quest'ambito applicativo e che spaziano dalla creazione di *storytelling* del manufatto in oggetto, al superamento di barriere – architettoniche e non – che ne limitano la fruizione e alla disseminazione di contenuti, talvolta altamente tecnici ma semplificati in funzione della comprensione anche per i non esperti del settore. Sono innegabili, dunque, le potenzialità di comunicazione e rivitalizzazione del patrimonio storico-architettonico insite nei progetti *Extended-Reality*, che, sebbene siano spesso legati ad aspetti ludici e dell'*entertainment*, ne mettono in risalto le qualità e le specifiche caratteristiche.

È uso comune raggruppare nel termine virtuale tutto ciò che concerne le rappresentazioni o i contenuti digitali, ma il concetto di *Virtual Heritage* va ben oltre, con rimandi alle più opportune forme di comunicazione dello stesso e, dunque, anche alle fruizioni *Extended-Reality*. Va, infatti, precisato che esiste una profonda differenza tra la digitalizzazione del patrimonio storico-architettonico e la sua virtualizzazione, sia nelle finalità che muovono le relative sperimentazioni, che nelle metodologie e negli strumenti adoperati. A ciò si aggiunge l'ampio campo applicativo in cui si muove l'*Extended-Reality*, con soluzioni fortemente diversificate nel mettere in relazione ambienti reali e virtuali, e nel gestire l'interazione tra fruitore e oggetto, come mostrano gli esiti riportati dalle ricerche di settore. È quindi necessario definire con chiarezza i limiti entro cui si muove il *Virtual Heritage*, sia per le metodologie che per le tecnologie adoperate nella strutturazione del progetto di comunicazione, al fine di comprenderne potenzialità e criticità della sua applicazione.

### 3.1 Dal *Reality-Virtuality Continuum* all' *Extended-Reality*

L' *Extended-Reality* (XR), definito come l'insieme delle combinazioni – o delle contaminazioni – di ambienti reali con quelli virtuali e delle interazioni uomo-macchina (Mann et al., 2018; Rubio Tamayo, 2019), è un concetto alquanto ampio e generico<sup>75</sup> che non fa riferimento né ad un'unica tecnologia né al solo campo dei Beni Culturali. Presenta, infatti, applicazioni diversificate in funzione degli obiettivi e degli strumenti utilizzati, con soluzioni consolidate in vari settori (industriale, *interior design*, medico, *marketing*, istruzione, aviazione, militare etc.) (Andrews et al., 2019; Fast Berglund et al., 2018; Freina e Ott, 2015).

In analogia con il *continuum* (fig. 3.1) proposto da Paul Milgram e Fumio Kishino nel 1994 – *Reality-Virtuality Continuum* (Milgram e Kishino, 1994) –, del quale rappresenta la diretta evoluzione, l'XR descrive l'insieme delle

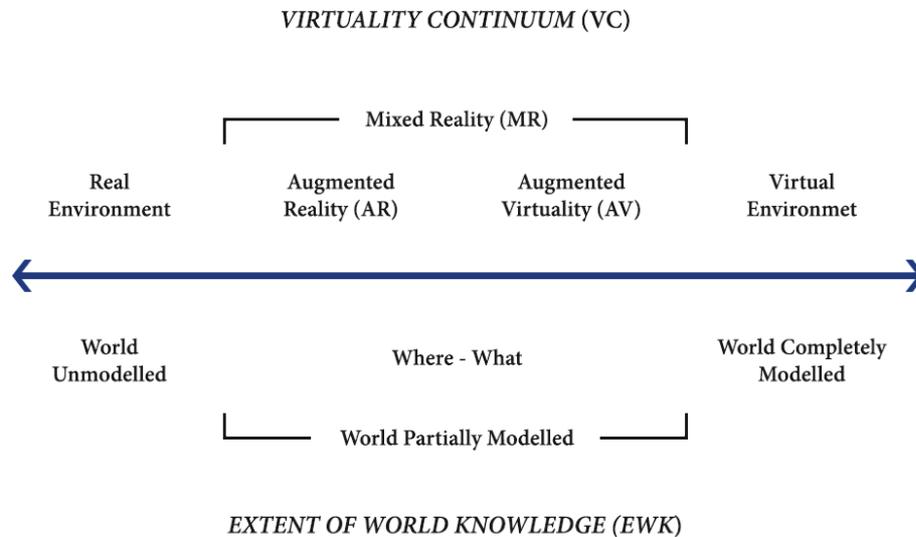


Fig. 3.1 – Rappresentazione del *continuum* proposto da Paul Milgram e Fumio Kishino in relazione alla EWK, ovvero alla *conoscenza* che il dispositivo di visualizzazione e/o elaborazione possiede su ciò che si sta visualizzando (*what*) e sulla sua collocazione (*where*) – *conoscenza* nulla all'estremo sinistro, massima all'estremo opposto –.

Elaborazione M. Pulcrano

<sup>75</sup> La *X* di *Extended-Reality*, infatti, è intesa come variabile che può assumere molteplici significati in base al tipo di fruizione che si progetta.

realtà simulate, in una continua transizione dal mondo reale a quello virtuale – *Virtual Environment* (VE) o *Virtual Reality* (VR) (Cfr. par. 3.2.3) – e viceversa. Da un lato, quindi, la realtà che circonda l'utente, con cui interagisce senza strutture codificate o percorsi stabiliti aprioristicamente, e senza strumenti che ne filtrano le relazioni. Dall'altro, invece, una realtà interamente digitale, costruita con modelli tridimensionali che simulano caratteristiche e comportamenti dell'ambiente reale che ri-presentano, al fine di replicarne con un elevato grado di fedeltà gli aspetti qualitativi e quantitativi. Nel mezzo vengono individuate le forme di fruizione miste – *Mixed Reality* (MR) – che ibridano i due ambienti attraverso la definizione delle interazioni spaziali e relazionali tra oggetti reali e virtuali. Le modalità con cui tali interazioni avvengono, sono pressoché illimitate e, conseguentemente, la MR assume molteplici sfaccettature dipendenti dalle impostazioni del progetto di fruizione, ma anche dagli obiettivi prefissati. In generale, però, poiché la MR si colloca nel mezzo del *continuum*, vengono distinte due macro-categorie che consentono di individuare il tipo di esperienza in funzione se la stessa converge verso l'ambiente reale o, contrariamente, verso quello virtuale. Nel primo caso, si delineano le fruizioni *Augmented Reality* (AR) (Cfr. par. 3.2.1) dove il virtuale si sovrappone al reale, nel secondo caso avremo la *Augmented Virtuality* (AV) (Cfr. par. 3.2.2) in cui il reale integra il virtuale<sup>76</sup>.

---

<sup>76</sup> La definizione associata alla MR non è univoca e spesso si tende a farla coincidere con la sola AV perché, nell'ottica di una realtà mista – virtuale e aumentata –, appare la tecnica che maggiormente ne rispecchia il campo applicativo. Ma se guardiamo al concetto più generale espresso da Paul Milgram e Fumio Kishino, dove la MR integra gli elementi del mondo reale con prodotti digitali derivati della *computer graphic – the most straightforward way to view a Mixed Reality environment, therefore, is one in which real world and virtual world objects are presented together within a single display, that is, anywhere between the extrema of the virtuality continuum* (Milgram e Kishino, 1994, p. 3) –, appare evidente che sia la AV che la AR risultano in linea con i principi teorici e, per tanto, possono essere considerate entrambe come forme di MR. Tale assunzione deriva anche dalla consapevolezza che, essendo il campo delle fruizioni in divenire con continue sperimentazioni metodologiche e tecnologiche, si potrebbe arrivare ad un punto in cui non sarà più possibile distinguere in modo così netto i prodotti della AR e della AV, ma ciò non andrebbe ad influire sull'interpretazione concettuale data alla MR – *of course, as technology progresses, it may*

Sebbene, quindi, concettualmente siano presenti da tempo, la formalizzazione delle fruizioni XR è relativamente recente, come mostrano le ricerche condotte nel settore che ricorrono al concetto per identificare un ambito generale che comprende tanto l'ambiente reale quanto la MR e la VR. Infatti, diversamente dal *continuum* di Paul Milgram e Fumio Kishino dove è leggibile una netta distinzione tra i diversi ambienti, l'XR rappresenta qualsiasi estensione della realtà, sia grafica che informativa, ottenuta aggiungendo al progetto di comunicazione nuovi elementi o, più semplicemente, ampliando quelli già esistenti, senza distinzione nelle modalità di fruizione degli stessi. Inoltre, non guarda solo all'aspetto visuale, ma, grazie allo sviluppo di strumenti dedicati, particolare attenzione è posta anche a quelli uditivi e tattili al fine realizzare esperienze multisensoriali.

Da qui, si evince una prima grande differenza con le applicazioni di pura digitalizzazione del patrimonio costruito – *Digital Heritage* –, dove l'obiettivo primario non è legato alle modalità di fruizione delle informazioni inerenti il manufatto, bensì alla mera trascrizione delle stesse su appositi supporti informatici, ovvero la replica in digitale di quanto già presente in analogico o nel reale. Questo processo viene distinto in *nativo* o *surrogato* (Rahaman e Tan, 2011) a seconda se l'oggetto rappresentato – sotto forma di elemento bidimensionale (testo, immagine, etc.) o tridimensionale – sia stato interessato da processi di conversione in formato digitale<sup>77</sup>.

---

*eventually become less straightforward to perceive whether the primary world being experienced is in fact predominantly "real" or predominantly "virtual", which may ultimately weaken the case for use of both AR and AV terms, but should not affect the validity of the more general MR term to cover the "grey area" in the centre of the virtuality continuum (Milgram e Kishino, 1994, p. 4) –*

<sup>77</sup> Un esempio di digitalizzazione *nativa* è da considerare la stessa nuvola di punti ottenuta dalle acquisizioni *reality-based*, poiché, di fatto, consente di trasporre in digitale il manufatto reale, ma ulteriori fasi di interpretazione e operazioni di *post-processing* si rendono necessarie affinché il dato rilevato che rappresenta sia fruibile attraverso forme di comunicazione adeguate. Mentre la trascrizione di antichi manufatti, ad esempio, non consultabili a causa del loro pregio e rarità, rappresentano una forma di digitalizzazione

È chiaro che, la gestione delle impostazioni del progetto di comunicazione e delle modalità con cui viene eseguito è legata agli obiettivi prefissati e al diverso grado di *immersività*, *interattività* e *multisensorialità* che si vuole rendere nella fruizione del *Virtual Heritage*. Non sempre, infatti, è possibile garantire la rispondenza di tutte le sensazioni in egual misura, poiché – come si vedrà nei paragrafi a seguire e nell'apposita sezione dedicata ai diversi dispositivi<sup>78</sup> – le tecnologie e i supporti da utilizzare rispondono diversamente alle esigenze dell'XR, condizionando di fatto il tipo di coinvolgimento dell'utente.

*Immersività*, *interattività* e *multisensorialità* sono termini che molto spesso vengono utilizzati in maniera indistinta generando molta confusione nell'ambito dell'XR<sup>79</sup>, per cui è importante definire, in prima istanza, il significato a cui essi rimandano.

Per *immersività*<sup>80</sup> si intende la capacità del sistema di indurre nel fruitore l'illusione di essere in una realtà reale sebbene sia collocato in una realtà simulata, ricostruita o, addirittura, di pura fantasia. Le tecnologie *hardware*

---

*surrogata* che ne consente la consultazione senza arrecare danni o pregiudicarne la conservazione nel tempo. È indubbio che, visto il progresso tecnologico e l'influenza dei relativi dispositivi nella vita quotidiana, oggi si è portati alla costruzione di elementi digitali *nativi*.

<sup>78</sup> Tutti gli strumenti necessari per la costruzione ed esecuzione delle fruizioni XR – dispositivi di visualizzazione, dispositivi di *input* e *user interfaces*, sistemi di tracciamento, etc. – saranno approfonditi nell'apposita sezione (Cfr. Appendice).

<sup>79</sup> Analogamente, anche nella definizione terminologica delle diverse tipologie di fruizione (AR, AV, VR), oltre che nei limiti dello specifico campo applicativo, ci sono spesso delle incongruenze – generate anche dall'utilizzo improprio degli acronimi per classificare progetti di fruizione non del tutto coerenti – che alimentano lo stato di confusione generale e i dibattiti riguardanti il settore dell'XR.

<sup>80</sup> *Spatial immersion into virtual reality is a perception of being physically present in a non-physical world. (...) Spatial immersion occurs when a player feels the simulated world is perceptually convincing, it looks "authentic" and "real" and the player feels that he or she actually is "there".* (Freina e Ott, 2015, pp. 133-132)

*Immersion is the illusion of being in the projected world, being surrounded by the image and sound in a way, which makes you believe that you are really there.* (Roussou, 2002, p. 94)

e *software* utilizzate per progettare ed eseguire l'ambiente digitale influiscono sul grado di astrazione del fruitore, isolandolo completamente dal contesto reale in cui è collocato – fruizioni totalmente *immersive* – o limitandone il campo visuale attraverso dispositivi di controllo e supporti dedicati – fruizioni *semi-immersive* e *non immersive* – (fig. 3.2). In particolare, nelle fruizioni *immersive*, venendo a mancare il contatto con l'ambiente reale al contorno, l'utente non ha contezza di trovarsi in un ambiente costruito artificialmente<sup>81</sup>, si sente trasposto in esso, avverte percezioni similmente reali e si genera una condizione psicologica e mentale – sensazione di *presenza*<sup>82</sup> – che lo porta ad attuare comportamenti come se stesse agendo nella realtà reale. Tale sensazione, come è ben noto, è correlata sia alla coerenza dell'ambiente che l'utente sta visualizzando, intesa come rapporto tra le aspettative generate e ciò che avviene realmente, sia alla consapevolezza che la realtà che sta guardando e con cui sta interagendo è mediata da dispositivi di visualizzazione e di *input*. Per cui, maggiore sarà la percezione di coerenza e, al contrario, minore sarà la consapevolezza di mediazione, più elevata sarà la sensazione di *presenza*, partecipazione e immersione nell'ambiente virtuale.

---

<sup>81</sup> Va precisato che la sensazione di astrazione completa, sebbene sia l'obiettivo più ambito delle fruizioni immersive e sia raggiungibile dal punto di vista teorico, è complessa da ottenere poiché richiede processori ad alte prestazioni grafiche – per garantire un'elevata qualità fotorealistica al fine di rendere indistinguibile l'ambiente simulato dalla realtà – e computazionali – per modificare repentinamente la scena in funzione delle azioni del fruitore –.

<sup>82</sup> Rappresenta, in pratica, la percezione naturale di essere collocati in un determinato luogo e tempo. Non è legata a ciò che realmente circonda l'utente, ma ad ambienti, oggetti, avvenimenti, etc. costruiti e/o riprodotti attraverso processi di *computer graphic and animation*. La sensazione di *presenza* è, quindi, dipendente da processi mentali di trasposizione ed è influenzata dal grado di *immersività* che caratterizza la fruizione XR. Se quest'ultima non è totale, l'utente percepisce contemporaneamente l'ambiente reale, in cui fisicamente si trova, e l'ambiente virtuale, mediato dalle tecnologie informatiche e dai dispositivi di visione. In questo caso, si genera la sensazione di *telepresenza*, ovvero una percezione mediata dell'ambiente virtuale di cui si sente parte (Steuer, 1992).

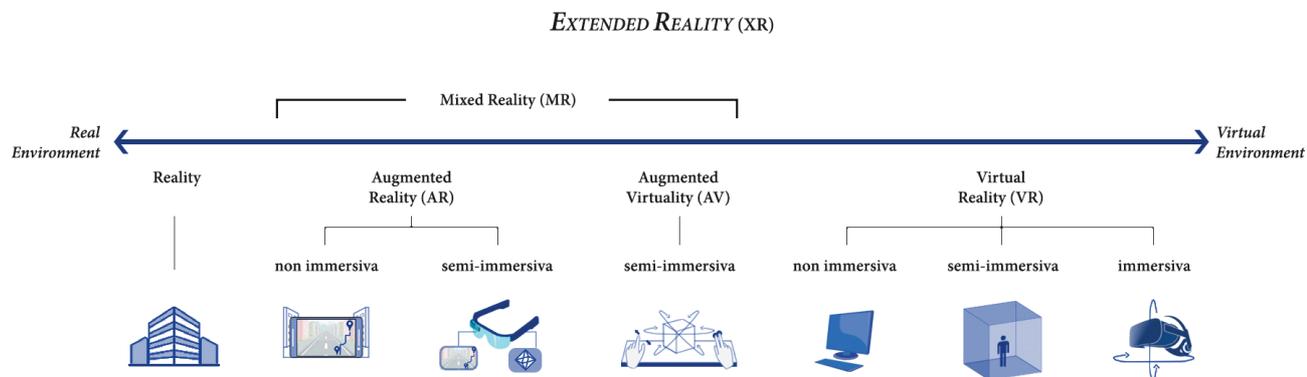


Fig. 3.2 – Schematizzazione delle diverse esperienze di fruizione *Extended-Reality* in relazione al grado di *immersività* che propongono.

Elaborazione M. Pulcrano

L'*interattività*<sup>83</sup>, invece, è legata alla possibilità di interagire col sistema personalizzando le proprie azioni e partecipando attivamente alla fruizione della scena e degli oggetti presenti in essa. Non si è, quindi, semplici spettatori ma dei veri e propri *player*, che ne influenzano lo sviluppo comportando aggiornamenti continui in relazione alle azioni che si compiono. A tal fine è necessario collegare al sistema sia dispositivi di *input*, per prendere e spostare oggetti ad esempio, sia dispositivi di *motion tracking* per mappare i movimenti del *player* all'interno dell'ambiente virtuale. Analogamente all'*immersività*, anche per l'*interattività* esistono diversi gradi, legati non solo al dispositivo utilizzato, ma anche alla progettazione delle modalità di esecuzione della fruizione e ai tempi di risposta del sistema alle azioni del *player*. Quest'ultimo aspetto in particolare influisce sulla percezione di realismo della scena, contribuendo, di conseguenza, a determinare un'elevata sensazione di *presenza* e coinvolgimento per l'utente.

<sup>83</sup> *Interaction refers to the fact that members of the audience are not mere viewers of the realistic scenery, but can actively participate in the program and, through their actions, determine their own experience.* (Roussou, 2002, p. 94)

*Interactivity is the extent to which users can participate in modifying the form and content of a mediated environment in real time. (...) is a stimulus-driven variable, and is determined by the technological structure of the medium.* (Steuer, 1992, p. 84-85)

Infine, con *multisensoriale* viene individuato il progetto di fruizione che coinvolge contemporaneamente più sensi. In generale, le esperienze XR possono essere classificate come 2D – gli *input* per la vista e l’udito sono da considerare di *default* – e 3D, se si associano ai dispositivi di visualizzazione gli strumenti per gli stimoli sensoriali tattili – dispositivi *aptici* –. Mentre il gusto e l’olfatto sono sensi complessi da gestire artificialmente, per cui sebbene il progresso tecnologico prefiguri esperienze XR complete 5D, si è ancora ben lontani dal raggiungimento di risultati soddisfacenti in merito<sup>84</sup>.

### 3.2 Definizione e formalizzazione delle fruizioni *Extended-Reality*

Nonostante le diverse forme di fruizione XR presentino dei tratti in comune, soprattutto per il ricorso a tecnologie e sistemi *hardware/software* simili, le numerose ricerche condotte in tale ambito (Amoruso et al., 2019; Beltramini e Gaiani, 2017; Bolognesi e Aiello, 2019; Clini et al., 2014; Empler 2019; Morandi e Tremari, 2019; Quattrini et al., 2016) mostrano sostanziali differenze negli obiettivi, nelle modalità pratiche di progettazione ed esecuzione, oltre che nella scelta di un tipo fruizione piuttosto che l’altro<sup>85</sup>.

---

<sup>84</sup> Un discorso a parte interessa, invece, l’ambito cinematografico dove si può parlare di proiezioni superiori alla 5D, ottenute associando all’esperienza 2D effetti speciali – ad esempio, eventi atmosferici (pioggia, vento, etc.) o odori nella sala – e strutture predisposte ad *hoc* – le sedute, ad esempio, possono simulare urti, terremoti, montagne russe, etc. –. Una proiezione del genere, però, comporta eccessivi costi nella costruzione di una sala dedicata, nelle attività di manutenzione della stessa e, non ultimo, nella produzione del *film*. Per cui tali esperienze sono spesso destinate a proiezioni di breve durata (cortometraggi) allestite nelle sale dei grandi parchi divertimento.

<sup>85</sup> Non mancano, infatti, esempi di ricostruzioni tridimensionali che, sfruttando immagini panoramiche a 360°, appositi visori, *controller* e *hotspot* informativi, consentono di navigare

### 3.2.1 AR – *Augmented Reality*

Nei progetti di *Augmented Reality* (fig. 3.3), attraverso le tecnologie della *computer graphic* si manipolano e conformano i dati – prevalentemente modelli tridimensionali, ma possono anche essere testi, grafici, immagini fotografiche, video, etc., o una combinazione dei diversi formati – che andranno a sovrapporsi alla realtà, aumentandone il contenuto informativo, reso visibile al fruitore per mezzo di dispositivi *mobile*, visori indossabili e applicazioni (*App*) dedicate. Di base, vi è proprio il principio dell'*overlay* (sovrapposizione) associato alla percezione continua della realtà e all'interazione con oggetti reali e digitali in *real time* (Azuma, 1997). Sebbene nella teorizzazione della AR sia implicito il concetto di addizione informativa, nella pratica applicativa è possibile ottenere anche risultati opposti, mascherando gli elementi individuati come rumore con apposite ricostruzioni digitali dello sfondo e favorendo, al contempo, una migliore comprensione dell'ambiente reale (Carmigniani e Furht, 2011) (fig. 3.4).

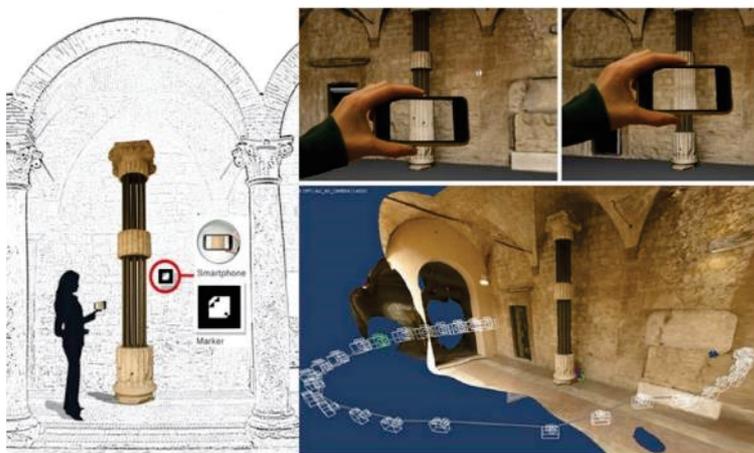


Fig. 3.3 – Progetto di AR per la simulazione della ricostruzione virtuale di una colonna ionica.

Fonte: Ippoliti e Moscati, 2012

nella scena digitale e cogliere dettagli non raggiungibili attraverso le tradizionali tecniche di fruizione (guide, pannelli esplicativi, etc.). E diverse sono le sperimentazioni che, con dispositivi *mobile*, innestano una corrispondenza diretta tra il modello reale, il modello virtuale e le informazioni associate, che vengono rese disponibili al fruitore per mezzo di *tag* e applicazioni specifiche.

La AR, quindi, tende a potenziare la realtà che circonda l'utente arricchendola con dati – e/o sensazioni – non immediatamente percepibili; a tal fine è necessario porre particolare attenzione alla registrazione, ovvero alla corretta sovrapposizione dei contenuti, affinché durante la loro fruizione non si percepiscano errori di allineamento. L'aspetto visuale assume dunque grande rilevanza nelle fruizioni AR. La vista, infatti, è il senso che viene maggiormente coinvolto poiché, come dimostrano le diverse applicazioni, se si relazionano le potenzialità della memoria visuale agli obiettivi di apprendimento, la AR si rivela un ottimo strumento per ampliare la conoscenza dell'oggetto rappresentato<sup>86</sup>. Risulta, infatti, più immediata la comprensione, ad esempio, delle istruzioni di montaggio di un oggetto attraverso immagini e/o video esplicativi visualizzati direttamente sulla parte interessata, piuttosto che leggere pagine di testo scritto. Diversi sono gli aspetti che ne traggono vantaggio: semplificazione delle operazioni da condurre manualmente, efficacia e precisione con cui vengono realizzate, ottimizzazione dei tempi, etc. In tale ottica, nel 1993 l'informatico americano Steve Feiner, insieme a Blair MacIntyre e Dorée Seligmann, presenta il prototipo KARMA (*Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance*) (Feiner et al., 1993) per agevolare le operazioni di manutenzione di una stampante laser. Il sistema (fig. 3.5) è composto da un visore HMD (*Head Mounted Display*) semi-immersivo, *tracker* tridimensionali di forma triangolare ancorati alla stampante reale per la mappatura ottica e ricostruzione 3D in *wireframe* dei componenti oggetto di intervento. Avviato il sistema e indossato il visore, linee guida e frecce indicative guidano le operazioni da compiere per portare a termine l'attività lavorativa.

Nonostante il concetto di AR sia stato introdotto negli anni '60 con i primi strumenti di visione e il termine utilizzato per la prima volta nel 1992 da

---

<sup>86</sup> Ciò non esclude la possibilità di progettare un'esperienza AR multisensoriale aumentando le sensazioni anche degli altri sensi.



Fig. 3.4 – Differenze nella visualizzazione AR di contenuti aggiunti (b) e sottratti (b) all'ambiente reale (a).

Fonte: Mori et al., 2017

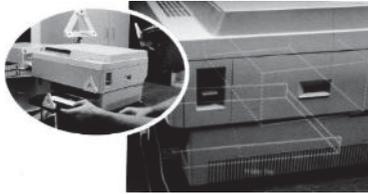


Fig. 3.5 – Componenti del sistema KARMA e modalità di visualizzazione attraverso il HMD.

Fonte: Feiner et al., 1993

Tom Caudell e David Mizell<sup>87</sup> (Caudell e Mizell, 1992), è a partire dall'inizio del 2000 che le ricerche e le applicazioni di AR si intensificano<sup>88</sup>, complice anche l'incremento dello sviluppo tecnologico di sistemi atti alla visualizzazione aumentata delle informazioni.

Le fasi di costruzione del progetto AR si delineano in funzione degli obiettivi da perseguire, delle tecniche da utilizzare, delle modalità di esecuzione e della tipologia di informazioni da visualizzare. In generale, però, appurati i contenuti e le caratteristiche morfo-geometriche della realtà – necessarie per la corretta sincronizzazione dei dati –, il *framework* operativo segue con la scelta del sistema di *tracking* e con la definizione dei processi di registrazione. Il primo consente di individuare la posizione e la direzione della visuale dell'utente, mentre i secondi gestiscono l'integrazione, l'allineamento e la modifica dei contenuti digitali in base agli elementi dell'ambiente reale. In pratica, vengono eseguite opportune trasformazioni geometriche – traslazioni, rotazioni e ridimensionamenti – affinché gli oggetti virtuali vengano percepiti dall'utente coerenti – per posizione, orientamento e dimensione – allo spazio reale in cui sono inseriti. Registrazione e *tracking* sono dunque strettamente correlati: da un lato consentono di visualizzare le informazioni aggiuntive, dall'altro le adattano all'utente variandone, ad esempio, le dimensioni o l'orientamento in base alla distanza e alla direzione della sua visuale. Aspetto

<sup>87</sup> Ricercatori della *Boeing*, che furono incaricati di sviluppare un sistema per semplificare l'assemblaggio e il cablaggio di parti elettroniche durante la costruzione degli aerei. Con l'intento di introdurre una nuova “*technology (...) the general concept is to provide a “see-thru” virtual reality google to the factory worker, and to use this device to augment the worker’s visual field of view with useful and dynamically changing information. (...) This technology is used to “augment” the visual field of the user with information necessary in the performance of the current task, and therefore we refer to the technology as “augmented reality” (AR)*” (Caudell e Mizell, 1992, p. 660), realizzarono un sistema in grado di visualizzare su un visore HUD (*Heads-Up Display*) la sequenza di operazioni che gli operai dovevano eseguire.

<sup>88</sup> Proprio in questi anni viene istituito l'*International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (ISMAR), una conferenza annuale e internazionale il cui *focus* principale è legato alle fruizioni MR e, in particolare, alla AR.

fondamentale poiché una visualizzazione non corretta comprometterebbe gli esiti della AR con sensazioni negative o, estremizzando, con un'errata comunicazione delle informazioni con conseguenze rilevanti, ad esempio, in settori come quello manutentivo o medico. In alcuni casi, per ovviare al problema si predispongono strumenti di visione strutturati ad *hoc*<sup>89</sup> da collocare nella scena reale (Campi et al., 2019; Fiasconaro e Guiducci, 2011) (fig. 3.6). Se da un lato l'uso di tali dispositivi limita il campo visivo della AR ad inquadrature o oggetti specifici, dall'altro consente di effettuare sovrapposizioni più coerenti e controllate<sup>90</sup> e aumentare la sicurezza degli utenti<sup>91</sup>. Questa soluzione, però, è poco adottata in quanto, le istituzioni che gestiscono il patrimonio culturale non sempre concordano con l'installazione di strutture permanenti nelle aree destinate alla fruizione.

Infine, all'utente è destinata la fase di visualizzazione vera e propria. Questa interessa sia le modalità di accesso all'informazione e i dispositivi per la fruizione, sia i processi computazionali che l'*hardware* grafico deve sostenere per *renderizzare* gli oggetti virtuali e sovrapporli al mondo reale.

Ad oggi, le applicazioni più comuni di AR prevedono l'utilizzo di un *tag* – o *marker* – (naturale o artificiale) e di un *App* dedicata<sup>92</sup>; il *marker* – come si dirà in seguito (Cfr. Appendice) – rappresenta un vero e proprio codice



Fig. 3.6 – Prototipo DIVAR: dispositivo per la visualizzazione AR della ricostruzione del Teatro romano di Benevento.

Fonte: Campi et al., 2019

---

<sup>89</sup> Generalmente si tratta di cannocchiali o telescopi, installati su aste, a cui è consentito di ruotare – seppur limitatamente – per poter esplorare correttamente la scena ricostruita.

<sup>90</sup> Vengono limitati i problemi legati alla ricezione dei segnali che potrebbero provocare sfasamenti e visualizzazioni non corrette nella sovrapposizione del contenuto informativo alla realtà.

<sup>91</sup> Spesso gli utenti, proseguendo nella visita, vengono distratti dalla visualizzazione sui *device mobile*. Ciò comporta un doppio rischio; da un lato, infatti, possono incorrere in pericoli per loro stessi, inciampando, ad esempio sulle strutture presenti in sito, dall'altro possono compromettere la visita perdendo parte delle informazioni e dei dettagli della scena reale.

<sup>92</sup> Alcuni esempi sono *Wikitude AR Travel Guide*, *Tuscany+*, *i-MiBAC Voyager* e *FrancigenAR+*.

visuale che, una volta inquadrato con il dispositivo di visualizzazione – *hand help display* –, consente di fruire delle informazioni ad esso associate (De Paolis, 2012). Il principio di funzionamento è simile al consolidato *QR-code*<sup>93</sup>, ma la tipologia di fruizione e contenuto aumentato si differenziano notevolmente poiché le informazioni associate a quest'ultimo (generalmente rimandi a *link web*) non presentano alcuna relazione spaziale con la realtà e, di conseguenza, viene a mancare il principio di *overlay* posto a fondamento della AR. Spesso, infatti, si tende erroneamente a considerare la AR assimilabile al *QR-code* generando molta confusione in merito.

In altri casi, l'accesso ai contenuti AR è basato sulla localizzazione del *device* utilizzato mediante la sensoristica di cui è dotato (GPS, bussola e giroscopio)<sup>94</sup>. Questo tipo di sistema è adoperato prevalentemente nelle aree esterne di vasta portata, con risultati soddisfacenti nel campo della divulgazione del patrimonio storico-architettonico e archeologico, soprattutto nella rappresentazione delle trasformazioni che lo hanno interessato (Empler, 2015). Infatti, attraverso le cosiddette *finestre*

---

<sup>93</sup> È una matrice bidimensionale di moduli bianchi e neri disposti all'interno di un quadrato, che, attraverso le fotocamere dei dispositivi *mobile*, consente una rapida decodifica del contenuto (collegamenti a siti *internet*, numeri di telefono, testi o video). Da qui, l'acronico QR, ossia *Quick Response*. La matrice presenta degli elementi caratteristici: i *position detection pattern* – tre grandi quadrati che ne definiscono i margini –, i quadrati di allineamento – nella matrice ne è presente almeno uno, ma possono anche variare in numero in base alla tipologia di *QR-code* – e l'identificazione della tipologia di contenuto. Quest'ultima, insieme alla quantità di contenuto che deve essere condivisa, caratterizza le diverse tipologie di *QR-code* – *micro QR*, *iQR-code*, *SQRC* e *Frame QR* –.

<sup>94</sup> Ad esempio, *i-MiBACT Voyager* è una *App*, realizzata in collaborazione da *Illusionetwork* e *Archivium* nel 2011 su proposta del MiBACT, che consente di visualizzare su dispositivi *Apple* ricostruzioni tridimensionali, ad alta resa foto-realistica, dei più importanti monumenti e parchi archeologici. La visualizzazione del modello tridimensionale può avvenire in sito direttamente sul manufatto reale, attraverso il ricevitore GPS del dispositivo, oppure in remoto.  
[https://storico.beniculturali.it/mibac/export/MiBAC/sito-MiBAC/Contenuti/MibacUnif/Comunicati/visualizza\\_asset.html\\_198945880.html](https://storico.beniculturali.it/mibac/export/MiBAC/sito-MiBAC/Contenuti/MibacUnif/Comunicati/visualizza_asset.html_198945880.html)

*temporaliz*<sup>95</sup>, viene mostrata l'evoluzione della area al fine di percepire caratteristiche e peculiarità altrimenti non visibili, confrontare dati temporalmente differenti e apprezzare, ad esempio, ricostruzioni di manufatti in rovina nel contesto in cui sono collocati, riscoprendo le relazioni spaziali e paesaggistiche andate perdute o interpretando le forme attuali in relazione agli avvenimenti passati.

Entrambe le forme di AR sono definite *non immersive* poiché la visualizzazione delle informazioni aumentate è mediata dal dispositivo *mobile* utilizzato e, al contempo, l'utente percepisce lo spazio e il contesto che lo circonda. Ma la ricerca applicativa mostra anche esempi di *AR semi-immersiva* (Vlahakis et al., 2001), dove il processo di *overlay* è gestito attraverso specifici HMD – *optical see-through* – che isolano parzialmente l'utente dalla realtà reale per consentirgli la corretta fruizione della AR.

### 3.2.2 AV – *Augmented Virtuality*

La *Augmented Virtuality* (fig. 3.7) viene collocata in una posizione intermedia tra la AR e la VR in quanto rappresenta un'esperienza di fruizione in cui l'utente è completamente immerso in ambienti digitali ma ha contezza di oggetti e azioni reali (Bruder et al., 2010). L'odore del caffè avvertito in prossimità di una *moka* digitale, il rilievo delle dimensioni di un oggetto virtuale mediante un metro reale o la percezione visiva e tattile di un oggetto reale trasposto nell'ambiente digitale, rappresentano esemplificazioni utili alla comprensione del fondamento teorico e concettuale posto alla base delle fruizioni AV. Il grado di informazione virtuale è, quindi, ampliato attraverso percezioni sensoriali (tatto, olfatto e gusto) diverse e del tutto separate da quella visiva, poiché quest'ultima è mediata dai dispositivi di visualizzazione.

Sebbene appaiano evidenti le potenzialità insite in questa particolare tipologia di fruizione, le ricerche condotte in merito ai progetti di

---

<sup>95</sup> Rappresentano dei veri e propri salti nel tempo attraverso la visualizzazione di periodi – passati e/o futuri – differenti da quello che si sta vivendo.

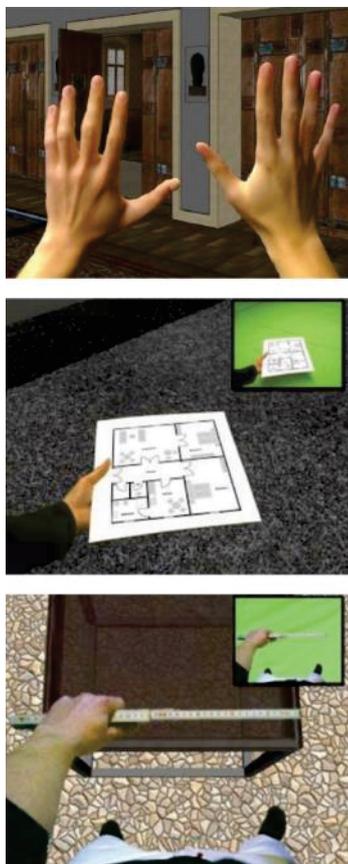


Fig. 3.7 – Esperienze di fruizioni AV dove l'utente percepisce sé stesso (le mani in particolare) ed esegue azioni reali su oggetti virtuali.

Fonte: Bruder et al., 2009;  
Bruder et al., 2010

comunicazione XR mostrano che il campo dell'AV è stato meno investigato rispetto alla AR e alla VR. Ciò si deve, probabilmente, alla limitazione imposta negli strumenti di visualizzazione che, diversamente dalle altre, sono strettamente legati ai dispositivi HMD. Inoltre, la sua applicazione al patrimonio storico-architettonico non presenta esempi particolarmente significativi, al contrario di altri settori – nello specifico quello industriale – dove invece viene utilizzata fornendo risultati soddisfacenti nella creazione di ambienti collaborativi gestiti da remoto, ma anche nella prefigurazione delle operazioni da eseguire (Regenbrecht et al., 2004). In quest'ultimo caso, il processo lavorativo è costruito digitalmente, ipotizzando scenari plausibili delle attività da compiere per la realizzazione di prodotti, sia nelle fasi di progettazione che in quelle prettamente operative. La manipolazione di oggetti reali e la determinazione dei *feedback* tattili rende verosimile l'esperienza in AV e, contestualmente, consente di validare le ipotesi effettuate.

A tal fine, analogamente a quanto accade nella AR, è necessario eseguire mappature accurate degli oggetti reali in relazione agli ambienti digitali, affinché il riconoscimento degli stessi porti ad una corretta esecuzione della fruizione. In funzione del tipo di *tracking*<sup>96</sup> che viene attuato, la AV si differenzia in *statica*, *interattiva* e *dinamica* (Neges et al., 2018).

Le prime due tipologie sono basate sul medesimo approccio, ovvero utilizzano apposite camere – *tracking* ottico – per riconoscere elementi noti al sistema (*marker*) e/o *features* degli oggetti reali. Sono assimilabili, nelle modalità di esecuzione, alle fruizioni AR che consentono l'accesso ai contenuti aumentati mediante dispositivi *mobile*, ma ne differiscono per le modalità di visualizzazione che avvengono tramite HMD. Nello specifico, la AV *statica* fissa la posizione e l'orientamento dell'oggetto rispetto ad un *marker* che, mappato univocamente nel sistema, consente di sovrapporre l'informazione all'ambiente digitale. In pratica, il *marker* funge da

<sup>96</sup> Anche il processo di *tracking*, di per sé, può essere considerato una particolare forma di AV poiché consente di correlare la posizione e l'orientamento dell'utente (elemento reale) con una sua riproposizione virtuale all'interno di una realtà costruita in digitale.

connessione tra reale e virtuale. Diversamente, nella *AV interattiva*, l'oggetto viene ricostruito individuando sullo stesso dei punti chiave – spesso identificati negli spigoli o sui bordi dell'elemento – da trasportare in digitale come *control point* per la gestione delle variazioni di posizione e orientamento. Di conseguenza, laddove sia necessario apportare modifiche alla collocazione dell'oggetto reale, attraverso la rilettura dei *control point*, è possibile far corrispondere la variazione anche nell'ambiente virtuale consentendo una maggiore flessibilità al sistema.

La *AV dinamica*, invece, integra al *tracking* ottico quello basato sulla sensoristica associata ai dispositivi di visualizzazione come gli HMD per una mappatura in *real time* sia dell'utente che degli oggetti reali. Ciò fornisce ampia libertà di movimento durante la fruizione poiché il sistema è ideato per acquisire dinamicamente le informazioni di posizione e orientamento. Di fatto, la *AV dinamica* ibrida la *AR semi-immersiva* con la *VR immersiva*.

### **3.2.3 VR – *Virtual Reality***

Nella *Virtual Reality* (fig. 3.8) tutto il processo di fruizione è spostato in ambiente digitale. Gli oggetti che compongono la realtà e gli avvenimenti che la caratterizzano sono opportunamente simulati e il fruitore è isolato dal contesto in cui si trova mediante visori HMD (Roussou, 2002). Quindi, a differenza della *AR* e della *AV*, la *VR* sostituisce del tutto l'ambiente reale con una sua riproposizione virtuale. Presupposto fondante la simulazione è la costruzione di un modello tridimensionale<sup>97</sup>, attraverso il quale gestire l'esperienza *VR*.

---

<sup>97</sup> Se consideriamo la simulazione in senso lato, ovvero intesa come riproduzione di un determinato sistema, processo o fenomeno – e/o dell'ambiente in cui è collocato – per fini sperimentali, il modello potrà assumere connotazioni specifiche (matematico, teorico, informatico, meccanico, analogico, etc.) in funzione delle analisi da condurre. L'agire attraverso modelli simulati è prassi ormai consolidata in molti campi applicativi, poiché coniuga conoscenza preventiva e analisi predittive inerenti l'evoluzione degli stessi, senza comprometterne le fattezze reali. Inoltre, a valle delle sperimentazioni e sulla base dei risultati ottenuti, è possibile apportare opportuni correttivi al fine di migliorarne le caratteristiche prestazionali.

Fig. 3.8 – Esperienza di fruizione in VR per la disseminazione e divulgazione del Convento di S. Maria delle Grazie a Milano.

Fonte: Bolognesi e Aiello, 2019



Il concetto esposto pocanzi, sebbene sia ampiamente consolidato nell'indicare una specifica tipologia di fruizione XR, in realtà non ne rispecchia appieno l'ambito applicativo poiché, di fatto, è riferito alla sola VR *immersiva*. Mentre, sono intese come esperienze VR tutti i prodotti ottenuti mediante processi di *computer graphic and animation*, che, a seguito del loro utilizzo e delle azioni/reazioni prodotte dal sistema, inducono nell'utente i diversi stimoli sensoriali e, in particolar modo, la sensazione di *presenza* (Steuer, 1992). Di conseguenza, affinché il progetto di fruizione possa essere considerato una VR – tralasciando il dispositivo di visualizzazione mediante il quale viene fruito per il diverso grado di *immersione* che può generare – è necessario che ciò che l'utente osserva sia frutto di una costruzione (o ri-costruzione) digitale che lo porta ad essere lì presente, in quel determinato luogo e tempo. È noto che, la più alta espressione di VR è quella in cui l'utente perde completamente la consapevolezza del mezzo – il visore HMD, gli auricolari per l'audio, le *user interfaces* per *input* e *feedback*, etc.– che media tra lui e la scena con cui interagisce, massimizzando le percezioni di *immersione* e *presenza*. Se da un lato gli attuali sviluppi tecnologici pongono le basi per il raggiungimento di esperienze VR complete, dall'altro i processi operativi e gli strumenti adoperati non sono ancora pronti a fornire risultati soddisfacenti in merito.

Di conseguenza, così come accade per la AR, anche nella VR si hanno diversi livelli di *immersione*, esplicitivi sia delle modalità di costruzione del progetto di comunicazione che dei dispositivi utilizzati per la sua esecuzione. Si distinguono, quindi, le fruizioni totalmente *immersive* da fruizioni *semi-immersive* e *non immersive* – a loro volta maggiormente specificabili in relazione al diverso grado di *interattività* che propongono –. Supponendo che l’esperienza VR presenti un’elevata interazione con gli elementi che compongono l’ambientazione simulata, nel primo caso – VR *immersiva* – (fig. 3.9), l’utente ha pieno controllo con la scena che sta visualizzando, gli stimoli multisensoriali prodotti sono assimilabili al reale e alle azioni che egli induce corrispondono delle reazioni similmente reali. Come è ben noto, ciò avviene associando, durante la costruzione del progetto VR, caratteristiche fisiche agli oggetti (dimensioni, materiale, peso, massa, attrito, etc.), che consentono di gestire i comportamenti e le risposte degli stessi in funzione delle azioni che l’utente produce durante la sua esecuzione<sup>98</sup>.

Nelle fruizioni *semi-immersive* (fig. 3.10), invece, la percezione dell’utente è filtrata per mezzo di dispositivi di controllo e di proiezione (schermi, pannelli, piani di lavoro, etc.) (Drettakis et al., 2007; Steinicke et al., 2006). Un particolare esempio di questa tipologia di VR è il CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*), un ambiente specifico totalmente composto da schermi proiettivi, sia per le pareti che per pavimento e soffitto.

Infine, nelle VR *non immersive*, altrimenti dette VR *desktop* (Wang et al., 2018), la visualizzazione della scena tridimensionale avviene, generalmente, mediante *monitor* associati a *computer*. Non è necessario, quindi, ricorrere a dispositivi HMD o filtri tra l’utente e lo strumento



Fig. 3.9 – *Storytelling* delle trasformazioni della Basilica di Loreto attraverso visualizzazioni VR *immersiva*.

Fonte: Rossi et al., 2018

---

<sup>98</sup> Ad esempio, se nella scena VR è presente una sfera e l’utente la fa rotolare su di un piano, la sua velocità sarà proporzionale alla forza che egli ha applicato, ma relazionata alle caratteristiche che possiede e a quelle del piano su cui scorre. Analogamente, se viene lanciata in aria ed è stata impostata la presenza della forza di gravità, la sfera cadrà automaticamente verso il basso.

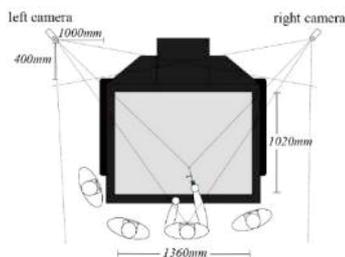


Fig. 3.10 – Sistema di fruizione VR *semi-immersivo*.

Fonte: Steinicke et al., 2006

utilizzato per la fruizione, ma sono indispensabili sistemi di *input* – generalmente *mouse* e tastiere – per poter manipolare e navigare liberamente nella scena VR.

Dunque, un'importante differenza che sussiste tra le tre tipologie di VR è legata alle dinamiche che si instaurano durante l'esecuzione della fruizione e che possono essere *attive*<sup>99</sup>, nel caso della VR *immersiva*, o *passive* per le altre due<sup>100</sup>, dove l'utente percepisce la collocazione in un ambiente tridimensionale, ma la visualizzazione è mediata da appositi sistemi. I diversi dispositivi, inoltre, inevitabilmente influenzano sia il grado di *immersività*, agendo sul senso di *presenza* indotto, che gli obiettivi perseguibili.

L'idea di VR è nata negli anni '60 affiancando quella di AR, in un quadro più ampio di ricerche – riguardanti la simulazione della realtà, gli stimoli sensoriali e le interazioni uomo-macchina –, e condividendone parte del percorso evolutivo, soprattutto nei primi anni di sperimentazione. Sin dall'inizio, però, emergono con chiarezza le differenze metodologiche e operative poste alla base di entrambe le esperienze di fruizione. Un forte impulso alla tecnica VR si ha intorno agli anni '80 - '90 attraverso le attività condotte da Jaron Lanier, che portano sia alla formalizzazione del concetto che alla creazione di diversi dispositivi di visualizzazione e

<sup>99</sup> Va precisato, però, che non sussiste un legame diretto tra la dinamica di fruizione della scena e l'*interazione* con la stessa; quest'ultima, infatti, potendo essere gestita mediante *controller* e *gamepad*, viene (teoricamente) garantita in egual misura in tutti i livelli immersivi. Il medesimo dispositivo, infatti, potrebbe essere utilizzato per consentire all'utente di muoversi nella scena virtuale sia se la sta fruendo mediante un HMD, sia che la sta visualizzando in ambienti *semi-immersivi* dedicati o su schermi di *computer*.

<sup>100</sup> Rientrano nelle fruizioni *passive* anche i tradizionali *virtual tour* 360°, che, sebbene consentano un'immersione totale nell'ambientazione visualizzata – reale se riferita a rappresentazioni dello stato di fatto, virtuale se, invece, è legata a ricostruzioni digitali – e un certo grado di interazione – navigazione tra le diverse immagini 360° –, non possono considerarsi appieno delle fruizioni *attive* per le limitazioni che pongono nella navigazione della stessa e nella manipolazione degli eventuali oggetti presenti.

interazione<sup>101</sup>. Va precisato però che l'idea di Jaron Lanier è legata prevalentemente all'aspetto tecnologico della VR, intesa come un insieme di dispositivi elettronici per la visualizzazione interattiva tridimensionale, implementati con guanti e sensori per la mappatura dei movimenti dell'utente, e con un'unità di elaborazione per la gestione e l'aggiornamento in *real time* delle informazioni acquisite. Le sperimentazioni condotte negli anni affiancano a questa idea prettamente strumentale, una di tipo psico-antropologica e comportamentale, che identifica nella VR non solo la tecnologia adoperata, ma anche la capacità degli utenti di interagire con essa e con ambienti completamente digitali. Pur essendo chiaramente evidenti le potenzialità nell'applicazione della tecnica VR, le difficoltà operative nel gestire il progetto di fruizione e nella creazione di strumenti adeguati alla sua esecuzione, congiuntamente ai costi degli stessi, ne impongono un rallentamento nell'applicazione.

Il progressivo sviluppo di dispositivi *hardware* e *software* avvenuto tra la fine del XX secolo e gli inizi del XXI secolo nei settori del *gaming* e dell'*entertainment* ha prefigurato nuovi stimoli di ricerca per il campo della VR. Tali dispositivi, sebbene non direttamente pensati per progetti di fruizione e non incentrati sulle modalità di visualizzazione *immersiva*, introducono i primi sistemi di *input* – con *controller* e *gamepad* specifici –, ampliando notevolmente le possibilità di interazione con l'ambiente virtuale – aspetto fondamentale per la VR –. Mentre con la commercializzazione dei primi visori HMD dedicati alla VR<sup>102</sup>, alcuni dei

---

<sup>101</sup> La fondazione della VPL (*Visual Programmin Lab*) ad opera di Jaron Lanier trasforma radicalmente le tecnologie dedite alle fruizioni XR. Infatti, in pochi anni vengono realizzati il primo *DataGlove* (1985), per il *tracking* della mano in grado di identificarne i gesti e misurare la flessione delle dita attraverso fibre ottiche, e l'*EyePhone* (1988), il primo visore HMD commercializzabile per la completa immersione dell'utente durante le esperienze VR (Cipresso et al., 2018).

<sup>102</sup> Nel 2011 viene sviluppato il primo prototipo *Oculus Rift* da Luckey Palmer e nel 2014 il *Goggle Cardboard* della *Google*, due visori HMD nettamente differenti, sia nelle caratteristiche formali che funzionali, ma che si pongono come riferimenti nell'ambito dei dispositivi di visualizzazione.

quali ideati per estenderne il campo applicativo anche alla quotidianità, si avvia una nuova fase di rinascita a cui ancora si assiste.

Ad oggi, tecniche sempre più raffinate consentono di costruire ambienti virtuali che simulano il reale con elevata accuratezza (in forme, dimensioni, colori e materiali), che propongono esperienze di visualizzazione altamente coinvolgenti (grazie al grado di immersione e interazione con il modello virtuale) e che, al contempo, prestano attenzione alla qualità delle informazioni trasmesse, diversificando la fruizione in base al *target* di utenti a cui è rivolta l'esperienza VR.

In riferimento al patrimonio storico-architettonico, in particolare, tali progetti<sup>103</sup> costituiscono un valido supporto per la conoscenza e la valorizzazione dei beni presenti sul territorio, poiché conformano strumenti destinati non solo alla loro divulgazione e disseminazione, ma anche alle ricerche tecniche di settore che li vedono protagonisti.

---

<sup>103</sup> *Appia Antica Project* e *Virtual Rome 2.0*, sono alcuni esempi dell'applicazione della metodologia VR.





PARTE SECONDA

**FORMALIZZAZIONE E SPERIMENTAZIONE  
APPLICATIVA DELLA RICERCA: IL CASO  
STUDIO DELL'HOSPITAL SIMÓN RUIZ**



CAPITOLO QUARTO

**L'HOSPITAL SIMÓN RUIZ IN  
MEDINA DEL CAMPO  
(VALLADOLID, SPAGNA)**

**Il caso studio per la definizione  
applicativa del lavoro di ricerca**

Le tematiche trattate dal punto di vista teorico nei capitoli precedenti hanno offerto spunti significativi per il proseguimento delle attività pratiche di ricerca, che, nella seconda fase del lavoro, hanno interessato l'individuazione di un preciso processo metodologico, la cui definizione è stata supportata da sperimentazioni applicative su uno specifico caso studio, l'Hospital Simón Ruiz di Medina del Campo (Valladolid, Spagna). Le caratteristiche e le qualità intrinseche rilevate già dai primi approcci con l'edificio, l'uso dei materiali da costruzione con il mattone lasciato a vista che assume un ruolo decorativo e non solo prettamente strutturale nelle opere murarie, e la chiara idea progettuale posta alla base della costruzione e delineata nella *Concordia*, rendono il complesso ospedaliero spagnolo particolarmente interessante e affascinante, al punto da individuarlo quale

mezzo per la verifica delle procedure operative della ricerca. Aspetti implementati dall'importanza che il sito ha assunto nel tempo, non solo per la cittadina di Medina del Campo ma anche per l'intera provincia di Valladolid. Infatti, nonostante le condizioni di precarietà in cui versa, dovute all'abbandono nel tempo e sviluppatesi in pochi decenni, attualmente è considerato come un incubatore di dinamizzazione sociale e culturale per l'intero territorio.

Da qui derivano gli investimenti delle autorità spagnole, della *Fundación Simón Ruiz* e della *Fundación Museo de las Férias* affinché il sito possa ritrovare lo splendore di un tempo. Diverse iniziative sono state portate avanti – *Simón Qué!?* (Ottobre 2019), *Simón Fest* (Dicembre 2019), *Festival Mapping Me! - Festival de Nuevas Tecnologías aplicadas a las Artes Escénicas de Castilla y León* (Dicembre 2020) –, altre sono già programmate negli anni avvenire, per incentivare la messa in sicurezza, il recupero e il riuso della struttura, individuando, al contempo, le nuove funzionalità da destinare alle varie aree della stessa. Va precisato che l'Hospital Simón Ruiz è inserito in un piano nazionale strategico per lo sviluppo sostenibile e per la direzione generale del patrimonio della *Junta de Castilla y León – Medina 21* – al fine di agevolare la riabilitazione attraverso finanziamenti economici. Grazie al suddetto piano, alcune operazioni sono state già condotte per il consolidamento e la messa in sicurezza dei resti della Cappella nel giardino retrostante il complesso e per il restauro delle coperture e degli ambienti della Chiesa. Ad oggi, l'approvazione della terza fase del piano, prevede interventi per l'ala Sud-Est, che interesseranno in particolare le corrispondenti ali della corte (piano terra e primo piano), le aree prospicienti il fronte principale su *Avenida Portugal* (piano terra e primo piano) e i tre ambienti attigui alla Chiesa (primo piano). L'obiettivo dell'intervento è legato a creare le strutture necessarie per ospitare gli uffici del *Centro de Desarrollo Económico Simón Ruiz*, con funzioni amministrative e polivalenti (accoglienza, formazione professionale, didattica, etc.), e creare un luogo per mostre ed eventi pubblici di media entità.

L'inserimento di nuove attività è pensato dall'amministrazione competente sia in linea con le caratteristiche del complesso, sia con le

necessità del territorio e, soprattutto, in funzione della creazione di un vero e proprio *hub* dedito all'accrescimento culturale, sociale ed economico dello stesso e dell'area in cui è collocato.

In ragione di tali riflessioni, si è scelto di perseguire, durante le attività di ricerca, lo scopo di conformare uno strumento utile ad agevolare da un lato l'aspetto propriamente tecnico e gestionale dei progetti di intervento da attuare sul complesso, dall'altro la sua fruibilità attraverso modalità alternative che possano sopperire alla temporanea inaccessibilità. Al contempo, tale strumento ne consente la divulgazione e disseminazione culturale anche al di fuori del territorio medinense, espandendo la conoscenza del complesso oltre i limiti geografici dell'area in cui è collocato e connotandolo come attrattore culturale per l'intero territorio. In questo modo, si perviene ad una tutela complessiva dell'Hospital Simón Ruiz, in linea con la dichiarazione come bene di interesse culturale (BIC) avvenuta nel 1991.



Fig. 4.1 – Fronte principale su *Avenida Portugal* dell'Hospital Simón Ruiz.

Foto M. Pulcrano



Fig. 4.2 – *Círculo de Juan Pantoja de la Cruz*, olio su tela (1595). Ritratto di Simón Ruiz depositato presso la *Fundación Museo de las Ferias*.

Fonte:  
<https://www.museoferias.net/>

## 4.1 Il complesso dell'Hospital Simón Ruiz

Costruito tra il 1593 e il 1619, il complesso dell'Hospital Simón Ruiz<sup>104,105</sup> fu voluto dall'omonimo fondatore Simón Ruiz Envito<sup>106</sup> (fig. 4.2) e realizzato su progetto del frate gesuita Juan da Tolosa per riunire, in un'unica struttura, i diversi ospedali e ostelli presenti nell'area medinense – ad eccezione dell'*Hospital della Piedad* di Barrientos<sup>107</sup> – dediti sia all'assistenza medica che alla carità cristiana.

<sup>104</sup> I testi di riferimento utilizzati per redigere il seguente capitolo sono tutti segnalati nell'apposita sezione della bibliografia (Cfr. Bibliografia di riferimento per l'Hospital Simón Ruiz).

<sup>105</sup> È noto anche come *Hospital del la Purissima Concepción y San Diego de Alcalá*, a testimonianza della forte dedizione religiosa del suo fondatore. La doppia intitolazione si deve, da un lato alla presenza della Chiesa, dedicata appunto all'Immacolata Concezione, dall'altro alla canonizzazione del beato, avvenuta nel 1591 anno di fondazione del complesso ospedaliero.

<sup>106</sup> Nasce a Belorado (Burgos) nel 1525/1526 da una famiglia di commercianti dediti all'importazione/esportazione di tessuti. Nella metà del '500 si trasferisce a Medina del Campo – nota al tempo come *Villa de las Ferias* – dove risiederà stabilmente per tutta la sua vita, ad eccezione di un breve periodo trascorso a Valladolid (1581-1593). Rimasto vedovo nel 1571 della prima moglie – María Pilar de Montalvo, nativa di Arévalo – sposata all'età di 35 anni (1561), contrae nuovamente matrimonio (1574) con Marianna de Paz, una nobildonna di Salamanca. Non ebbe eredi da nessuno dei due matrimoni. L'attività di *mercante* (tessuti, carta, spezie, coloranti, acciaio, etc., provenienti da diverse parti d'Europa) gli consentirà, nella seconda fase della sua vita, di dedicarsi ad altro, avvicinandosi all'ambito economico-finanziario ed effettuando anche prestiti alla corona spagnola del tempo (XVI secolo) – da qui l'appellativo di *mercante-banchiere* –. Infine, negli ultimi anni di vita si occuperà della costruzione dell'ospedale generale, senza però riuscire vedere il progetto completato, poiché morirà prima della fine della costruzione (Medina del Campo nel 1597).

<sup>107</sup> Le diverse fonti bibliografiche consultate, nell'elencare le strutture che all'atto della *Concordia* furono unificate nel formare l'ospedale generale di Medina del Campo, sono tutte concordi nell'escludere l'*Hospital della Piedad* di Barrientos – solo nel 1862 sarà incluso nell'ospedale medinense –. Talvolta, però, ad esso vengono associate altre strutture, come la *Confradía de los Compañeros* e parte dell'*Hospital de Nuestra Señora* del Amparo.

## L'HOSPITAL SIMÓN RUIZ IN MEDINA DEL CAMPO (VALLADOLID, SPAGNA) Il caso studio per la definizione applicativa del lavoro di ricerca

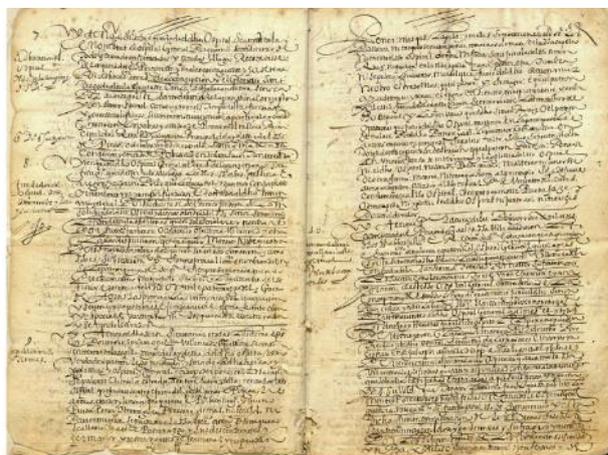


Fig. 4.3 – Pagine estratte dalla *Concordia*. Manoscritto su carta conservato presso l'Archivio Simón Ruiz (collocazione ASR, H 21.1).

Fonte:  
<https://www.museoferias.net/>

La politica di ammodernamento e profonda trasformazione del sistema sanitario fu promossa dalla monarchia spagnola nel XVI secolo in tutto il regno<sup>108</sup>, per sopperire alla dispersione e, conseguentemente, all'inefficacia di un sistema di strutture minori decentrate sul territorio. Infatti, la decisione di costruire un ospedale generale in Medina del Campo fu approvata prima<sup>109</sup> del patrocinio di Simón Ruiz Envito, ma la scarsità di risorse economiche portò a rallentare il processo progettuale ed esecutivo. L'obiettivo, dunque, era quello di realizzare un ospedale generale<sup>110</sup>, la cui costruzione vide dapprima la fondazione dell'istituzione e poi l'edificazione vera e propria del complesso.

<sup>108</sup> L'Ospedale Reale di Santiago de Compostela (1501-1511), l'Ospedale di Santa Cruz di Toledo e l'Ospedale Reale di Granada (1511-1526) sono solo alcuni esempi di architetture ospedaliere costruite in questo periodo e secondo la nuova visione dei sovrani spagnoli.

<sup>109</sup> Siamo nel 1589, ma va precisato che tale idea si era già palesata nel 1577 quando il re Felipe II la propose al *Corregidor* di Medina; ma i legami con personaggi di spicco delle diverse strutture interessate dall'intervento, spesso intrecciati con l'ambito ecclesiastico, non ne consentirono l'attuazione.

<sup>110</sup> Come si evince dall'articolo VII della *Concordia*: *Que así hecho fundado el dicho hospital se ha de intitular y nombrar hospital general porque en él se han de curar de todo género de enfermedades y heridas y llagas, recoger desamparados y peregrinos y males contagiosos y ha de tener por advocación a*

## MEDINA DEL CAMPO

*La cittadina di Medina del Campo si colloca nella parte meridionale della provincia di Valladolid (comunità autonoma di Castiglia e León) e nonostante la sua estensione la renda tra le più grandi della provincia, l'area urbana si concentra nel centro del comune. Ciò emerge chiaramente dall'analisi delle mappe satellitari e dei piani regolatori, che mostrano un territorio a prevalenza di suolo ad uso agricolo e/o incolto.*

*Nel XVI secolo, Medina del Campo era conosciuta come la "Villa de las Ferias y del Testamento" per le numerose fiere commerciali che ospitava. Inoltre, era considerata come una delle più importanti cittadine del regno, grazie alla costante presenza della corte spagnola. Ed è in questo periodo che importanti edifici civili, religiosi e militari della città furono eretti, tra cui, ad esempio, l'Hospital Simón Ruiz, il Castillo de la Mota e il Palacio Real Testamentario.*

*Diversi eventi avversi portarono ad un declino della città e alla perdita di parte del patrimonio costruito, anche a causa di alcuni incendi che la interessarono. Ciononostante, alla fine del XX secolo il centro storico è stato dichiarato bene storico-artistico. Ad oggi, Medina del Campo vive quello che è stato definito il secondo rinascimento, con una forte ripresa sia economica che sociale e turistica.*

Fondamentale fu la stesura della *Concordia* (23 aprile 1591)<sup>111</sup> (fig. 4.3), un atto ufficiale stilato dinanzi all'abate Don Diego Ruiz de Montalvo tra Simón Ruiz Envito e il *Consejo, Justicia e Regimiento* di Medina del Campo. È tutt'ora conservato e custodito presso il l'Archivio Simón Ruiz e con esso il ricco mecenate si impegnò a realizzare a proprie spese la grande opera in cambio di completa autonomia decisionale sulla stessa. Nel documento, composto da 51 articoli, sono minuziosamente delineate sia le caratteristiche formali e funzionali dell'ospedale medinense, che le opere da eseguire, i materiali da impiegare<sup>112</sup>, le maestranze, gli investimenti economici e le rendite, i diritti e doveri delle diverse parti, etc. In pratica rappresenta una vera e propria guida normata e a valenza legale non solo per la costruzione del complesso, ma anche per l'uso<sup>113</sup>, la conservazione e l'amministrazione nel tempo.

Il primo articolo stilato nella *Concordia* definisce il luogo destinato ad accogliere la struttura.

---

*Nuestra Señora de la Concepción y al glorioso san Diego de Alcalá por haber sido este santo devotísimo de la Purísima Concepción y ser santo español canonizado en tiempo de esta fundación y haberse calificado su santa canonización con la particular caridad que usó con los pobres y así se ha de pintar en tablero principal de la Iglesia del Hospital de pincel arrodillado a la santa Imagen de la Concepción y cercado de pobres de que en su vida tuvo tanto cuidado. (Navarro García, 1998, p. 263)*

<sup>111</sup> Ratificata con Decreto Regio di Felipe II del 12 maggio 1592 e con Bolla Papale di Clemente VIII del 10 giugno 1593.

<sup>112</sup> Nell'ottica dell'economicità e velocità del sistema di costruzione dell'Hospital Simón Ruiz vengono prediletti materiali del luogo e, laddove sia necessario realizzarli come le ceramiche, vengono fabbricati stesso nel cantiere. Ciononostante, vengono indicate anche le risorse materiche provenienti da altri siti.

<sup>113</sup> Fino al XX secolo, le attività svolte all'interno dell'Hospital Simón Ruiz non hanno tradito la sua vocazione originaria, anche se talvolta limitate all'uso di pochi ambienti. A seguire, si sono alternati percorsi formativi e culturali che sporadicamente hanno interessato la struttura fino agli inizi del XXI secolo quando il complesso entra in lento declino, per poi essere definitivamente abbandonato. Ad oggi, un rinnovato interesse sta promuovendo una sua ripresa grazie all'azione congiunta di diverse autorità e associazioni che operano sul territorio.

## L'HOSPITAL SIMÓN RUIZ IN MEDINA DEL CAMPO (VALLADOLID, SPAGNA) Il caso studio per la definizione applicativa del lavoro di ricerca



Fig. 4.4 – Centro di Medina del Campo nel XVI secolo con indicazione del percorso delle mura di cinta e delle porte di accesso alla città.

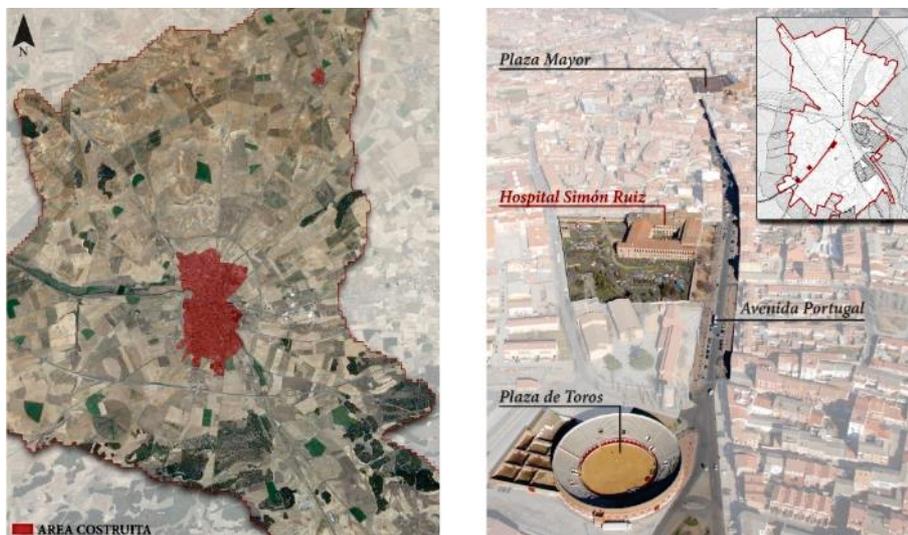
Fonte: Sánchez del Barrio, 1991

In un contesto come quello di Medina del Campo, già in parte costruito e consolidato al XVI secolo, individuare dove realizzare l'Hospital Simón Ruiz non è stata scelta scontata. Non vi erano, infatti, aree interne al centro cittadino che per dimensioni, posizione e orientamento fossero adatte e rispondenti agli scopi funzionali del complesso. Per tale motivo, le autorità medinensi concessero a Simón Ruiz Envito l'*Ejido*, un sito pianeggiante che, per le caratteristiche presentate, apparve la scelta più adatta per l'opera, evitando in tal modo l'imposizione di particolari vincoli e/o limitazioni soprattutto per le dimensioni che questa doveva presentare. Inoltre, la sua posizione, sebbene fosse al di fuori delle mura cittadine, era considerata alquanto strategica poiché sull'asse viario che da Salamanca arrivava a Valladolid passando per Medina del Campo. Il sito, infatti, è collocato non molto distante del luogo dove un tempo era presente la *Porta di Salamanca* (fig. 4.4).

Ad oggi quella direttrice collega due simboli emblematici per la cittadina spagnola, la *Plaza Mayor de la Hispanidad* e la *Plaza de Toros* (figg. 4.5 e 4.6).

Fig. 4.5 – Vista aerea del comune di Medina del Campo con individuazione della relazione tra l'area costruita (in rosso) e le aree agricole (immagine sinistra) e vista dell'Hospital Simón Ruiz in relazione al contesto urbano (immagine destra).

Elaborazione M. Pulcrano



#### 4.1.1 La costruzione nel tempo del complesso ospedaliero

La storia evolutiva dell'edificazione dell'Hospital Simón Ruiz può essere riletta alla luce dei numerosi documenti conservati presso il grande Archivio Simón Ruiz costituente, ad oggi, uno dei più cospicui e meglio conservati di tutta Europa. In alcuni casi, le informazioni riscontrabili sono di estremo dettaglio consentendo di definire in maniera molto puntuale le opere eseguite, la tipologia e la quantità di materiali impiegati, le maestranze incaricate dei lavori, etc., nonché le fasi di edificazione e lo stato dei lavori in un determinato intervallo di tempo. Inoltre, sono individuabili i vari amministratori, supervisori e tecnici che si sono susseguiti con il compito di guidare la costruzione del complesso sia dal punto di vista organizzativo, che economico e operativo.

In estrema sintesi, dunque, si ha che<sup>114</sup>:

<sup>114</sup> Va precisato che, nella maggior parte dei casi, le date riportate fanno riferimento a ricevute di pagamenti effettuati, di conseguenza, le fonti consultate suppongono che i lavori in oggetto fossero stati già svolti o in procinto di essere conclusi.



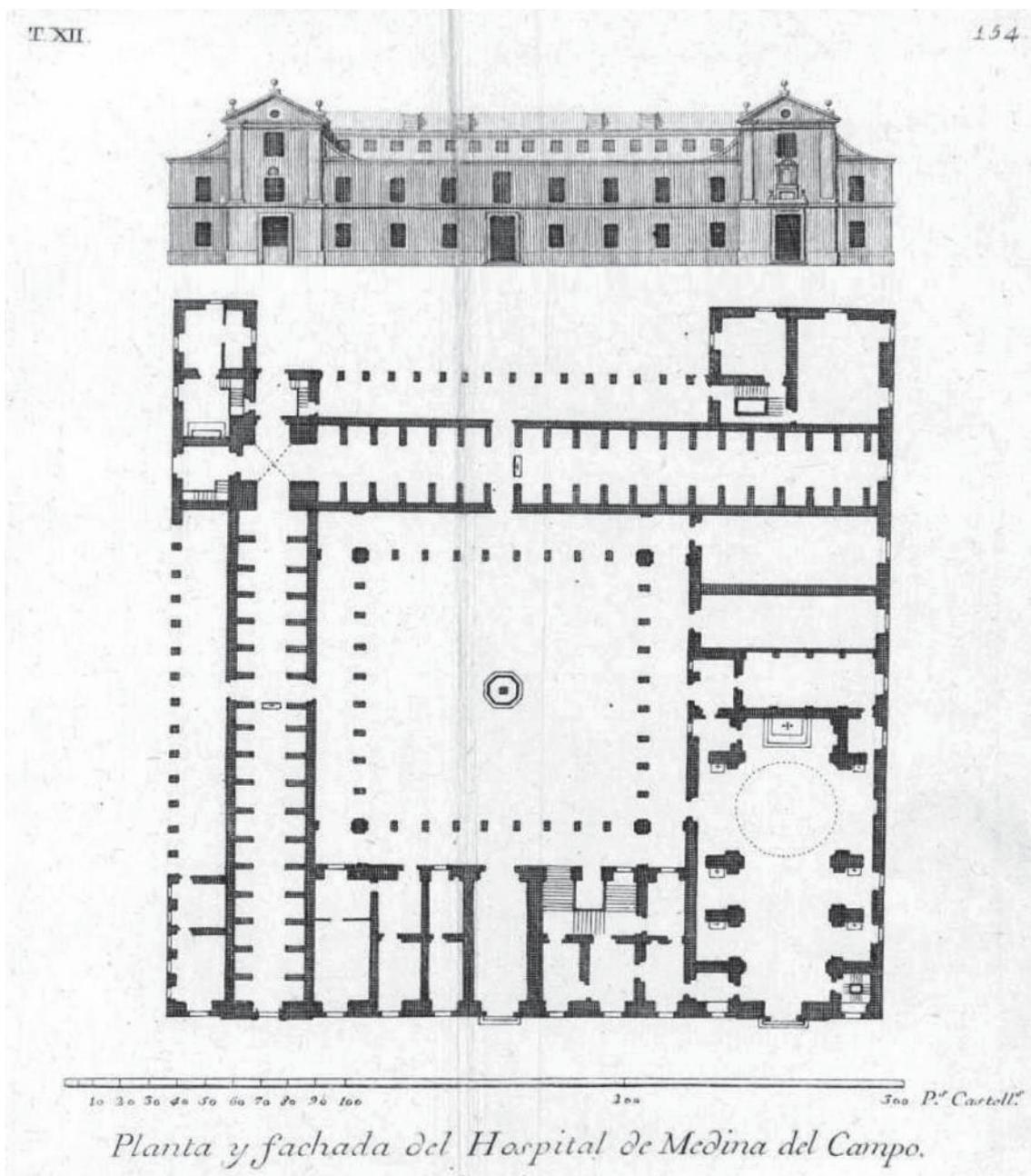
Fig. 4.6 – Vista aerea del complesso ospedaliero in relazione al contesto e agli assi viari che lo delimitano.

Elaborazione M. Pulcrano

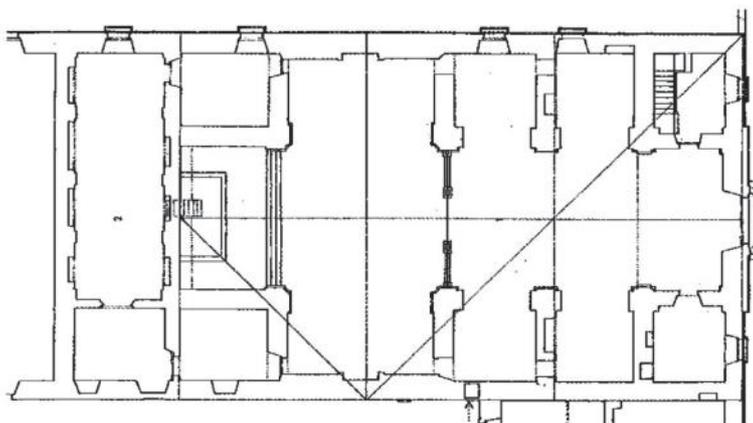
- alla morte di Simón Ruiz Envito (1597), il patronato del complesso fu assunto dalla seconda moglie Mariana Paz de Miranda, mentre la gestione organizzativa e contabile fu affidata a padre Antonio de Sosa. A Juan da Nantes fu delegata la responsabilità tecnica, in sostituzione di Juan da Tolosa, il quale operò lasciando pressoché invariato il progetto originario<sup>115</sup>. Non sono chiari gli eventi che si sono susseguiti, ma dalla documentazione esistente si evince che nel biennio 1613-1614 Hernando Ruiz Envito de Peralta subentrò a Mariana Paz de Miranda, mentre fino al 1617 Francisco de Sosa ne seguì le procedure amministrative che, negli ultimi anni, saranno delegate a Juan García Girón;

---

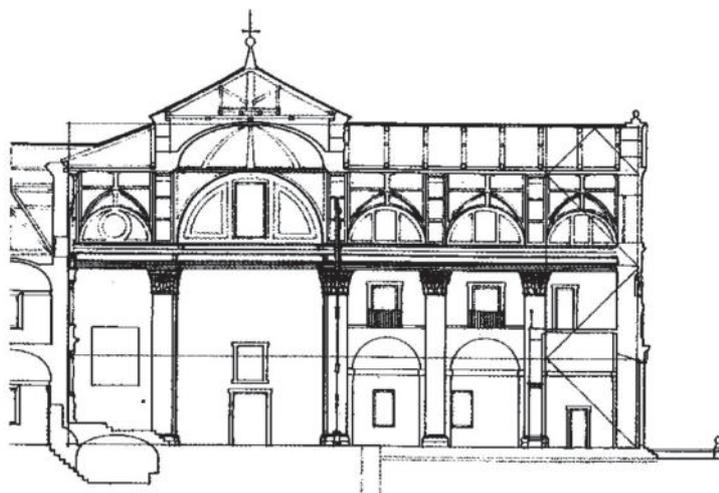
<sup>115</sup> Le modifiche apportate interessarono le opere accessorie non funzionali né alla realizzazione della struttura né alle attività che avrebbe dovuto ospitare. Tale scelta fu necessaria poiché la spesa economica ipotizzata per la sua realizzazione si raddoppiò.



EL HOSPITAL GENERAL DE MEDINA DEL CAMPO



*Fig. 19. Diapente inscrita en la planta de la iglesia*



*Fig. 20. Proporciones de la sección, derivadas del diapente de la planta*

Fig. 4.7 (pagina precedente) –  
Elaborato di pianta del piano  
terra e alzato del fronte  
principale su *Avenida Portugal*.

Fonte: Ponz, 1772-1976

Fig. 4.8 – Rappresentazione di  
pianta e sezione longitudinale  
della Chiesa annessa all'Hospital  
Simón Ruiz.

Fonte: Navarro García, 1998

## L'ARCHIVIO SIMÓN RUIZ

*L'importanza del complesso dell'Hospital Simón Ruiz è strettamente legata al nome del suo fondatore non solo per le attività di mercante-banchiere o le opere promosse nel corso degli anni, ma anche per il vasto archivio documentale che ha realizzato. La sua rilevanza è, infatti, dipendente dalla ricchezza di contenuto – in termini quantitativi, oltre che qualitativi e tematici – che lo compone e che risulta di fondamentale supporto per la conoscenza di Simón Ruiz. Envito sia come uomo in quanto tale, permettendo di comprenderne la personalità, che come uomo d'affari e personaggio politico nella Spagna del XVI secolo. A ciò si aggiunge la possibilità di rintracciare le evoluzioni e i cambiamenti che hanno caratterizzato il sistema delle comunicazioni vigente all'epoca.*

*Va precisato che, la relazione che lega il complesso ospedaliero all'Archivio Simón Ruiz non è solo dovuta al personaggio, ma anche alla volontà dello stesso di custodirne i documenti nell'Hospital Simón Ruiz, così come si evince dal testo della Concordia.*

*Dichiarato BIC nel 2017, attualmente, è sito presso il Museo de las Ferias in Medina del Campo ed è gestito dalla fondazione omonima, che si interessa della sua conservazione, promuovendo anche progetti di digitalizzazione al fine di* (continua)

- ad Alonso Ruiz de Roa è attribuita la supervisione<sup>116</sup> durante quasi tutto il periodo di costruzione del complesso (1597-1616);

- Francisco, Andrés e Antonio López di Segovia sono i *mastri* muratori e carpentieri che dal 1596 al 1617 si occuparono della realizzazione delle strutture murarie e delle coperture piane, a falde e voltate della fabbrica, organizzandone anche la fornitura dei materiali. Dai contratti redatti per l'esecuzione delle opere si evince che nel 1596 i López ebbero l'incarico di occuparsi della realizzazione delle coperture; ciò lascia presupporre che la maggior parte delle strutture murarie del complesso dovessero essere già concluse – appena tre anni dopo l'inizio dei lavori –. È del 1600, invece, la richiesta di legno per le ali Nord-Ovest e Sud-Ovest della corte e delle gallerie dei malati;

- le strutture in ferro – griglie di protezione delle finestre, ringhiere delle aperture dei piani superiori, porte, cancelli, etc. – furono realizzate da diversi artigiani che, tra il 1596 e il 1617, si susseguirono nei lavori della fabbrica. Miguel Hernandez fu incaricato direttamente da Simón Ruiz Envito di realizzare, in soli tre anni a partire dal 1596, i lavori nell'ala Nord-Est, nella Chiesa e nelle parti inferiori delle ali Nord-Ovest e Sud-Ovest, mentre ad Alonso Macías, fabbro di Medina del Campo, nel 1617, furono commissionati i balconi del fronte principale. I lavori furono eseguiti in modo differente, come mostrano gli elementi realizzati che assumono forme quadrate nel primo caso e circolari nel secondo. Infine, nel 1614, Pedro del Barco e Matias Ruiz, entrambi di Valladolid, furono chiamati a realizzare le tre porte di accesso principali al complesso, comprensive di scudi e serrature;

<sup>116</sup> Il supervisore svolge un ruolo da intermediario tra la parte amministrativa, tecnica ed economica della costruzione e coloro che, invece, devono provvedere alla realizzazione vera e propria: *El Sobrestante cumple una función intermedia en la organización administrativa de las obras. Actuaría bajo las indicaciones del administrador, desde el punto de vista económico, y ateniéndose a la defición del proyecto o instrucciones, en su caso, de los arquitectos (...)* Por otro lado, instruye a otros técnicos en la realización de los trabajos, y como tal se menciona su parecer en la organización y supervisión de los mismos. (Navarro García, 1998, p. 144)

- Marco Pérez di Berceruelo (Tordesillas) e Andrés García di Cardeñosa sono gli scalpellini addetti alla definizione delle parti lapidee del complesso. Nello specifico, Marco Pérez (1597) ricevette l'incarico di sgrossare le pietre calcaree provenienti dalla cava di Berceruelo per realizzare il colonnato del chiostro e i porticati che guardano al giardino esterno – fronti Nord-Ovest e Sud-Ovest –. Andrés García, invece, si occupò di realizzare il camino della cucina (1613), la fonte del chiostro e le strutture sferiche in pietra poste a decorazione nell'area antecedente il fronte principale su *Avenida Portugal* (1616);
- infine, Antón Pérez, Lazaro Andrés e Alonso de la Torre (1609 e 1614) eseguirono i lavori di decorazione e doratura delle parti interne della Chiesa annessa al complesso.

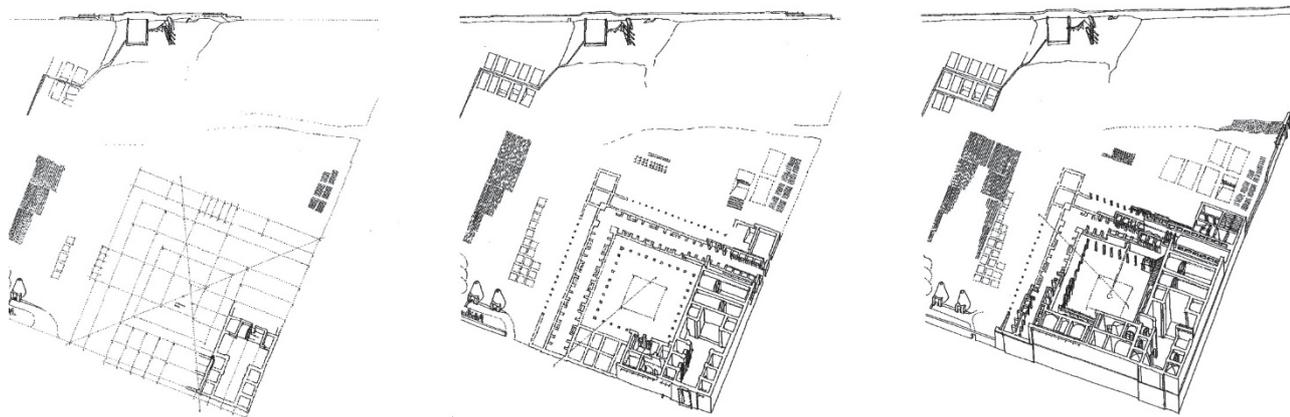
Sebbene una descrizione così puntuale delle fasi che hanno caratterizzato la costruzione dell'Hospital Simón Ruiz possa apparire, ad una prima analisi, distante da quelli che sono gli obiettivi perseguiti dalla presente ricerca, in realtà consente di fornire un quadro generale e una conoscenza più approfondita del complesso. Infatti, emergono chiaramente alcuni aspetti fondamentali concernenti non solo la sua storia costruttiva, ma anche l'importanza dell'esistenza di una documentazione che ne attesti univocamente lo sviluppo. Quest'ultimo aspetto risulta particolarmente significativo se relazionato alla frammentarietà di informazioni – e/o alla mancanza delle stesse – che, generalmente, connota lo studio del patrimonio storico-architettonico, con conseguenze sia nella definizione di un *repository* esaustivo che nella comprensione dello stesso.

La sequenza temporale che scandisce le lavorazioni condotte per l'ospedale medinense, mostra come la costruzione dell'edificio possa essere distinta in due fasi distinte ma continuative destinate, la prima, alla realizzazione delle opere murarie con la definizione della spazialità complessiva e, la seconda, alla realizzazione delle opere accessorie e di completamento. Il divario temporale che le caratterizza – pochi anni (1593-1597) per la prima e oltre un decennio per la seconda –, però, non

(segue)

*preservarne l'integrità.*

*L'inventario dei documenti, per numero e tipologia degli stessi, è in continuo processo di revisione. Con particolare riferimento nell'Hospital Simón Ruiz, ad oggi, sono stati riscontrate circa 200 box informativi e 20 pergamene in cui sono custoditi gli accordi stilati tra Simón Ruiz Envito e le autorità – civili e religiose – di Medina del Campo con i dettagli relativi alla costruzione del complesso, l'inventario delle merci, i censimenti dei beni dell'ospedale, i libri contabili con entrate e uscite non solo delle risorse economiche e materiali ma anche dei pazienti curati presso la struttura, bolle papali, testamenti, etc. Ciononostante, è tutta documentazione ancora da analizzare per la quale la fondazione ha indetto un progetto di studio e approfondimento per verificare la storia costruttiva ed evolutiva del complesso in relazione ad eventuali aspetti significativi che potrebbero emergere.*



Figg. 4.9 e 4.10 (pagina successiva) – Schematizzazione grafica delle fasi temporali di costruzione del complesso ospedaliero meridense.

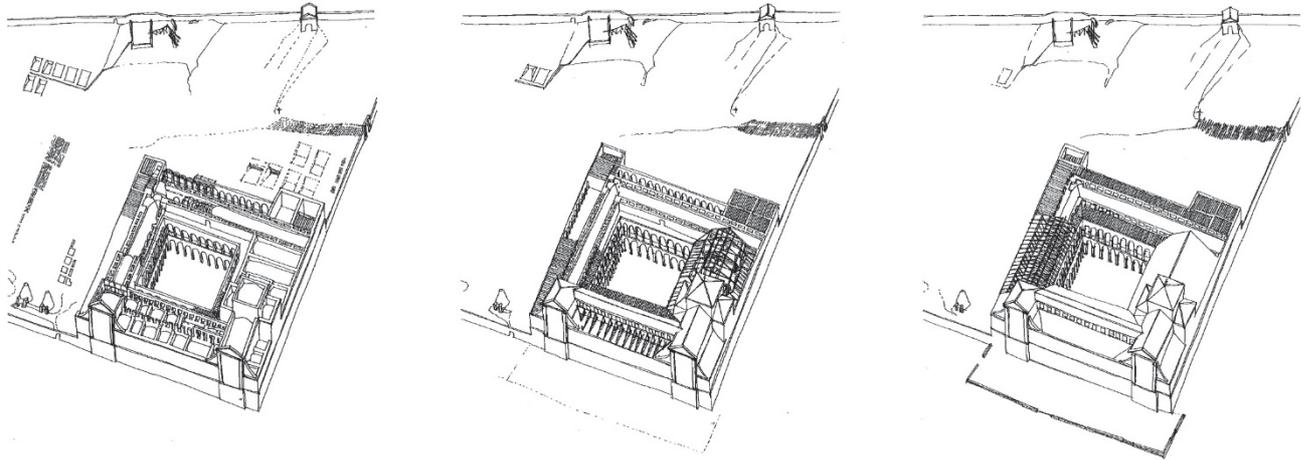
Fonte: Navarro García, 1998

rispecchia appieno le volontà di Simón Ruiz Envito, che aveva ipotizzato sia tempistiche differenti, con la realizzazione del complesso in un decennio, che la possibilità, ad una fase intermedia di lavorazione, di renderlo utilizzabile così da poter contribuire alla sua costruzione con finanziamenti derivanti dalle attività svolte al suo interno.

Ciò si lega alle riflessioni condotte da Luis Navarro García inerenti le dimensioni e la disposizione dei *mechinales* nei diversi fronti del complesso<sup>117</sup> (sia interni che esterni), ovvero dei fori d'ambito – o buche pontai – per l'alloggiamento degli impalcati a sostegno dell'esecuzione della costruzione. Queste, infatti, mettono in evidenza come l'edificazione del complesso sia avvenuta non tanto per livelli, quanto piuttosto per aree<sup>118</sup> (figg. 4.9 e 4.10).

<sup>117</sup> Ad esempio, per il fronte Nord-Est prospiciente *Calle Costado de Hospital*, Luis Navarro García individua dei fori quadrati di 18 cm, relazionando la proporzione individuata alla dimensione dei mattoni: *Estos mechinales (...) poseen una altura equivalente a dos biladas de ladrillo y sus correspondientes juntas* (Navarro García, 1998, p. 43). Queste si ripetono per 12 volte con una distanza di 86 cm circa.

<sup>118</sup> Si rimanda al testo di Luis Navarro García per un approfondimento sul tema (Navarro García, 1998).



## 4.2 Prime osservazioni sulla struttura formale e funzione del complesso

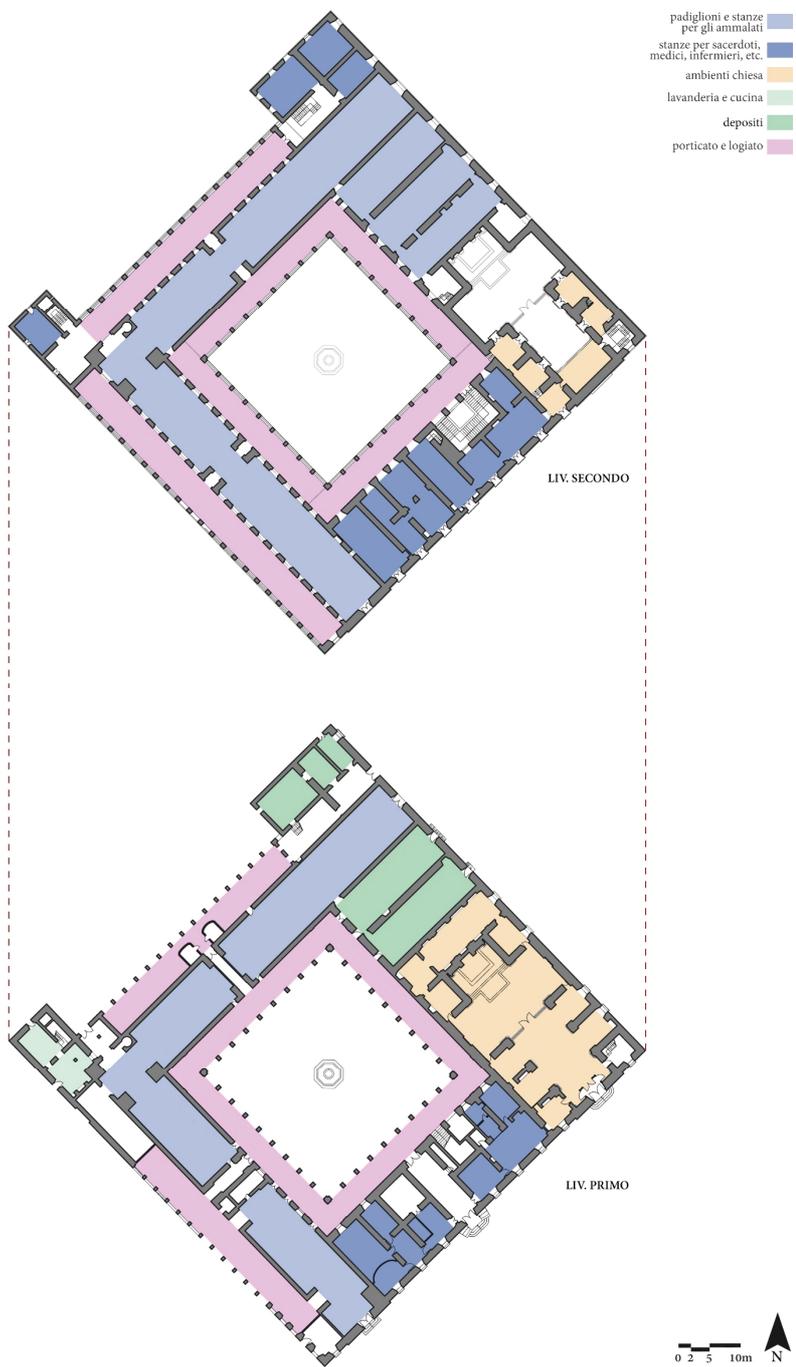
Organizzato intorno ad un'unica corte centrale, l'Hospital Simón Ruiz si presenta con un impianto di forma quadrata, che ibrida al suo interno le caratteristiche formali e funzionali dei modelli conventuali con quelle prettamente legate alle strutture ospedaliere. Lo sviluppo planimetrico si riflette su quello in elevato delineando una composizione innovativa per l'epoca di costruzione. Ciò dipende dalle scelte progettuali, le quali sono frutto di un complesso programma organizzativo volto da un lato alla corretta gestione dell'*ammalato*, nell'accoglienza, nella distribuzione<sup>119</sup> e nella permanenza all'interno dell'ospedale, dall'altro alla realizzazione di una opera caritatevole che, in generale, fosse dedicata a dare ospitalità, cure, sostegno spirituale e religioso, etc., a chiunque ne avesse bisogno.

---

<sup>119</sup> Tale aspetto si delinea attraverso una netta separazione tra donne e uomini, medici e infermieri, malati contagiosi e non contagiosi, etc. Ogni spazio del complesso assolve, in pratica, ad una funzione specifica al fine di renderlo efficiente e rispondente allo scopo.

Fig. 4.11 – Distribuzione funzionale degli ambienti costituenti l'Hospital Simón Ruiz.

Elaborazione M. Pulcrano



Una struttura austera e sobria, senza decorazioni se non per alcune eccezioni come, ad esempio, la Chiesa annessa al complesso, la chiusura voltata della scala di raccordo ai piani superiori e la fontana del giardino interno della corte.

#### **4.2.1 Descrizione degli ambienti che costituiscono il complesso**

L'accesso all'edificio avviene per mezzo di un ampio spazio esterno, che nel determinare il rapporto con la città medinense assume una triplice funzione. La prima, sicuramente, destinata a filtrare l'ingresso al complesso, veicolando i flussi in relazione agli ambienti prospicienti questo spazio e alle attività (fig. 4.11) a cui essi sono destinati. Una sorta di piazza delimitata da un basso muro in mattoni che, nell'anticipare il fronte lo distacca da *Avenida Portugal* e lo connota con una certa valenza visiva, altrimenti non percepibile. A questi aspetti, infine, si lega quello tecnico-costruttivo necessario per risolvere l'attacco a terra del fronte stesso realizzando un piano orizzontale che maschera la pendenza della strada e restituisce un equilibrio formale alla composizione.

I diversi ambienti costituenti il complesso – ad eccezione della Chiesa – confluiscono nella corte che, di conseguenza, ne rappresenta l'elemento di distribuzione formale e funzionale al piano terra.

Due ali della struttura – Nord-Ovest e Sud-Ovest – sono dedicate ad accogliere gli ammalati. Suddivise per sesso e tipologia di malattia, queste sono configurate come celle separate (fig. 4.12), secondo un'ottica tipica delle strutture conventuali, e sono dotate ognuna di una propria apertura al fine di consentire un'adeguata ventilazione delle stesse. Tale decisione progettuale è fortemente influenzata dalla volontà di limitare eventuali fenomeni di contagio all'interno dell'ospedale. Il riciclo d'aria è, inoltre, favorito dal particolare orientamento che il complesso presenta. Aspetto di rilevante importanza che, insieme all'obiettivo di ottenere un adeguato

Fig. 4.12 – Ala Sud-Ovest del complesso (primo piano – liv. secondo) destinata ad accogliere gli uomini affetti da malattie contagiose.

Foto M. Pulcrano



soleggiamento della struttura, porta a ruotare planimetricamente il complesso di circa 48° antiorari rispetto al Nord<sup>120</sup>.

Nell'estremo orientale, ad angolo tra *Avenida Portugal* e *Calle Costado de Hospital*, trova collocazione la Chiesa intitolata a *Nuestra Señora de la Concepción y al glorioso san Diego de Alcalá*, con una pianta a croce latina a navata unica e cappelle laterali. Separata dagli altri ambienti<sup>121</sup>, ma inserita nella composizione generale in una visione integrata e unitaria. Presenta un imponente cancello su base in pietra (fig. 4.13) che delimita l'area pubblica destinata ai fedeli – la navata, le cappelle e il coro – accessibile

<sup>120</sup> Un'approfondita disamina sulla questione è trattata nel testo di Luis Navarro García (Navarro García, 1998).

<sup>121</sup> Il collegamento con l'interno del complesso avviene mediante un unico accesso posto nel transetto della Chiesa.

dall'esterno, dall'area dedicata alle attività religiose e cristiane proprie dell'ospedale – il transetto, l'altare e la sagrestia –. Dal punto di vista decorativo, gli interni della Chiesa si presentano piuttosto semplici e con pochi elementi che li caratterizzano per dimensioni, colore e significato, come i capitelli corinzi delle lesene trattati in oro e blu, il Calvario che sovrasta il cancello di separazione tra la navata e il transetto, la Pala d'Altare posta sulla parete di fondo o l'iscrizione in oro nella cornice che segna l'imposta del sistema voltato.

Completano la composizione planimetrica del piano terra alcuni ambienti accessori dedicati a funzioni amministrative e di servizio – cucina, lavanderia, stoccaggio merci, depositi, etc. –.

La scala posta nell'ala Sud-Est – accessibile solo dalla corte interna – consente di collegare i due piani del complesso ospedaliero, la cui organizzazione appare molto simile, replicando, nel primo piano, sia la disposizione e dimensione degli ambienti, che le attività a cui sono destinati. Qui, i diversi porticati presenti al piano inferiore si trasformano in loggiati, mutando talvolta anche il loro ruolo funzionale. Ciò si verifica soprattutto per quelli centrali posti in corrispondenza della corte che oltre ad aprire i fronti verso l'esterno per migliorare il soleggiamento e la ventilazione, consentono di collegare i diversi ambienti e distribuire i vari accessi.

Mentre scale di servizio, consentono di raggiungere i piani ammezzati delle ali Nord-Ovest e Sud-Ovest, e l'ultimo livello che completa il fronte principale su *Avenida Portugal*.

Infine, la cappella esterna, il piccolo cimitero, le stalle e il giardino esterno (adibito a frutteto) completano l'organizzazione funzionale dell'Hospital Simón Ruiz, secondo la visione e il ruolo complessivo attribuito alla struttura dal suo fondatore<sup>122</sup>.



Fig. 4.13 – Vista interna della Chiesa e del cancello che separa la navata dal transetto.

Foto M. Pulcrano

---

<sup>122</sup> Come descritto all'articolo I della *Concordia: Los dichos Consejo, Justicia y Regimiento de esta dicha villa dijeron que daban y dieron y condedieron a1 dicho Sim6n Ruiz (...)* el sitio que fuere necesario para fundar la capilla-iglesia, sacristía, cementerio y hospital con cuartos distintos y apartados para que con seguridad y comodidad puedan ser curados todos los enfermos de todas enfermedades que en él se



Fig. 4.14 – Particolare della fascia verticale che caratterizza l'ingresso alla Chiesa nel fronte principale su *Avenida Portugal*.

Foto M. Pulcrano

#### 4.2.2 Letture preliminari della composizione dei fronti del complesso

Registri linguistici differenti descrivono i fronti del complesso e mostrano radicali cambiamenti nei rapporti pieni/vuoti che li caratterizzano. Ampie aperture per la connessione diretta e/o puramente visiva con le aree verdi esterne – ma ad uso esclusivo del complesso, per cui private, e fondamentali per la degenza degli ammalati –, si contrappongono alla prevalenza di parti piene connotanti i fronti su *Avenida Portugal* e *Calle Costado de Hospital*, rese necessarie per filtrare le relazioni con la città. Ciononostante, è chiaramente leggibile la forte orizzontalità che li connota e li accomuna, quale espressione del rapporto proporzionale che sussiste tra lo sviluppo longitudinale e l'altezza complessiva delle strutture murarie. Percezione talvolta smorzata con l'introduzione di specifici elementi – come accade per il fronte su *Avenida Portugal* in corrispondenza degli accessi i quali si sviluppano secondo fasce verticali (fig. 4.14) – o bruschi cambiamenti nella composizione formale. Analogamente anche la volontà di mantenere costante e regolare la disposizione e le dimensioni delle molteplici tipologie di aperture, sebbene sia un aspetto prevalente e determinante nella definizione dei fronti, non sempre riesce ad essere rispettata. Resta immutato, invece, l'uso del mattone che oltre ad essere funzionale alla realizzazione delle opere murarie diviene anche elemento decorativo delle stesse, ridisegnando specifici elementi come piattabande e archi nella loro tessitura (fig. 4.15).

Dunque, il fronte principale su *Avenida Portugal* (fig. 4.1) mostra un'apparente simmetria tradita, in realtà, dalla posizione non perfettamente in asse dell'accesso centrale e dalle aperture poste ai lati. La disposizione dei diversi elementi, se ad una prima lettura può apparire un errore nella composizione del fronte, in realtà mostra un chiaro disegno

---

*recogieren y pueda haber el daustro y todos los aposentos y oficinas, buerta, corrales en tal fábrica necesarios (...).* (Navarro García, 1998, p. 262)



Fig. 4.15 – Fronte Nord-Ovest prospiciente il giardino interno del complesso.

Foto M. Pulcrano

progettuale dato dalla volontà di riequilibrare le corrispondenze assiali e le percezioni visive con i diversi elementi interni. In particolare con la corte la cui collocazione, leggermente traslata nello schema planimetrico su base quadrata (Cfr. par. 6.1.1), ha di fatto imposto la disposizione asimmetrica del portale di accesso.

L'eterogeneità formale e funzionale che caratterizza gli ambienti alle spalle del fronte, invece, non ne ha influenzato in maniera evidente lo sviluppo. Le aperture che lo connotano, infatti, appaiono – ad una prima lettura a vista – descrittive di un preciso ordine ritmico, dove l'alternanza delle parti piene e vuote si delinea in modo costante e regolare secondo un unico disegno ben definito e senza lasciar trapelare le differenze spaziali e funzionali degli ambienti interni. Esemplificativo di ciò sono gli accessi laterali che, trattati similmente<sup>123</sup>, non consentono di definire

---

<sup>123</sup> Stesso schema generale nella composizione, ma presentano leggere variazioni sia nelle dimensioni (9.89 m l'accesso all'ala Sud-Ovest posto a sinistra, 10.84 m quello opposto della Chiesa), che negli elementi decorativi.

aprioristicamente che alle spalle di quello destro si cela la Chiesa annessa al complesso.

Diversamente, il fronte su *Calle Costado de Hospital* assume un ruolo secondario nella composizione generale, mostrando una prevalenza di parti piene che si dispongono con ritmi non regolari. Nonostante il muro di fondo del transetto sia una presenza chiaramente individuabile, la percezione di forte orizzontalità che connota il fronte è sottolineata dalle cornici marcapiano – unici elementi decorativi presenti – e dalla continuità con il muro di cinta del giardino retrostante.

I fronti interni che guardano agli spazi aperti del complesso, invece, sostituiscono alla percezione di chiusura, la trasparenza derivante dalle ampie aperture che li connotano. Sebbene siano riferiti ad aree differenti per dimensione e funzione, presentano tratti comuni tra loro e non riscontrabili nei fronti esterni, sia nella composizione materica che in quella formale. Con l'introduzione del materiale lapideo (granito) nella realizzazione dei pilastri posti a sostegno delle arcate inferiori, ad esempio, si rompe il senso di monoliticità legato all'uso esclusivo del mattone – leggibile nei fronti su *Avenida Portugal* e in *Calle Costado de Hospital* –. Mentre, la successione delle stesse, nello sviluppo longitudinale e verticale, consente una configurazione formale che, nonostante le variazioni riscontrabili, tende a far apparire i fronti della corte e quelli del giardino dipendenti da una unica visione unitaria nella composizione interna del complesso.

In particolare, i fronti prospicienti la corte (fig. 4.16) sono descritti da un doppio ordine di arcate – nove per lato – allineate lungo l'asse verticale, secondo una sequenza diretta e continua di aperture che collegano – in alzato – il porticato inferiore e il loggiato superiore. Mentre quelli verso il giardino, presentano una fascia di finestre interposta tra le arcate e parti piene che ne limitano lo sviluppo longitudinale.

È chiaro che, in entrambi i casi, a quelle inferiori è dato di mediare il rapporto tra le aree coperte e scoperte del complesso definendo l'attacco a terra del fronte – tale aspetto di evince soprattutto nei fronti che



Fig. 4.16 – Vista della corte interna e dei fronti Nord-Ovest e Sud-Ovest che la delimitano.

Foto M. Pulcrano

guardano verso il giardino –, mentre a quelle superiori – come precedentemente detto – sono destinate funzioni di collegamento tra i vari ambienti che costituiscono il piano di riferimento.



CAPITOLO QUINTO

**L'HOSPITAL SIMÓN RUIZ ATTRAVERSO  
RILIEVI *REALITY-BASED***

**Procedure di integrazione dati *range-based* e  
*image-based* per la documentazione del sito**

Le esperienze condotte in riferimento allo studio del patrimonio storico-architettonico e alle attività ad esso connesse spingono verso l'applicazione di procedure integrate di acquisizioni dati multisensore, come mostrato nel capitolo primo. L'uso combinato consente, infatti, di colmare le eventuali lacune presenti nel singolo dato, migliorare la qualità complessiva del risultato, contenere i tempi di elaborazione e limitare l'ingestibilità della nuvola di punti finale. Inoltre, l'applicazione di diverse tecniche e tecnologie spesso diviene il presupposto affinché sia possibile estrarre prodotti digitali differenziati rispetto alle molteplici esigenze che possono palesarsi.

In tale ottica si muove la sperimentazione applicata all'Hospital Simón Ruiz nell'acquisizione dei dati spaziali. La condizione di precarietà in cui versa l'intero complesso, sviluppatasi repentinamente in pochi decenni a

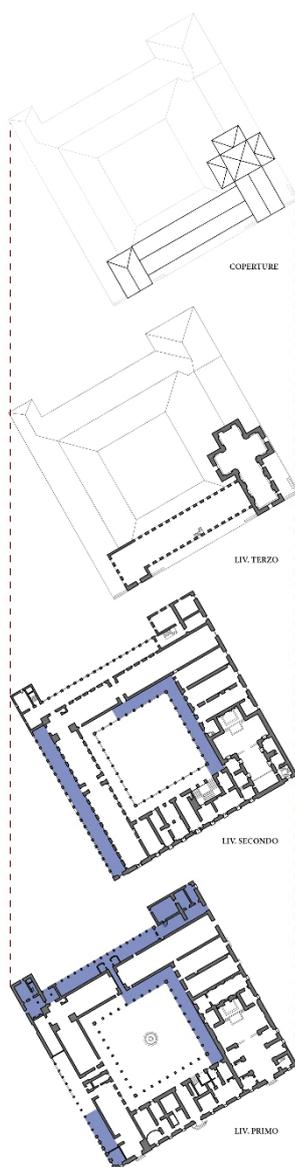


Fig. 5.1 – Piante del complesso dell'Hospital Simón Ruiz con messa in evidenza (in blu) delle aree con scarse condizioni di sicurezza e, di conseguenza, non accessibili.

Elaborazione M. Pulcrano.

causa dell'abbandono, impedisce persino l'accesso in alcuni ambienti. Ciò ha reso indispensabile il ricorso a rilievi *no-contact* con strumentazioni *reality-based* al fine di produrre, in tempi brevi, un risultato tridimensionale digitale ricco di dati, accurati dal punto di vista metrico e geometrico.

In particolare, due campagne di rilievo *range-based*, avvenute in momenti temporalmente differenti, sono state condotte al fine di restituire la struttura morfologica del complesso, rilevando sia gli elementi esterni che parte degli ambienti interni. A questo primo dato sono state implementate ulteriori informazioni quando, durante la ricerca, si è palesata l'opportunità di utilizzare documentazione descrittiva e informativa preesistente – videoriprese acquisite tramite SAPR – sviluppata con l'obiettivo di mappare lo stato di conservazione dell'intera area. L'integrazione dei suddetti dati ha posto quesiti in merito alle procedure più idonee da replicare, oltre che interrogativi sulle potenzialità e criticità nell'utilizzo di dati eterogenei, al fine di ottenere un modello metricamente affidabile da porre come riferimento per le successive fasi.

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

Un primo sopralluogo all'area di studio si è rivelato fondamentale per pianificare adeguatamente le attività di rilievo e individuare la strumentazione idonea all'acquisizione dei dati, visti i molteplici vincoli che l'Hospital Simón Ruiz ha imposto, sia in termini di dimensioni e distanze, sia per la percorribilità dell'intero complesso (fig. 5.1). Ulteriori valutazioni sulla conformazione degli spazi, sul modo in cui si relazionano e sugli ambienti che ne filtrano le connessioni, hanno portato alla scelta dei sensori attivi come tecnologia per l'acquisizione dei dati morfo-metrici, materici e colorimetrici. Tali tecnologie, infatti, viste le caratteristiche proprie del sensore che utilizzano, consentono di ottenere informazioni a diversi livelli, dai dati volumetrici complessivi a quelli di dettaglio,

prescindendo dalle condizioni di illuminazione a cui è sottoposta la scena<sup>124</sup>.

#### ▪ **Prima campagna di acquisizione: Aprile 2018**

Tra i sistemi *range-based* esistenti, è stato utilizzato il laser scanner Faro FOCUS 3D s120<sup>125</sup> in dotazione al TIR, il Laboratorio di Tecniche e Tecnologie Innovative per il Rilievo e la Rappresentazione, del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II".

Lo strumento è un *phase shift*<sup>126</sup> panoramico multisensore<sup>127</sup>, con campo di acquisizione pari a 360° sul piano orizzontale e 300° sul piano verticale<sup>128</sup>, mentre la portata massima di acquisizione stimata rientra nelle medie distanze ed è pari a 120 m<sup>129</sup> – come indicato anche dalla sigla che lo

---

<sup>124</sup> Per loro natura, i sensori attivi, essendo basati sull'emissione di un raggio LASER, rilevano anche in totale assenza di luce o, per contro, con elevata esposizione. Ciononostante, condizioni di illuminazione fortemente compromesse possono influire nell'acquisizione della misura, che potrebbe apparire imprecisa e inaccurata; per cui, è buona norma, tenere in considerazione anche questo come fattore rilevante nella progettazione del rilievo.

<sup>125</sup> <https://www.faro.com/>

<sup>126</sup> Ovvero, utilizza la tecnologia il cui sistema di misurazione è basato sulla lettura della differenza – sfasamento – tra l'onda emessa e quella ricevuta in seguito alla riflessione sulla superficie dell'oggetto. Lo sfasamento viene letto in corrispondenza della cuspidine della sinusoide che caratterizza la forma del raggio laser.

<sup>127</sup> Bussola elettronica, barometro, compensatore biassiale e inclinometro elettronico costituiscono la sensoristica associata al Faro FOCUS 3D s120, grazie alla quale si è in grado di registrare nella nuvola di punti acquisita, oltre all'orientamento corretto, anche la sua posizione in altezza (per rilievi effettuati su piani differenti) e l'inclinazione, necessari nelle fasi di elaborazione del dato per rendere maggiormente automatizzato il processo di registrazione e unione delle varie *scan position*.

<sup>128</sup> La limitazione sul piano verticale consente di escludere dalla ripresa l'angolo di campo coincidente con l'installazione del treppiedi di supporto.

<sup>129</sup> Mentre la distanza minima di acquisizione è di 60 cm.



Fig. 5.2 – *Target* bidimensionali e tridimensionali utilizzati nei rilievi *range-based* dell'Hotel Simón Ruiz.

Foto M. Pulcrano.

caratterizza –. È riconosciuto tra i laser scanner più veloci, tant'è vero che riesce ad acquisire fino a 976.000 punti al secondo, con una precisione di circa 2 mm su distanze di 25 m. Il controllo remoto, tramite rete WLAN e *App* su dispositivo *mobile*, consente di non intralciare l'operatività dello strumento e di ridurre la presenza di rumore nella nuvola di punti, dovuto alla ripresa accidentale dell'operatore<sup>130</sup>. Infine, la camera integrata consente di associare alla nuvola di punti anche l'informazione di colore (espressa mediante codice RGB), se si attiva l'impostazione per l'acquisizione contestuale degli scatti fotografici. La posizione coassiale del sensore fotografico e di quello ottico riduce, di fatto, i problemi di parallasse che potrebbero verificarsi con posizioni delle ottiche leggermente divergenti.

Il Faro FOCUS 3D s120 rientra nei sistemi di misurazione statica e, com'è ben noto, per strumentazioni di questo tipo sono necessarie diverse *scan position* per l'acquisizione di ampie aree, collegate mediante *target* artificiali o naturali. Per il rilievo dell'Hotel Simón Ruiz, si è scelto di ricorrere a quelli artificiali, sia bidimensionali che tridimensionali<sup>131</sup> (fig. 5.2), associati allo strumento e riconosciuti in automatico dal *software* proprietario Faro SCENE. Tre *target* – indifferentemente dalla tipologia – in riprese consecutive sono necessari e sufficienti per rototraslare una *scan position*

<sup>130</sup> A ciò va aggiunto anche il fattore sicurezza che si amplia potendo prevedere una distanza maggiore dallo scanner laser. A tal proposito, va precisato che già in fase di settaggio dei parametri di acquisizione, a seconda delle impostazioni previste per la *scan position*, viene definita la distanza minima da rispettare (in direzione assiale e radiale) al fine di garantire l'incolumità delle persone presenti nella scena essendo il Faro FOCUS 3D s120 classificato come un laser di categoria 1.

<sup>131</sup> Ogni strumento e casa produttrice prevede supporti appositamente studiati e progettati al fine di rendere più agevole il processo di rilievo. Per la casa Faro®, i *target* bidimensionali – *checkerboard* – sono caratterizzati da quattro quadrati (due bianchi e due neri) disposti alternati in modo da formare una scacchiera, di cui viene calcolato il centro sulla base dei bordi individuati. Mentre quelli tridimensionali – *sphere* – sono costituiti da una sfera in plastica (diametro 14,5 cm) rivestita con vernici speciali e completata da una base magnetica per favorire l'aggancio anche su supporti metallici. Forma, dimensioni, colore e materiali che caratterizzano i *target* consentono al *software* di individuarli automaticamente nei processi di *editing* del dato.

rispetto all'altra, ma nella progettazione del rilievo e della loro collocazione nel complesso ospedaliero, è stata prestata particolare attenzione affinché ne fossero visibili in numero maggiore, in modo da ridurre la percentuale di errore nell'allineamento. Inoltre, sempre per migliorare la registrazione delle diverse nuvole di punti, gli stessi sono stati disposti uniformemente nella scena in modo da non risultare allineati e complanari tra loro, né equidistanti dallo strumento.

La messa in stazione del laser scanner e il posizionamento dei *target*, quindi, sono stati scelti in seguito alla valutazione delle caratteristiche del manufatto, oltre che della portata massima e della precisione dello strumento. Il percorso di scansione (fig. 5.5), invece, è stato dettato dalla volontà di acquisire i dati necessari alla lettura del complesso evitando la formazione di zone prive di informazione o caratterizzate dalla presenza di rumore e dati non rilevanti.

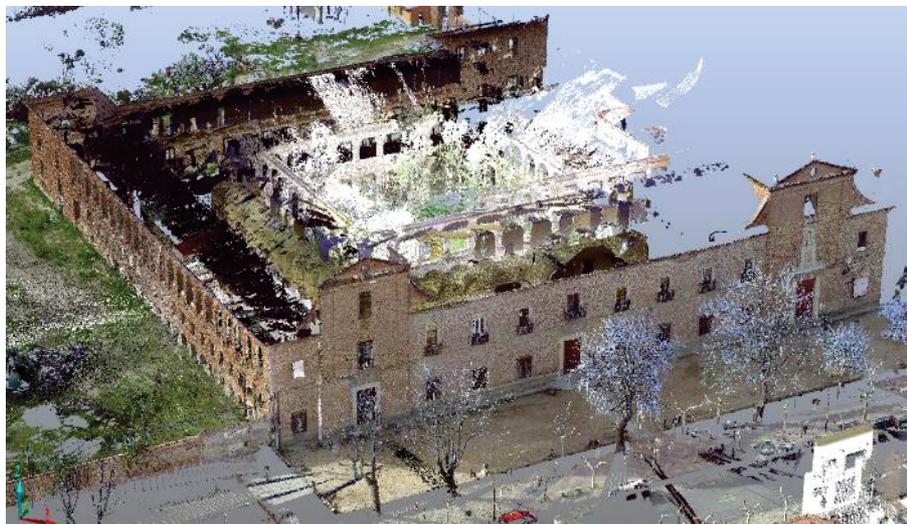
A partire dal fronte principale in *Avenida Portugal*, la fase di campagna è stata incentrata prevalentemente sugli spazi esterni del complesso pervenendo alla definizione dei fronti che caratterizzano il giardino e la corte. I rilievi d'angolo e in ambienti di collegamento hanno permesso di unire tra loro le *scan position* e ottenere un risultato complessivo formato da 42 stazioni<sup>132</sup> per un totale di 434.822.287 punti (fig. 5.3). La sovrapposizione delle nuvole, se da un lato permette di aumentare la definizione delle superfici scansite e di ottenere un'informazione più completa, dall'altro comporta una ridondanza del dato e un incremento delle dimensioni del *file*. Per cui, per ottimizzare tempi di ripresa ed elaborazione del dato, oltre che per facilitarne la gestione nelle operazioni successive, le scansioni effettuate presentano impostazioni differenti. Nello specifico, la risoluzione – ovvero il numero di punti da acquisire – è variata con un passo compreso tra i 6 mm e i 12 mm sulla distanza di

---

<sup>132</sup> Nello specifico, le scansioni sono state organizzate nel seguente modo: n. 3 per il fronte principale, n. 11 per il fronte Sud-Ovest, n. 7 per il fronte Nord-Ovest, n. 13 per la corte interna e, infine, n. 3 per gli ambienti di collegamento. Purtroppo, alcune *scan position* non sono state correttamente registrate dallo strumento per cui risultano prive di dati.

Fig. 5.3 – Nuvola di punti complessiva della prima campagna di acquisizione (Aprile 2018). Vista tridimensionale nel software Faro SCENE.

Elaborazione M. Pulcrano.



riferimento di 10 m, mentre l'accuratezza della misura – numero di misurazioni successive per la valutazione della distanza media – è stata definita con tripla battitura del punto (3x). Con tali settaggi, le diverse *scan position* presentano una risoluzione di 10310x4267 pts, 8248x3414 pts e 5156x2134 pts e un tempo di acquisizione, rispettivamente, di circa 5,30 minuti, 4,15 minuti e 2,50 minuti.

Infine, è stato scelto di acquisire anche le informazioni di colore con scatti fotografici eseguiti con la camera integrata al laser scanner. Fanno eccezione alcuni ambienti interni per i quali è stato ritenuto sufficiente il solo dato geometrico e di riflettanza, in quanto le scarse condizioni di illuminazione naturale e l'assenza di quella artificiale avrebbero generato immagini troppo scure, pregiudicando la leggibilità finale della scansione.

#### ▪ Seconda campagna di acquisizione: Luglio 2018

A distanza di pochi mesi, è stata condotta una seconda campagna di rilievo, che ha consentito di sperimentare il Faro FOCUS 3D x330 messo a disposizione dall'*Ayuntamiento di Medina del Campo*. Per quanto simile al precedente modello utilizzato, il nuovo sistema si differenzia

prevalentemente per la portata massima, che risulta essere circa tre volte superiore essendo stimata un'acquisizione fino ai 330 m, e per la presenza di ricevitore GPS.

Replicando le modalità e i principi applicati precedentemente, con questa seconda fase sono state acquisite porzioni degli interni ritenuti significativi alla comprensione dello sviluppo del complesso, come la Chiesa annessa (n. 9 *scan position*), la scala di raccordo con i piani superiori (n. 4 *scan position*) e gli ambienti prospicienti il fronte principale (n. 9 *scan position*) (fig. 5.4 e fig. 5.5). Anche in quest'occasione sono state utilizzate *checkerboard* e *sphere* per agevolare l'allineamento delle diverse *scan position*, che presentano impostazioni di risoluzione simili alle precedenti.

La nuvola di punti complessiva risulta composta da 30 scansioni, alcune delle quali (n. 5 *scan position*) riprendono nuovamente parte del fronte principale e dell'ala Sud-Est della corte per favorire l'allineamento col primo rilievo. Le restanti *scan position* (n. 3) interessano l'altro fronte su *Calle Costado de Hospital*.

Il modello complessivo della seconda campagna di rilievo risulta composto da 305.040.196 punti totali.

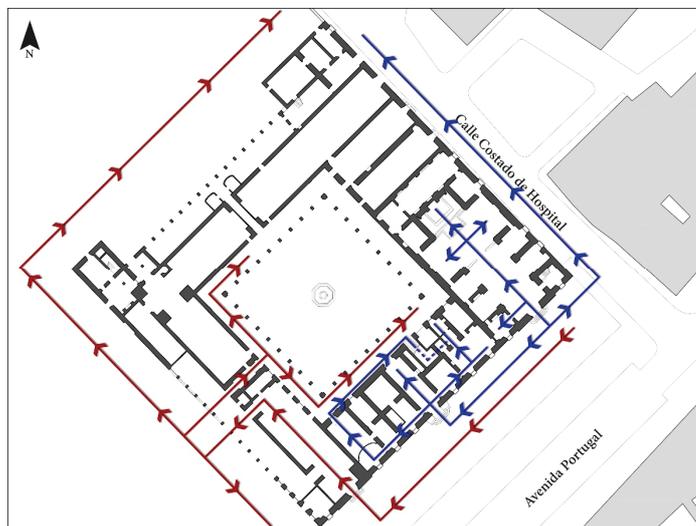


Fig. 5.4 – Nuvola di punti complessiva della seconda campagna di acquisizione (Luglio 2018). Vista tridimensionale nel software *Faro SCENE*.

Elaborazione M. Pulcrano.

Fig. 5.5 – Schema riassuntivo del percorso di scansione seguito durante i rilievi *range-based* dell'Hospital Simón Ruiz: in rosso è evidenziata la prima campagna di acquisizione (Aprile 2018), mentre in blu la seconda (Luglio 2018).

Elaborazione M. Pulcrano.



### 5.1.1 Elaborazione e integrazione dei dati di rilievo *range-based*

L'allineamento delle diverse riprese è stato ottenuto mediante i *target* artificiali apposti nella scena, mentre l'integrazione dei dati delle due campagne di acquisizione, ovvero la registrazione secondo un unico sistema di riferimento relativo, è stata operata attraverso l'individuazione di *target* naturali all'interno del *software* proprietario *Faro SCENE* associato alla strumentazione utilizzata. Diverse fasi, con procedure automatizzate e manuali, sono state necessarie al fine di giungere ad un'unica nuvola di punti complessiva dell'Hospital Simón Ruiz.

Nello specifico, il primo blocco di scansioni allineato è stato quello relativo ai rilievi effettuati in Aprile. A partire dalla verifica della corretta individuazione dei *target* di riferimento<sup>133</sup>, si è proceduto con la collocazione dei diversi punti di ripresa, individuando la *scan position* di

<sup>133</sup> L'operazione ha dato buoni risultati, con circa l'90% di *target* identificati correttamente; si sono, però, verificate delle eccezioni in cui si è provveduto a ricalibrare il risultato, individuando manualmente *checkerboard* e *sphere*.

riferimento in funzione della quale rototraslare tutte le altre. È stato scelto di non delegare l'operazione agli automatismi previsti dal *software*, che permettono di procedere con l'allineamento contestuale di tutte le riprese, ma, di operare manualmente individuando, di volta in volta, la *scan position* di riferimento, quella da registrare e quelle da mantenere fisse<sup>134</sup>. In tal modo, oltre a diminuire l'onere computazionale, è stato mantenuto sotto controllo il processo, validando i risultati prodotti, non solo graficamente con la *vista corrispondenza*<sup>135</sup>, ma anche attraverso i *report* di sintesi redatti dal *software*, che riportano la tensione dei *target*<sup>136</sup>, espressa anche mediante deviazione (fig. 5.6).

Le *scan position* del fronte principale sono state impostate come riferimento iniziale per l'allineamento progressivo delle successive, fino a completare il blocco della prima campagna di acquisizione. Dall'analisi dei diversi *report*, i valori medi riscontrati<sup>137</sup> (dai 3,5 mm ai 5 mm) sono stati ritenuti accettabili, per cui si è proceduto con l'allineamento del secondo blocco.

---

<sup>134</sup> Il *software Faro SCENE* consente di caratterizzare le nuvole di punti come elementi bloccati, in modo da fissarne la collocazione. Nel caso specifico del processamento dei dati dell'Hospital Simón Ruiz, sono rese fisse le *scan position* già registrate affinché le operazioni eseguite per l'allineamento delle altre, non ne modificano accidentalmente posizione e orientamento.

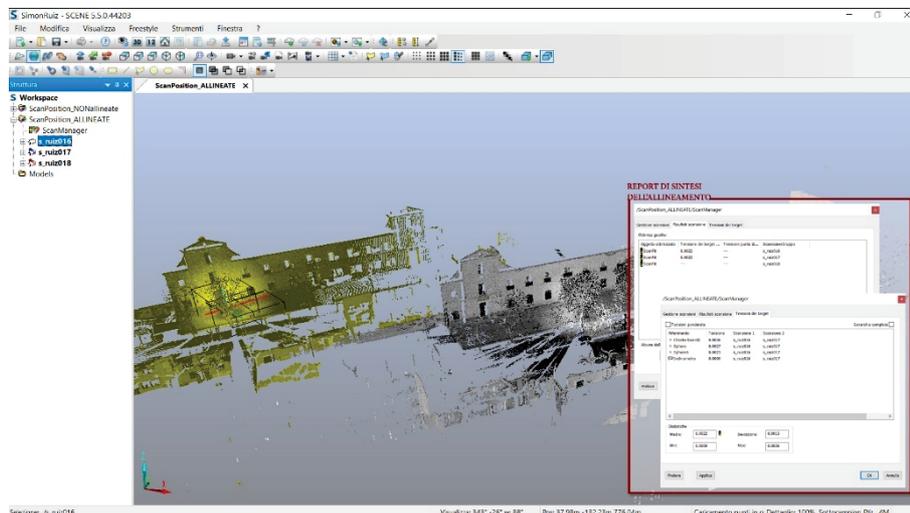
<sup>135</sup> Consente di visualizzare le nuvole di punti presenti nel progetto di scansione e la relativa collocazione. Per ottimizzare la gestione grafica della *vista corrispondenza*, è possibile definire il numero di punti massimo da caricare per ogni *scan position*, secondo un *range* di valori che va da 1.000.000 ad illimitato.

<sup>136</sup> Descrive la differenza nei valori delle coordinate del punto (o elemento) di riferimento nelle due scansioni interessate dal processo di allineamento.

<sup>137</sup> Per valori superiori emersi durante la fase di allineamento si è provveduto a migliorare l'individuazione del *target* e, se necessario, ad aggiungerne altri di tipo naturale, al fine di ottenere valori di tensione non eccedenti i 5 mm così da garantire un'accuratezza metrica elevata alla nuvola di punti complessiva.

Fig. 5.6 – Registrazione delle diverse *scan position* nel *software Faro SCENE*: impostazioni di riferimento per il processo di allineamento e *report* di sintesi (in giallo la *scan position* da registrare).

Elaborazione M. Pulcrano.



Il lasso di tempo intercorso tra i due rilievi *range-based* ha comportato la perdita di riferimenti comuni tra le acquisizioni; infatti, sebbene siano stati collocati *target* artificiali in posizioni strategiche, non è stato possibile rinvenirli in sito durante la campagna di Luglio. Ciononostante, i dati acquisiti sono stati integrati individuando manualmente, con le funzionalità specifiche<sup>138</sup> messe a disposizione dal *software Faro SCENE*, *target* naturali nelle diverse *scan position* che riprendono le stesse aree. In particolare, i piani delle pareti e di alcuni elementi architettonici presenti nel fronte principale sono divenute le corrispondenze sulle quali sono stati allineati gli ambienti della Chiesa e il fronte su *Calle Costado de Hospital* (fig. 5.7). La scala e gli ambienti del centro medico, invece, sono stati registrati grazie alle *scan position* effettuate nella corte. Anche in questo caso, di volta in volta, sono stati valutati risultati e *report* delle diverse registrazioni,

<sup>138</sup> In particolare, la *doppia vista corrispondenza* – settata in modalità rapida, ovvero navigando l'immagine sferica associata alla scansione – che consente di visualizzare contestualmente sia la *scan position* di riferimento che quella da allineare. A ciò si aggiunge la *toolbar* dei contrassegni per l'individuazione dei *target* artificiali (*target* circolare piatto, *checkerboard* e *sphere*) e naturali (piano, lastra e punto di scansione) sulla base dei quali valutare le corrispondenze e l'allineamento.



Fig. 5.7 – Registrazione delle *scan position* della prima e della seconda campagna di rilievo mediante l'individuazione di *target* naturali nella *doppia vista corrispondenza*.

Elaborazione M. Pulcrano.

ottenendo valori medi di tensione e deviazione compresi in un *range* che varia dai 4 mm ai 7,5 mm<sup>139</sup>.

Terminata la fase di registrazione si è provveduto a caratterizzare la nuvola di punti con l'informazione del colore, associando ad ogni punto il corrispettivo valore RGB. Il processo è stato eseguito in automatico per tutte le scansioni, consentendo al *software* di procedere con la proiezione delle immagini fotografiche<sup>140</sup> sulla nuvola di punti complessiva e con

<sup>139</sup> Valori leggermente superiori ai 5 mm sono stati ritenuti comunque accettabili – a differenza della registrazione del primo blocco di nuvole – viste le difficoltà riscontrate nell'apposizione dei *target* in alcune zone (ad esempio nel fronte su *Calle Costado de Hospital*) che ne hanno impedito una collocazione adeguata. Inoltre, rientrano in tale sintesi anche i valori riportati dai *report* per l'allineamento delle aree comuni ai due rilievi, che, come detto, sono basati prevalentemente su *target* naturali, i quali sono strettamente legati alla nuvola di punti. È naturale che, pur essendo la medesima porzione, il rilievo in momenti e con strumentazioni differenti presenta caratteristiche simili, ma al contempo molto diverse (soprattutto per il grado di infittimento che la nuvola di punti può presentare). Per cui, fatte tali premesse, i valori medi riscontrati sono stati considerati accettabili.

<sup>140</sup> Al termine delle operazioni, nella struttura ad albero della singola *scan position* è possibile visualizzare i *frames* catturati dal laser scanner nell'apposita cartella (*pictures*).



Fig. 5.8 – Esempificazione dei correttivi grafici apportati alle singole nuvole di punti. Immagini *pre* e *post* elaborazione dei processi di applicazione del filtro *contrasto colore* e del *bilanciamento dei bianchi*.

Elaborazione M. Pulcrano.

l'applicazione dei relativi algoritmi di correzione per migliorarne la corrispondenza.

Successivamente, mediante analisi visive della nuvola di punti, sono stati scelti i correttivi manuali di *editing* fotografico da apportare, settando i parametri del *filtro contrasto colore* e del *bilanciamento dei bianchi*, al fine di migliorare la colorazione delle nuvole di punti che per condizioni di illuminazione sono risultate scarsamente leggibili o non sufficientemente aderenti alla realtà (fig. 5.8).

### 5.1.2 Operazioni di *post-processing* della nuvola di punti

La nuvola di punti complessiva – 67 *scan position* per un totale di circa 740 milioni di punti totali – è stata oggetto di fasi di *post-processing* volte alla segmentazione in blocchi e alla riduzione del rumore, al fine di agevolare la gestione del dato nelle fasi successive di interpretazione e restituzione del rilievo.

#### ▪ Segmentazione

La segmentazione è avvenuta all'interno del *software Faro SCENE* suddividendo le scansioni in gruppi secondo una corrispondenza diretta tra il dato reale e quello virtuale<sup>141</sup>.

In totale sono stati formati 9 gruppi così composti: n. 4 *scan position* (3 della campagna di Aprile e 1 della campagna di Luglio) per il fronte principale in *Avenida Portugal*; n. 3 *scan position* per il fronte su *Calle Costado de Hospital*; n. 11 *scan position* per il fronte Sud-Ovest; n. 7 *scan position* per il fronte Nord-Ovest; n. 17 *scan position* (13 della campagna di Aprile e 4 della campagna di Luglio) per la corte<sup>142</sup>; n. 9 *scan position* per gli ambienti della

<sup>141</sup> Ad esempio, al fronte principale su *Avenida Portugal* corrisponde, in ambiente digitale, il gruppo di *scan position* che lo riprende.

<sup>142</sup> In seguito alle operazioni di filtraggio e pulizia, la corte, che rappresenta il gruppo più ampio di *scan position*, è stata ulteriormente suddivisa in 4 sottogruppi rispetto ai bracci

Chiesa; n. 4 *scan position* per la scala; n. 9 *scan position* per il centro medico; n. 3 *scan position* per gli ambienti di collegamento tra il fronte principale e l'interno del complesso sul lato Sud-Ovest.

### ▪ Filtraggio e pulizia

L'analisi della nuvola di punti dell'Hospital Simón Ruiz ha mostrato una mole di dati trascurabili per le successive fasi. Una quota parte è classificabile come *rumore*, ovvero come punti erroneamente rilevati dalla strumentazione, dovuti, ad esempio, alle ombre prodotte dalla vegetazione presente negli spazi aperti (corte e giardino) e al transito di persone e veicoli nelle strade prospicienti i fronti esterni in *Avenida Portugal* e su *Calle Costado de Hospital*. La restante parte è caratterizzata dal rilievo degli edifici circostanti che, se da un lato definiscono il contesto in cui si inserisce il complesso, dall'altro comportano un peso aggiuntivo del *file* incidendo, di conseguenza, sulla gestione e visualizzazione della nuvola di punti. Per cui, è stato necessario effettuare delle operazioni di filtraggio e pulizia.

Un primo processo è avvenuto in automatico nel *software Faro SCENE* durante il *pre-processamento*<sup>143</sup> delle *scan position*; in questa fase, viene applicato un *filtraggio predefinito* volto alla riduzione dei punti sulla base del valore di riflettanza e di dispersione<sup>144</sup> che presentano.

---

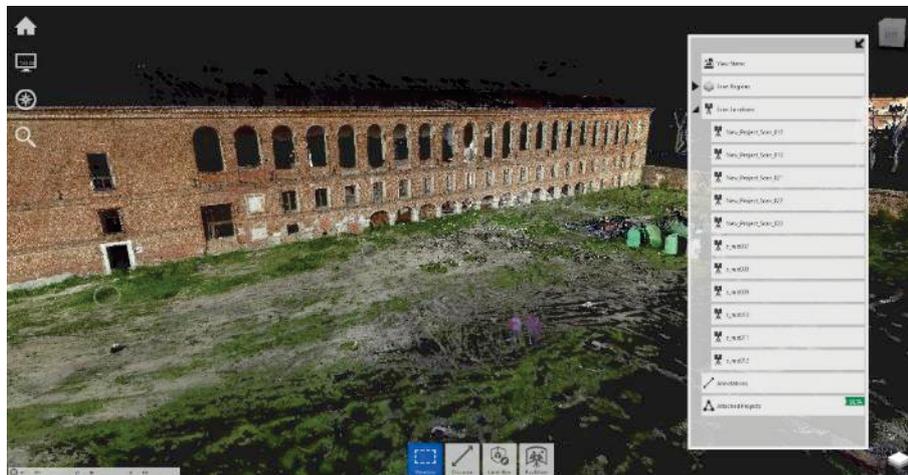
che la compongono per agevolare le operazioni di lettura. Per gestire questa operazione, stavolta, la scelta del *software* è ricaduta su *Autodesk Recap PRO* – con il quale, come si vedrà in seguito, si è gestita parte delle operazioni di filtraggio e pulizia – poiché è stata eseguita sulla nuvola di punti filtrata, così da legare i sottogruppi direttamente ai punti del modello e non alle stazioni di ripresa.

<sup>143</sup> Operazione necessaria al fine di rendere il *file grezzo* della nuvola di punti, così come registrato dal laser scanner, un *file* editabile nei successivi processi di elaborazione; consta di diverse fasi automatizzate in cui vengono applicati filtri, individuati *target*, applicate immagini, etc., con settaggi gestibili dall'utente.

<sup>144</sup> La dispersione viene settata indicando la dimensione della griglia di riferimento – area circostante il punto definita in *pixel* –, la soglia di distanza – espressa in metri, determina la distanza massima da rispettare affinché un punto sia considerato valido – e quella di

Fig. 5.9 – Visualizzazione nel software Autodesk Recap PRO del gruppo di scansioni (11 *scan position* totali) costituenti il fronte Sud-Ovest.

Elaborazione M. Pulcrano.



Altri filtri prevedono la definizione di distanze minime/massime o valori medi da rispettare, ma per poter controllare al meglio tale fase e definire con esattezza gli elementi da rimuovere, si è scelto di ricorrere a operazioni manuali sfruttando il software Autodesk Recap PRO<sup>145</sup>. Ogni gruppo di nuvole di punti, quindi, è stato esportato come progetto nel formato *.rnp*, mantenendo, in tal modo, sia il dato di posizione relativa che le informazioni sulle singole *scan position*<sup>146</sup> (fig. 5.9).

Attraverso la manipolazione dei limiti della *box* di visualizzazione e l'utilizzo degli strumenti di selezione – rettangolari e poligonali – si è proceduto con la rimozione dei punti ritenuti superflui. I gruppi maggiormente interessati da quest'operazione sono quelli che riprendono le aree più esterne del complesso; in particolare, è nel fronte su *Calle*

---

allocazione – percentuale minima di punti da considerare rispetto all'area di riferimento –.

<sup>145</sup> <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>

<sup>146</sup> Il salvataggio del progetto in *.rnp* consente di esportare le *scan position* come *layer* separati, ma concatenati, e registrati come file *.rvs* nella cartella *support* associata.

*Costado de Hospital* e nel fronte Nord-Ovest che si registra la percentuale maggiore di punti filtrati<sup>147</sup>.

In definitiva, la nuvola di punti complessiva è composta da circa 580 milioni di punti totali (fig. 5.10).

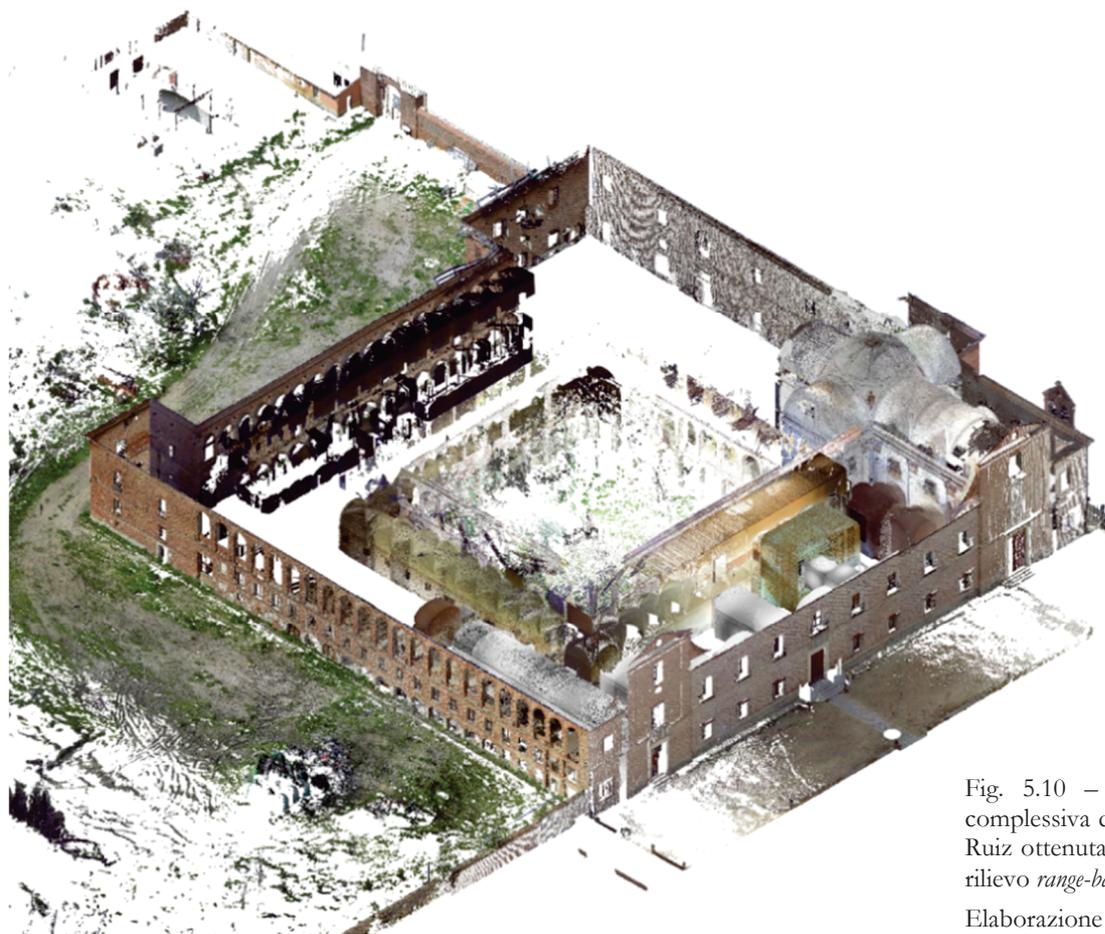


Fig. 5.10 – Nuvola di punti complessiva dell'Hotel Simón Ruiz ottenuta dalle campagne di rilievo *range-based*.

Elaborazione M. Pulcrano.

<sup>147</sup> Dal dato originario, composto da 38.145.181 punti per il fronte su *Calle Costado de Hospital* e 81.720.486 per il fronte Nord-Ovest, si è giunti ad una nuvola complessiva del gruppo formata rispettivamente da 12.500.334 e 30.8181.275 punti totali.

LA VIDEOGRAMMETRIA  
NEI RILIEVI IMAGE-  
BASED

*Gli esempi riscontrati in letteratura, circa l'applicazione della videogrammetria per la restituzione del patrimonio storico-architettonico (Alsadik et al., 2015; Singh et al., 2014; Sun e Zhang, 2019; Torresani e Remondino, 2019), mettono in luce potenzialità e criticità del processo. Le prime interessano prevalentemente la fase di acquisizione della ripresa, mentre le seconde ricadono sulla qualità del dato prodotto.*

*Viene infatti sottolineato come la registrazione dinamica di informazioni consente di ridurre i tempi di acquisizione, aggirare alcuni vincoli imposti dal processamento fotogrammetrico – soprattutto nella necessità di sovrapposizione dei frames del dataset fotografico – e superare le difficoltà di acquisizione in ambienti attigui o nei passaggi interno/esterno – punti di maggior criticità nei rilievi reality-based –.*

*Ma è sulla qualità del modello tridimensionale restituito, intesa come definizione delle forme e affidabilità metrica, che emergono le criticità della tecnica, la quale risulta influenzata da diversi fattori (risoluzione della camera, velocità di ripresa, sfocatura dei frames estratti, mole di dati da elaborare, etc.).*

*Attualmente, però, gli sviluppi tecnologici, le nuove strumentazioni (continua)*

## 5.2 Il rilievo tridimensionale con tecnologie *image-based*: applicazioni di *videogrammetria*

Il rilievo *range-based* è stato integrato con la documentazione reperita durante le attività di ricerca, la quale si è rivelata fondamentale per completare l'acquisizione degli ambienti interni, degli esterni e delle coperture dell'Hospital Simón Ruiz. Si tratta di videoriprese aeree registrate mediante SAPR ed eseguite allo scopo di documentare lo stato dei luoghi. La ripresa, però, di per sé ha un mero valore visivo e, affinché venga utilizzata per scopi di rilievo, necessita di processi di trasformazione del dato per estrapolare le informazioni desiderate. In particolare, gli obiettivi di questa specifica fase della ricerca sono legati all'utilizzo di tale documentazione per ottenere una nuvola di punti da cui ricavare informazioni geometriche e metriche affidabili. A tal fine, è stata applicata la tecnica *videogrammetrica* (Gruen, 1997) che, replicando i principi della fotogrammetria digitale, consente di ricostruire un modello tridimensionale a partire dall'estrazione di *frames* dalla videoripresa registrata.

Seguendo, quindi, la *pipeline* del processo *videogrammetrico*, il lavoro di ricerca è stato strutturato per replicare le diverse fasi<sup>148</sup> che lo caratterizzano al fine di ottenere risultati attendibili e affidabili.

Le riprese effettuate mediante SAPR – quattro in totale – hanno interessato il fronte Nord-Ovest, le coperture, gli ambienti della Chiesa, la corte centrale con i fronti annessi, parte degli ambienti interni e l'Eremita, completando, di fatto, con porzioni significative i rilievi precedenti. La Chiesa, in particolare, si è rivelata l'elemento chiave per testare e validare

<sup>148</sup> Estrazione dei fotogrammi dalla videoripresa, filtraggio dei fotogrammi ritenuti idonei, elaborazione dei fotogrammi in *software* SfM – nuvola di punti rada, nuvola di punti densa, modello *mesh* e *texturizzazione* – sono le fasi principali del processo *videogrammetrico*. Per la valutazione dei risultati ottenuti, a queste fasi vengono associate analisi specifiche per la comparazione con rilievi eseguiti con altre metodologie e/o tecnologie. Inoltre, operazioni di *post-processing* possono rendersi necessarie per conformare adeguatamente il dato (nuvola di punti o modello *mesh*) per le successive elaborazioni.

le operazioni *videogrammetriche*. Infatti, lo stato di conservazione dei luoghi e la qualità della nuvola di punti *range-based*, oltre che la ripresa di parti comuni tra rilievi – necessarie per la valutazione della nuvola di punti *videogrammetrica* – l'hanno resa idonea come *check test* (fig. 5.11).

### 5.2.1 Estrazione dei *frames* e processi SfM per l'elaborazione della nuvola di punti

Per l'estrazione dei *frames* è stato utilizzato il *software open Free Video to JPG Converter*<sup>149</sup> che consente di eseguire la procedura con modalità automatizzate. Diverse prove sono state svolte con la videoripresa della Chiesa al fine di individuare la sequenza che maggiormente si presta a proseguire con l'elaborazione SfM, perché in linea con i principi della metodologia esplicitati nel capitolo primo (Cfr. par. 1.1).

L'analisi delle immagini ottenute e le riflessioni in merito alle successive operazioni, oltre che ai risultati attesi – percentuale di sovrapposizione, tempi di processamento del dato, densità della nuvola di punti, etc. – hanno indotto a scegliere, tra i settaggi previsti dal *software*<sup>150</sup>, l'opzione che prevede l'estrazione di 1 *frame* ogni 10<sup>151</sup> (fig. 5.12). Quindi, essendo la durata della videoripresa di 5.05 minuti in totale, sono stati registrati 916

<sup>149</sup> <https://www.dvdvideosoft.com/it/products/dvd/Free-Video-to-JPG-Converter.htm>

<sup>150</sup> I settaggi previsti dal *software* per l'estrazione dei *frames* sono quattro in totale, di cui uno solo è relazionato alla durata del video e consente di ottenere 1 *frame* ogni 1/2/5/10/20 secondi. Gli altri, invece, sono basati sul numero di fotogrammi che si vuole ottenere; per cui è possibile scegliere di estrarre 1 *frame* ogni 10/30/50/100/500/1000, di estrarre il numero massimo di *frames*, oppure di estrarre un numero complessivo di *frame* a scelta tra 10/20/50/100/200/500.

<sup>151</sup> Generalmente la frequenza di riproduzione dei fotogrammi in una videoripresa è pari a 24-30 *frames* al secondo (FPS), frequenze maggiori rientrano nei filmati ad *high frame rate* (range 48-60 FPS) che consentono di ottenere una maggiore fluidità quando viene visualizzato il filmato. La videoripresa della Chiesa registrata dal SAPR presenta una frequenza di 30 FPS, per cui, rapportando il tutto alla durata, risulta composta da 9.168 *frames* in totale.

(segue)

*immesse sul mercato e i risultati ad altissima risoluzione che consentono di ottenere, pongono le basi per il superamento delle diverse implicazioni che impone la tecnica. Ad esempio, per limitare il grado di sfocatura del frame – dipendente dalla velocità di ripresa e dai movimenti involontari della camera di acquisizione –, l'utilizzo di SAPR e voli programmati consente di tenere sotto controllo la velocità mantenendo un'andatura costante, mentre è possibile ricorrere a gimbal per stabilizzare la camera e limitarne le oscillazioni. Oppure, altro fattore determinante nelle applicazioni videogrammetriche, è la mole di immagini da elaborare, molte delle quali superflue e ridondanti. Per cui si rende necessario filtrare i dati di input per non compromettere il risultato del processo SfM e, al contempo, limitarne i tempi di elaborazione.*

*Ciononostante, nelle diverse ricerche analizzate, la valutazione dell'accuratezza nella ricostruzione morfo-geometrica e nelle proporzioni tra le parti della nuvola di punti, con analisi delle divergenze e confronti con altre metodologie di rilievo consolidate, mostra risultati soddisfacenti e in linea con gli obiettivi prefissati.*



Fig. 5.11 – Nuvola di punti della Chiesa annessa all’Hospital Simón Ruiz. In rosso la messa in evidenza dell’area individuata come *check test* per la validazione del processo videogrammetrico.

Elaborazione M. Pulcrano.

Fig. 5.12 – Estrazione automatizzata dei *frames* dalla videoripresa delle coperture mediante il software *open Free Video to JPG Converter*.

Elaborazione M. Pulcrano.



*frames* nel formato *.jpg*, con dimensioni pari a 1280x720 px e risoluzione a 96 dpi. Come prevedibile, è stato necessario filtrare i fotogrammi<sup>152</sup>: analisi visive hanno supportato l’individuazione e, quindi, l’esclusione delle immagini con evidenti criticità circa l’esposizione, la nitidezza e la ridondanza (fig. 5.13). Inoltre, al fine di rendere più speditive le operazioni di elaborazione della nuvola di punti e la successiva validazione del processo, si è scelto di ridimensionare l’estensione dell’area di *check test* alla zona dell’altare. In definitiva, 299 *frames* sono stati considerati validi per proseguire con l’elaborazione della nuvola di punti.

Le esperienze condotte in merito e lo studio della letteratura di settore hanno indirizzato la ricerca verso la scelta di non ricorrere aprioristicamente ad un *software* SfM di riferimento, ma valutare i risultati prodotti da più applicativi al fine di individuare quello che, in funzione delle particolarità del dato di *input*, restituisse il miglior risultato. Per cui, per proseguire con la sperimentazione, tra i diversi *software* in commercio ne sono stati considerati tre: *Metashape*<sup>153</sup> della *Agisoft*, *RealityCapture*<sup>154</sup> della *Capturing Reality* e *3DF Zephyr PRO*<sup>155</sup> della *3Dflow*.

---

<sup>152</sup> Nella letteratura di settore, il tema del filtraggio è affrontato con diverse modalità, che spaziano dalla scelta manuale all’esecuzione di specifici *software* e algoritmi che valutano la qualità dell’immagine o la percentuale di sovrapposizione. In Torresani e Remondino, 2019, ad esempio, vengono applicate sia procedure 2D con l’individuazione dei punti omologhi in *frames* consecutivi – se la percentuale di sovrapposizione (data dal numero di punti in comune individuati) è uguale o supera il valore prestabilito, allora il fotogramma viene scartato –, sia procedure 3D basate sulle proprietà geometriche della scena ricostruita – vengono valutati, con percentuali di riferimento, i *frames* necessari in base alla ricostruzione di una prima nuvola di punti rada –. In Alsadik et al., 2015, invece, alla procedura 3D viene anteposto un filtraggio eseguito sul grado di sfocatura delle diverse immagini, attribuito mediante *software*, che determina quelle ritenute idonee alle elaborazioni SfM. Ma nel proseguire col presente lavoro di ricerca, è stato ritenuto sufficiente operare con filtri manuali basati sulla valutazione visiva dei *frames* estrapolati dalla videoripresa in esame.

<sup>153</sup> <https://www.agisoft.com/>

<sup>154</sup> <https://www.capturingreality.com/>

<sup>155</sup> <https://www.3dflow.net/it/>



#### ▪ Elaborazione dei dati in *Agisoft Metashape*

Il primo processamento è avvenuto in *Agisoft Methashape*, software immesso sul mercato come diretta evoluzione del più noto *PhotoScan* dal quale riprende caratteristiche e principi di funzionamento, migliorandone però tempi, oneri computazionali e risultati grazie all'ottimizzazione degli algoritmi che gestiscono il processo.

Per l'orientamento del *dataset* – primo *step* dell'elaborazione – si è scelto un settaggio di risoluzione a qualità *high* al fine di utilizzare i dati di *input* nella loro dimensione originaria<sup>156</sup> e garantire una stima più accurata nella definizione automatizzata dei parametri interni ed esterni della camera. Mentre valori di *default* per l'individuazione di *key point* e *tie point*<sup>157</sup> sono stati ritenuti adeguati ai fini del processo.

L'elaborazione ha restituito una prima nuvola di punti sulla base dell'allineamento di 241/299 *frames*, costituita da 51.476 *tie points* (fig. 5.14).

Fig. 5.13 – Esempi di *frames* esclusi dalla computazione del processo videogrammetrico.

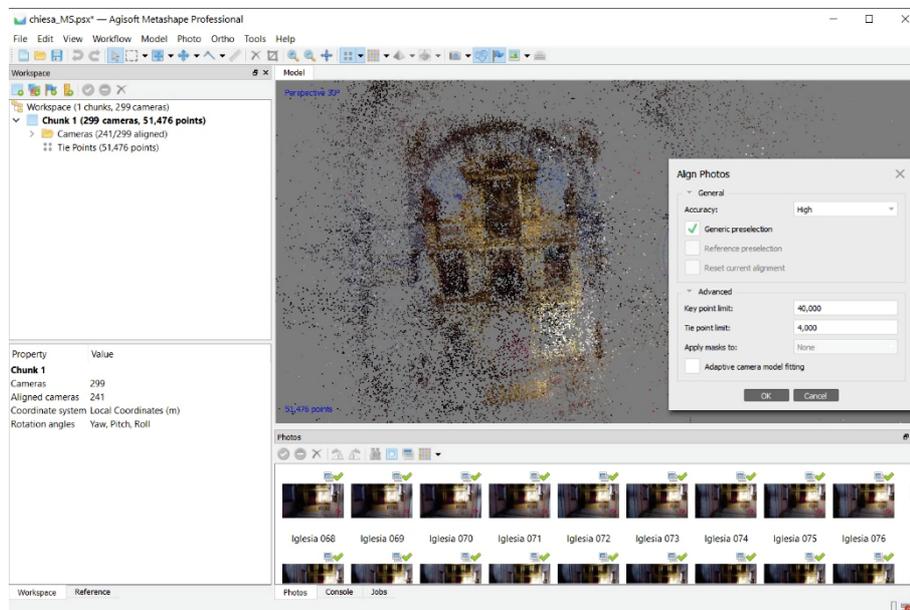
Elaborazione M. Pulcrano.

<sup>156</sup> I diversi settaggi di elaborazione per questa fase del processo prevedono una scala di valori che varia da *highest* a *lowest*: il risultato ottenuto, ad eccezione del settaggio *high*, è funzione del ridimensionamento del *frame* che, rispettivamente, risulterà ampliato o ridotto di un determinato valore.

<sup>157</sup> I primi rappresentano i punti da individuare su ciascun *frame*, mentre i secondi sono i punti omologhi su ogni *frame* e costituiranno la nuvola di punti rada.

Fig. 5.14 – Processo di allineamento del *dataset* fotografico nel *software Agisoft Metashape*: settaggi di computazione e risultati del processo.

Elaborazione M. Pulcrano.



Conclusasi la prima fase, è stato avviato il processo di infittimento della nuvola di punti rada per meglio definire il modello nelle caratteristiche geometriche generali e di dettaglio: per ogni *pixel* dei *frames* viene individuato il corrispettivo punto 3D attraverso algoritmi di *Dense Image Matching*. Anche in questo caso, l'impostazione dei settaggi è avvenuta in considerazione dei parametri previsti, delle modalità con cui avviene l'elaborazione e del risultato a cui pervenire. Analogamente alla prima fase, infatti, una scala di valori – da *ultra high* a *lowest* – determina il fattore di riduzione del *frame* considerato. L'impostazione *high* – decremento di valore 4 (2 per lato) –, sebbene abbia influito sui tempi del processo, ha generato una nuvola di punti densa, costituita da 1.612.423 punti, che a delle prime analisi puramente visive appare soddisfacente come risultato ottenuto (fig. 5.15).

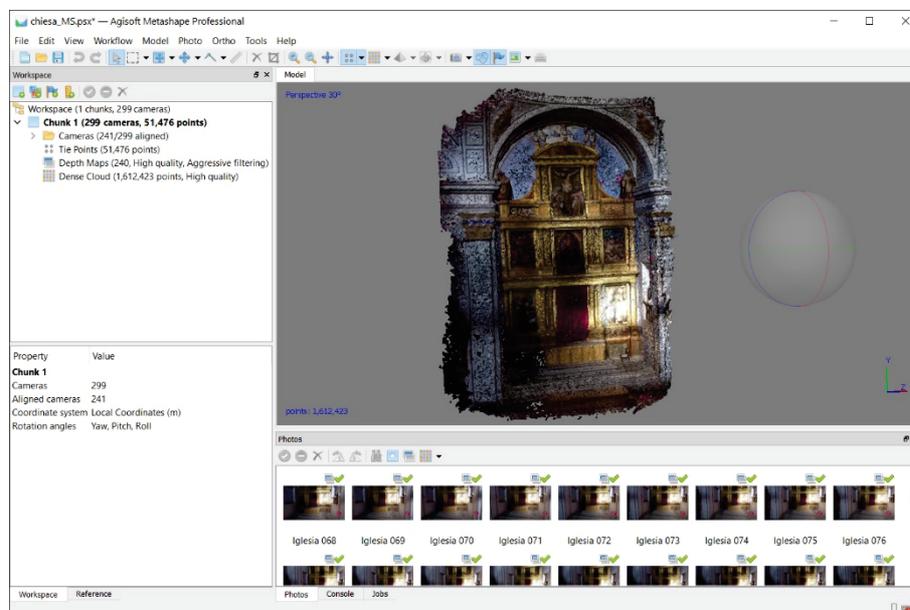


Fig. 5.15 – Modello tridimensionale risultante dal processo di infittimento della nuvola rada.

Elaborazione M. Pulcrano.

### ▪ Elaborazione dei dati in *RealityCapture*

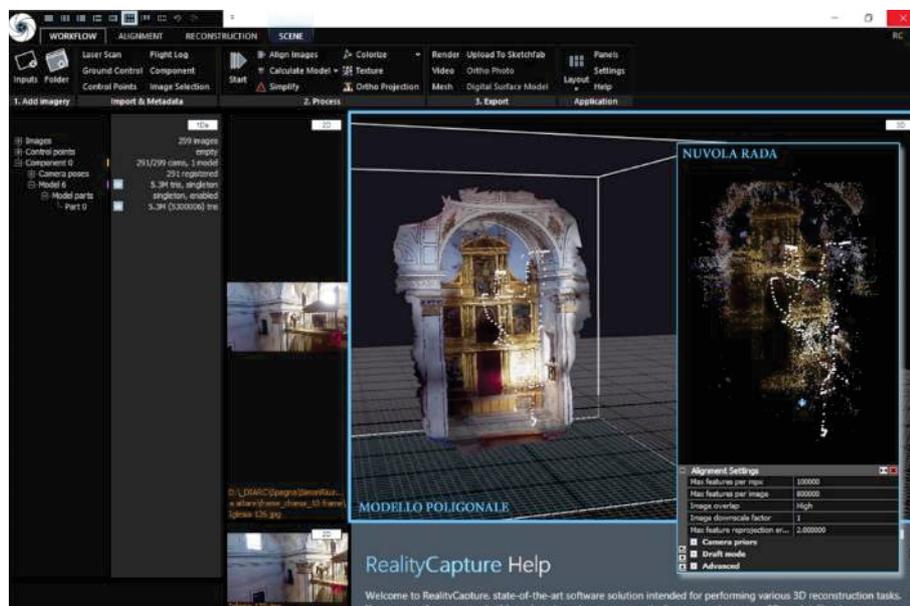
Il secondo applicativo scelto è *RealityCapture*, un *software* giovane – la prima versione beta è stata rilasciata solo nel 2016 –, strutturato sul consolidato processo SfM, ma che presenta prestazioni computazionali elevate con tempi di calcolo ridotti, soprattutto per la fase di allineamento dei dati di *input*<sup>158</sup>.

L'allineamento dei *frames*, analogamente per quanto avvenuto in *Agisoft Metashape*, è stato settato definendo il limite massimo di *features* da ricercare (rispetto ai *megapixel* e all'immagine stessa), il fattore di riduzione (pari a 1 al fine di elaborare i *frames* nella loro dimensione reale) e il grado

<sup>158</sup> Aspetto rilevante soprattutto per l'eventuale possibilità di controllare in sito se il *dataset* acquisito soddisfa i requisiti di sovrapposizione, risultando idoneo per l'elaborazione della nuvola di punti.

Fig. 5.16 – Restituzione *image-based* dell'area *check test* attraverso il software *RealityCapture*

Elaborazione M. Pulcrano.



di sovrapposizione rispettato tra le diverse immagini acquisite dalla videoripresa (valutato in *high* perché superiore al 60%).

Al termine dell'elaborazione, ben 291/299 frames sono stati allineati restituendo un unico *component*, ovvero un modello formato da 263.401 *tie points* complessivi<sup>159</sup>.

Nel proseguire, l'elaborazione della nuvola di punti densa in *RealityCapture* viene gestita come un'unica fase insieme con la costruzione del modello *mesh*, per cui i settaggi impostati influenzano sia l'infittimento che la superficie triangolare. In definitiva, il calcolo delle mappe di profondità e la ricostruzione delle superfici è avvenuta in qualità *high*, restituendo un

<sup>159</sup> *RealityCapture*, in seguito all'allineamento, fornisce il numero di *tie points* individuati per ogni singolo *frame*; per l'elaborazione eseguita, il *range* di punti riscontrati varia da un minimo di 477 ad un massimo di 1843 punti.

modello 3D – suddiviso in tre blocchi<sup>160</sup> – formato da 2.650.761 vertici e 5.300.006 triangoli (fig. 5.16).

#### ▪ Elaborazione dei dati in *3DF Zephyr PRO*

L'ultima nuvola di punti è stata creata con *3DF Zephyr* nella versione PRO (fig. 5.17), che consente, a differenza degli altri due *software* utilizzati, di eseguire il processo immettendo come *input* direttamente la videoripresa e integrando le diverse fasi con quella preliminare di estrazione dei *frames*. Ciononostante, si è scelto di non avvalersi di questa possibilità, al fine di mantenere una base comune nella generazione delle diverse nuvole di punti in funzione delle successive operazioni di confronto.

Per cui, importati i *frames* nel *software* è stato avviato il processo scegliendo le diverse impostazioni di computazione senza ricorrere ai *preset*<sup>161</sup> già presenti: (i) rimozione della creazione automatizzata del modello *mesh* in seguito all'individuazione dei *keypoints* per avere un maggior controllo sui risultati prodotti nelle diverse fasi che si susseguono; (ii) definizione del numero di *keypoints* per ogni immagine con qualità alta; (iii) per il *matching*, ovvero per le corrispondenze tra i *keypoints*, è stata definita una qualità accurata andando a discapito dei tempi ma prediligendo la possibilità di ottenere risultati migliori; infine, (iv) è stato abilitato il calcolo *Bounding Box* per il filtraggio automatizzato dei punti eccessivamente lontani. Per gli altri settaggi disponibili (profondità del *matching*, orientamento foto e motore di ricostruzione), sono state ritenute adeguate le impostazioni di *default*, per cui non sono state apportate modifiche.

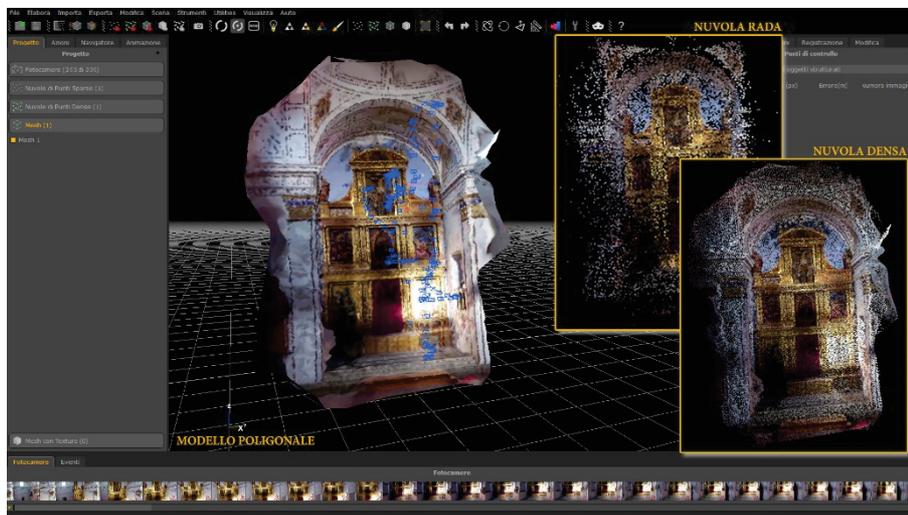
---

<sup>160</sup> In *RealityCapture*, con i settaggi impostati per questa specifica fase, il processo computazionale e il modello costruito vengono segmentati così da agevolare *hardware* e *software* nella restituzione della *mesh*. Se da un lato quest'espedito consente di generare risultati molto più dettagliati e accurati, sia dal punto di vista geometrico che visivo, dall'altro può comportare la visualizzazione delle cuciture, ovvero dei bordi nei blocchi adiacenti, nel modello 3D creato.

<sup>161</sup> Sono dei settaggi preimpostati di elaborazione definiti per le casistiche più comuni di rilievo.

Fig. 5.17 – Modelli tridimensionali (nuvola di punti rada, nuvola di punti densa e modello poligonale) ottenuti dal processamento del *dataset* fotografico nel *software 3DF Zephyr PRO*.

Elaborazione M. Pulcrano.



Analogamente al processo avvenuto in *RealityCapture*, anche in questo caso la restituzione della nuvola di punti rada – 49.720 *tie points* – è stata ottenuta con l'allineamento di un elevato numero di *frames* – 293/299 –.

La nuvola di punti densa è stata generata impostando le opzioni di computazione avanzate, come avvenuto per il processo di allineamento, scegliendo per ogni parametro i valori di riferimento. In tal modo è stato possibile definire, ad esempio, la massima risoluzione per le immagini al fine di garantire un maggiore dettaglio ma, al contempo, attraverso il filtro di *riduzione rumore* – impostato al 50% – sono stati rimossi gli eventuali punti spuri prodotti dai *frames* che presentano una qualità di risoluzione inferiore. Un ulteriore filtraggio si ha con la definizione del livello di ottimizzazione – impostato ad una media risoluzione – che rimuove preventivamente i *pixel* ridondanti, per agevolare la computazione del processo e restituire una nuvola di punti densa più gestibile per l'*hardware* utilizzato. L'infittimento dei *tie points* abilita la costruzione consequenziale del modello *mesh*, ma a differenza di *RealityCapture* che viene racchiuso tutto in un unico settaggio, in *3DF Zephyr* sono gestiti in modo indipendente. In questo caso, quindi, valutati gli obiettivi finali

dell'elaborazione, è stato ritenuto sufficiente utilizzare un *preset* di *default generico*, definito con parametri *standard* da poter adottare nella maggior parte delle elaborazioni.

Il modello finale è composto da 107.633 punti totali e 186.493 superfici triangolari.

### 5.2.2 Validazione del metodo attraverso procedure automatizzate di confronto dati

Al fine di definire il processo da reiterare per le altre videoriprese, è stato necessario valutare quale delle nuvole di punti ottenute dalle diverse elaborazioni SfM risulta più affidabile morfologicamente e metricamente. Il parametro del confronto è stato individuato nella porzione corrispondente della nuvola di punti *range-based*, che fornisce dimensioni e orientamento reali degli ambienti della Chiesa.

La validazione del metodo, eseguita con il supporto del *software CloudCompare*, consta di diverse fasi:

- importazione delle nuvole di punti nel *software*;
- allineamento e riposizionamento – con rototraslazioni e ridimensionamenti – delle nuvole di punti videogrammetriche sulla nuvola di punti laser scanner;
- analisi automatizzata della divergenza per definire, con valori numerici, la coerenza tra le nuvole di punti;
- estrapolazione dei grafici esemplificativi delle analisi effettuate recanti i valori di distanza e deviazione.

Per eseguire il confronto, è stato necessario effettuare l'esportazione delle diverse nuvole di punti nei formati *.e57* e *.xyz*, letti dal *software CloudCompare* senza provocare alterazioni nel modello e nelle informazioni ad esso associate (riflettanza e codice RBG).



Fig. 5.18 – Nuvole di punti elaborate nei diversi applicativi SfM: sintesi dei risultati ottenuti e confronti visivi con il rilievo *range-based* dell'area di *check test*.

Elaborazione M. Pulcrano.

#### ■ Allineamento delle nuvole di punti

La nuvola di punti restituita dal *software Agisoft Methashape* e quella ottenuta dai rilievi *range-based*, quindi, sono state importate nel *software CloudCompare*, e sono state allineate seguendo le procedure viste nel capitolo primo (Cfr. par. 1.3.1) caratterizzando la nuvola di punti laser scanner come elemento di riferimento (fig. 5.19). Nello specifico, individuate le *equivalent point pairs*<sup>162</sup> (fig. 5.20), è stato avviato il processo consentendo la trasformazione del modello videogrammetrico, in modo che la nuvola di punti *image-based* si possa posizionare, orientare e ridimensionare in funzione di quella *range-based*. A seguito dell'allineamento manuale, la matrice di spostamento ha restituito l'RMS (*root mean square*)<sup>163</sup> finale, ovvero la differenza (deviazione *standard*) nei valori delle distanze relative

<sup>162</sup> Ne vengono richieste almeno quattro, anche se per eseguire le operazioni ne sono sufficienti tre.

<sup>163</sup> Rappresenta la media aritmetica dei quadrati di un insieme di valori.

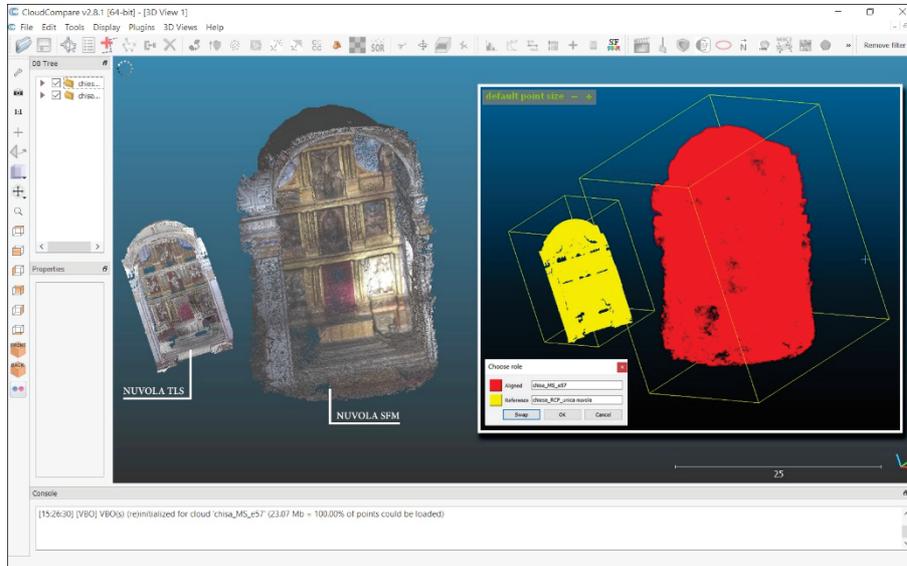


Fig. 5.19 – Vista dello spazio modello del software *CloudCompare* con caratterizzazione delle nuvole di punti come elemento di riferimento (in giallo, la nuvola *range-based*) ed elemento da allineare (in rosso, la nuvola di punti ottenuta mediante processo SfM nel software *Agisoft Metashape*).

Elaborazione M. Pulcrano.

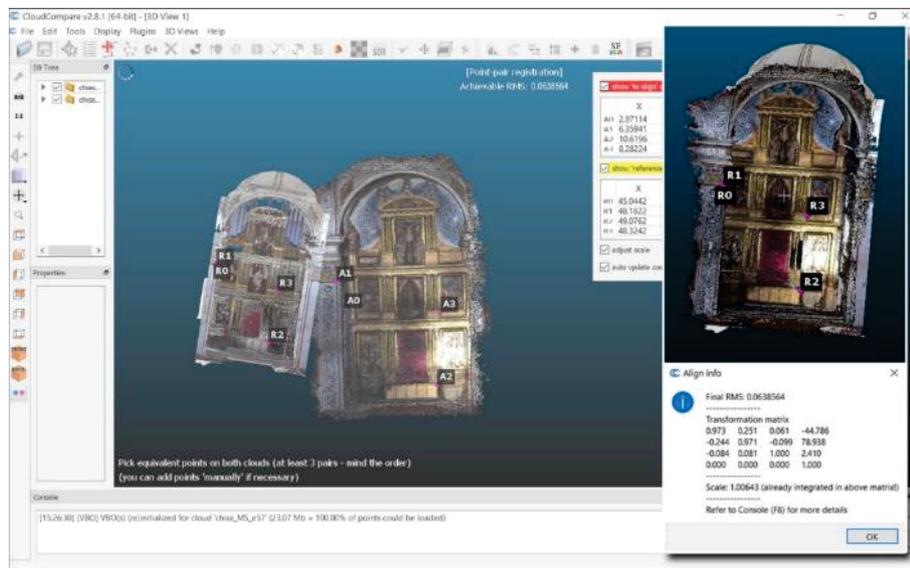
tra i punti individuati<sup>164</sup>: l'errore rilevato è di circa 6 cm. Si è, quindi, proseguito con una registrazione raffinata basata sull'ICP, che, a discapito delle aspettative, ha prodotto un RMS finale di circa 16 cm.

La differenza riscontrata risiede nelle impostazioni del processo e nelle modalità con cui viene estratto l'RMS. In pratica, nel primo allineamento esso viene computato sulla base dei valori riscontrati nelle *equivalent point pairs* individuate, che, inevitabilmente, risultano in numero inferiore rispetto al riferimento scelto per il secondo allineamento. Nello specifico, per l'ICP, i parametri computazionali settati sono stati definiti in base alla percentuale di sovrapposizione che presentano le due nuvole di punti – stimata intorno all'85% –, alla possibilità di effettuare un ridimensionamento del modello da registrare – operazione generalmente

<sup>164</sup> Durante la procedura di individuazione delle *equivalent point pairs*, a partire dalla terza coppia, viene restituito un valore di errore approssimativo per ogni punto, che si aggiorna automaticamente ad ogni nuova coppia aggiunta. In funzione di risultati finali maggiormente accurati, tale indicazione diviene molto utile per correggere – o escludere dalla computazione – i punti che presentano errori eccessivi.

Fig. 5.20 – Individuazione delle *equivalent point pairs* e lettura della deviazione *standard* a seguito del processo di allineamento.

Elaborazione M. Pulcrano.



non prevista, ma implementata in *CloudCompare* per eventuali correzioni nell'errore di scala del primo allineamento – e, tra i parametri avanzati, è stato ampliato a  $1.000.000^{165}$  il limite di campionamento – 50.000 di *default* – per consentire la stima su una maggiore quantità di punti e ottenere un risultato più accurato. Quest'ultimo, in particolare, provoca la differenza tra i due RMS, poiché la definizione dell'errore nell'ICP viene eseguito su una quantità di valori nettamente superiore.

In definitiva, il valore di errore finale, seppur eccessivo se rapportato alla porzione limitata di area analizzata, è stato considerato accettabile, per cui si è proceduto con le altre fasi di analisi, come descritto di seguito.

### ▪ Analisi della divergenza

Nel computare la distanza che intercorre tra le due nuvole di punti – metodo *cloud to cloud* – *CloudCompare* sfrutta il metodo di calcolo della *nearest neighbor distance*: per ogni punto del modello confrontato ricerca il punto

<sup>165</sup> Tale impostazione è stata settata in base al numero di punti presenti nei modelli tridimensionali assoggettati al processo, con particolare riferimento a quella da registrare.

più vicino del modello di riferimento. La sperimentazione, quindi, è proseguita lasciando invariati i parametri di *default* previsti da *CloudCompare*, ovvero confermando il livello di *octree*<sup>166</sup> individuato e impostando la computazione sull'algoritmo di Hausdorff<sup>167</sup>.

I risultati restituiti, con il relativo valore di deviazione *standard*, rappresentano la stima dell'errore sul numero massimo di punti considerati, ovvero sulla nuvola di punti completa. Sebbene nei settaggi sia previsto l'inserimento della distanza massima da considerare per il calcolo, si è scelto di non impostarla al fine di effettuare delle valutazioni complessive sui modelli; di conseguenza anche il punto più lontano viene inserito nel calcolo e diviene necessario analizzare dettagliatamente gli esiti prodotti per individuare il corretto valore di errore.

Nello specifico, l'analisi dei primi due modelli – laser scanner e videogrammetrico elaborato con *Agisoft Methashape* – mostra che una percentuale di punti, pari al 19%, ha un errore superiore ai 50 cm, ma valutata la collocazione dei punti, concentrati prevalentemente nelle parti più estreme del modello, si è scelto di escluderli poiché, di fatto, inficiano la stima reale. In definitiva, è stata riscontrata una deviazione *standard* pari a 9.7 cm. Grazie alle impostazioni grafiche con colori e alla definizione degli *step* – regolano la visualizzazione e il campionamento degli intervalli di errore considerati –, diviene semplice leggere il risultato sulla nuvola di punti che mostra, in generale, un errore distribuito in modo omogeneo.

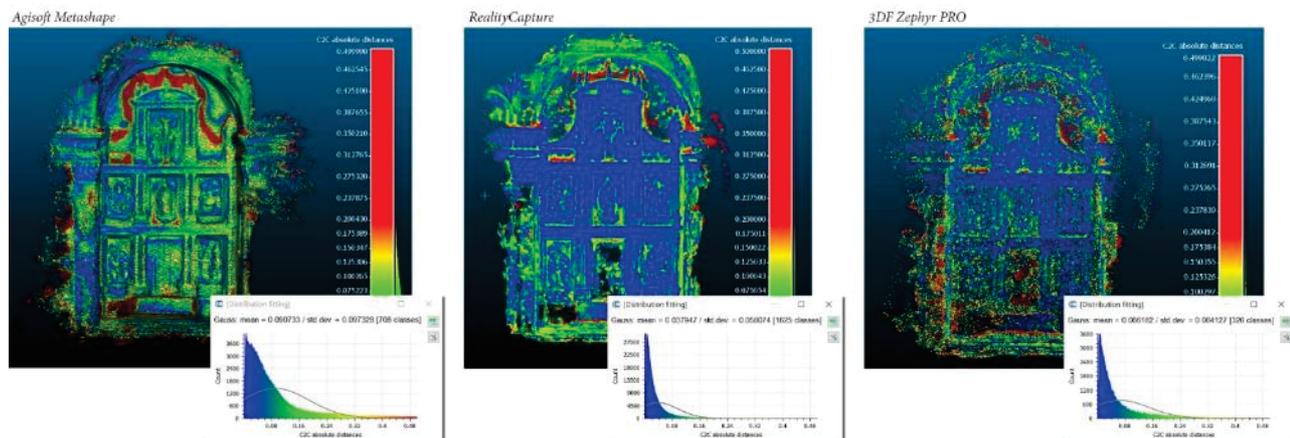
<sup>166</sup> Rappresenta una tecnica di suddivisione ricorsiva dei modelli 3D basata su una griglia il cui modulo è individuato nella figura geometrica cubo; la griglia ha una struttura gerarchica ad albero tale che ad ogni cubo corrispondono, nel livello seguente, otto *cubi figlio* che presentano un angolo in comune coincidente con il centro del cubo al livello superiore. L'utilizzo di processi di *octree* per i modelli puntiformi consente di discretizzarli secondo regole predefinite come, ad esempio, la dimensione della griglia, il numero massimo di suddivisioni o di punti contenuti nei sotto-moduli, etc. Tale discretizzazione può essere reale, comportando un effettivo ridimensionamento del numero dei punti del modello, o apparente, per agevolare la memoria grafica e virtuale dell'*hardware* utilizzato.

<sup>167</sup> Gli altri modelli previsti dal *software* sono: la definizione del piano dei minimi quadrati, la triangolazione di Delaunay e il modello corrispondente alla funzione quadratica.

#### PROCESSO DI ANALISI IN CLOUDCOMPARE

*Nel calcolo delle divergenze tra modelli, una prima approssimazione delle distanze viene definita per individuare il livello di octree, ovvero la griglia di riferimento per suddividere il modello stesso necessaria per procedere con il calcolo vero e proprio. I valori riportati, quindi, non sono da considerarsi veritieri, nonostante venga associato al dato numerico anche una schematizzazione grafico-visiva, ma si dovrà attendere la seconda fase per ottenere valori reali.*

*Nelle impostazioni del processo, i settaggi su cui poter agire per variare l'analisi sono prevalentemente due: il livello di octree e la definizione del modello locale. Per quanto concerne il primo, com'è noto, più è elevato il valore, minori saranno la dimensione della griglia di riferimento, il numero di punti contenuti al suo interno e, in questo caso specifico, il numero di iterazioni per trovare i punti più vicini. Per contro, però, il tempo impiegato per eseguire il processo aumenta, poiché il software dovrà analizzare un numero maggiore di elementi. Mentre la definizione del modello locale è utile per scegliere un modello di calcolo diverso dall'algoritmo di Hausdorff, sul quale si basa il metodo nearest neighbor distance.*



Una premessa si rende necessaria a questo punto: il processo messo in atto, descritto con le fasi operative condotte sulla nuvola di punti elaborata dal software SfM *Agisoft Methashape*, è stato reiterato senza difformità per le analisi dei risultati degli altri due applicativi (fig. 5.21). Di seguito, dunque, si riportano esclusivamente gli esiti delle diverse operazioni condotte e le valutazioni che ne sono scaturite.

### 5.2.3 Osservazioni sui risultati ottenuti dalla procedura videogrammetrica

Concluse le operazioni descritte nei paragrafi precedenti, riflessioni sulla sperimentazione condotta e sui risultati ottenuti sono state necessarie per comprendere la fattibilità nell'applicazione della metodologia videogrammetrica alle altre videoriprese, oltre che individuare il processo da reiterare.

Sulla base delle considerazioni riportate nel paragrafo 1.2 e alla nota 22, una sintesi di tali riflessioni può essere esplicitata delineando alcuni parametri comparativi generali, come il tempo impiegato per il processamento dei *frames*, la precisione geometrica della nuvola di punti, la dimensione del *file*, etc.

Fig. 5.21 – Esito del processo di confronto automatizzato tra le nuvole di punti *range-based* e *image-based*. I valori leggibili dal grafico riportano una deviazione *standard* rispettivamente pari a 9.7 cm per l'elaborazione nel software *Agisoft Methashape*, 5.8 cm per *RealityCapture* e, infine, 8.4 cm per *3DF Zephyr PRO*.

Elaborazione M. Pulcrano.

In riferimento alla specifica esperienza condotta, rispetto ai tempi di elaborazione, ad esempio, i tre *software* applicati hanno risposto in maniera completamente differente, confermando in alcuni casi le ipotesi effettuate all'inizio della sperimentazione. *RealityCapture* si è dimostrato l'applicativo che ha elaborato più velocemente tutte le fasi del processo, a differenza di *Agisoft Metashape* che, invece, ha richiesto diverse ore di computazione, soprattutto per la generazione delle *depth maps* e della nuvola di punti densa. Mentre *3DF Zephyr* ha presentato tempi medi se consideriamo che le operazioni, nella seconda fase, hanno interessato sia la nuvola di punti densa che la costruzione del modello *mesh* – analogamente a *RealityCapture* –. È chiaro che i tempi sono strettamente connessi alle impostazioni dei settaggi e alle caratteristiche *hardware* del *device* utilizzato per l'esecuzione dei processi e, a tal proposito, va precisato che, al fine di rendere equiparabili i tre applicativi, è stato utilizzato il medesimo *computer* che presenta caratteristiche computazionali medie<sup>168</sup>.

Invece, per quanto concerne i risultati dell'elaborazione, ad una prima analisi puramente visiva delle nuvole di punti videogrammetriche, appaiono chiare alcune questioni. In primo luogo, la presenza di zone o elementi non restituiti: mancanze da attribuire ai dati di *input* poiché accomunano tutti i modelli nelle medesime parti, ma in modi differenti. Ad esempio, per il fondo della nicchia posta alla destra dell'altare *Agisoft Metashape* e *3DF Zephyr*, hanno restituito un risultato migliore rispetto a *RealityCapture*, mentre la volta di copertura e le decorazioni che la completano non sono facilmente leggibili in *3DF Zephyr*. Ciò può essere in parte relazionato al grado di infittimento della nuvola di punti, che proprio in *3DF Zephyr* appare ricostruita secondo una maglia più ampia, attribuibile ai filtraggi automatizzati applicati dal *software* in fase di processamento, che, nonostante siano stati impostati ai livelli più bassi, hanno comunque prodotto un modello fortemente discretizzato.

---

<sup>168</sup> Intel® Core™ i7-6700HQ quad core (2,6 GHz, fino a 3,5 GHz), 16GB RAM, sistema operativo a 64bit, scheda grafica NVIDIA GeForce GTX 960M con 4 GB GDDR5 dedicati.

Col calcolo della divergenza, invece, è possibile eseguire riscontri maggiormente oggettivi, quantificando con numeri e percentuali, le differenze tra le nuvole di punti. I risultati in riferimento all'elaborazione di *Agisoft Metashape*, esplicitati nel paragrafo precedente, mostrano un modello caratterizzato da un errore non trascurabile viste le dimensioni dell'area di analisi<sup>169</sup>.

Risultati leggermente migliori si sono ottenuti con l'elaborazione in *3DF Zephyr*, dove il primo RMS di 6 cm ottenuto dall'allineamento manuale, è stato di fatto confermato dall'RMS ottenuto con il processo ICP. Il calcolo della deviazione, invece, mostra che il 25% di punti ha un errore superiore ai 9 cm – 2% di punti con errore superiore ai 50 cm e deviazione *standard* di 8.4 cm con il 23% di punti che presentano un errore superiore –.

Infine, il modello prodotto dall'applicativo *RealityCapture*, ha generato un errore pari a 3.5 cm desunto dall'allineamento raffinato con l'ICP, che si riflette nel calcolo delle distanze *cloud to cloud* con una deviazione *standard* di 5.8 cm e con un 15% di punti che la superano – se si considerano anche i punti che presentano una distanza superiore ai 50 cm, tale percentuale si amplia al 20% –.

Si segnala infine che i tempi di elaborazione non sono correlati alla diversa qualità geometrica e metrica dei modelli prodotti.

### 5.3 Restituzione videogrammetrica delle coperture e integrazione con la nuvola di punti laser scanner

In seguito alle analisi e alle osservazioni dei risultati ottenuti dai *test* sulle nuvole di punti dell'area della Chiesa, si è scelto di proseguire la

---

<sup>169</sup> L'altare presenta delle dimensioni pari a 8,32 m in lunghezza, 6,16 m in profondità e 10,43 m in altezza fino alla quota di imposta della volta, a cui vanno aggiunti i 4,25 m di sviluppo della stessa.

sperimentazione replicando il *framework* videogrammetrico con l'applicativo *RealityCapture*. Particolare attenzione è stata posta alla videoripresa delle coperture e al processamento dei relativi *frames* al fine di completare la volumetria generale del complesso.

Le sequenze operative validate precedentemente, sebbene siano di fondamentale supporto nella costruzione della nuvola di punti, non sono state replicate acriticamente. Infatti, le riflessioni condotte sugli obiettivi che spingono ad eseguire il processo videogrammetrico e le modalità di utilizzo del dato risultante nelle fasi successive della sperimentazione, hanno guidato la scelta di specifici parametri di settaggio per la computazione SfM, oltre che le scelte operate nelle ultime fasi del processo riguardanti l'individuazione della procedura da eseguire per l'integrazione (Cfr. par. 1.3) dei dati *image-based* e *range-based*.

Il primo *step*, dunque, è stato relativo all'estrazione dei *frames* nel *software Free Video to JPG Converter*. Analogamente a quanto descritto al punto precedente, la scelta di ottenere 1 *frame* ogni 10, ha prodotto un totale di 348 *frames* – la durata della videoripresa è di 1.55 minuti –, di cui 316 sono stati ritenuti idonei all'elaborazione SfM (fig. 5.22).

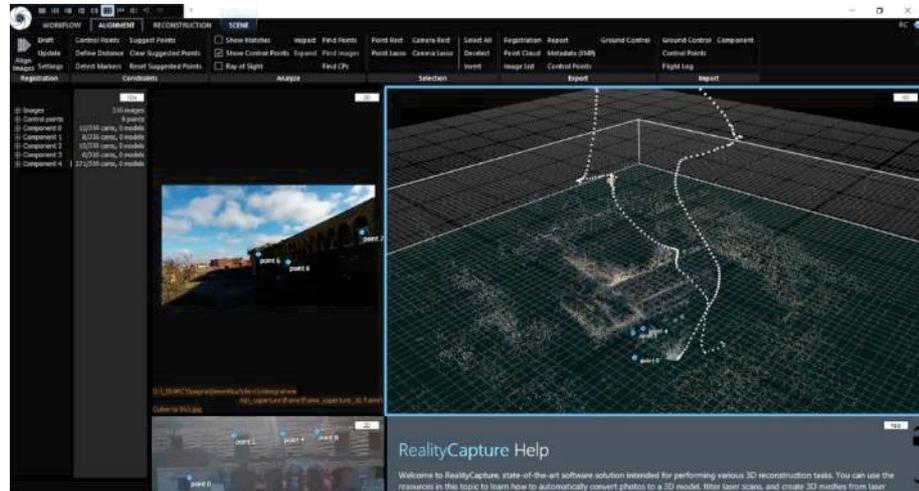


Fig. 5.22 – Collage di una parte dei *frames* (20/316) oggetto di processo SfM per la costruzione della nuvola di punti delle coperture.

Elaborazione M. Pulcrano.

Fig. 5.23 – Primi esiti dell'allineamento nel *software RealityCapture* e inserimento dei *control points* al fine di migliorare il risultato.

Elaborazione M. Pulcrano.



Importati in *RealityCapture*, il risultato dell'allineamento, diversamente da quanto prefigurato, ha però restituito più *component*<sup>170</sup>, ovvero diverse porzioni di nuvola di punti, per un totale di 339.761 *tie points* individuati. Per ottenere un unico modello e un dato più completo, è stato quindi necessario apportare dei correttivi e ripetere nuovamente il processo computazionale. Nello specifico, in alcuni *frames* di ogni *component* sono stati individuati dei punti di riferimento a cui si è fatto corrispondere i *control points*<sup>171</sup>, inseriti secondo modalità manuali (fig. 5.23). Tale espediente ha di fatto agevolato la fase di allineamento, consentendo di ottenere un unico modello finale dato dalla registrazione di 310/316 *frames*<sup>172</sup>. Nonostante non sia stato raggiunto il valore massimo di allineamento (316/316), è stato scelto di non individuare altri *control points*

<sup>170</sup> Nello specifico, sono stati prodotti 5 *component* costituiti dai seguenti *frames* registrati: 6/316 con 916 *tie points*, 8/316 con 1.967 *tie points*, 12/316 con 11.984 *tie points*, 15/316 con 4.444 *tie points* e, infine, 271/316 con 320.450 *tie points*.

<sup>171</sup> Rappresentano i punti comuni visibili in più *frames*.

<sup>172</sup> Va precisato che, in entrambe le elaborazioni – *pre* e *post control point* – i settaggi computazionali del processo sono stati impostati ad una qualità elevata per ottenere un prodotto metricamente e morfologicamente accurato.

e non ripetere ulteriormente il processo poiché il risultato a cui si è pervenuti è stato considerato adeguato ai fini della ricerca. La scelta effettuata è stata accompagnata anche da valutazioni circa l'eventuale errore che potrebbe prodursi con forzature eccessive delle corrispondenze, le quali, inoltre, non garantiscono variazioni significative utili alle successive fasi di analisi.

La nuvola di punti rada è stata in seguito oggetto di infittimento (punti totali 2.443.222): operazione necessaria per la corretta individuazione delle caratteristiche – in particolare le diverse quote di colmo – e degli elementi costituenti le strutture di copertura dell'Hospital Simón Ruiz.

Le fasi di lavorazione in *RealityCapture* sono state concluse con un primo filtraggio della nuvola densa volto prevalentemente a rimuovere le porzioni di modello rappresentative del contesto, poiché ritenute non rilevanti in questa fase della ricerca (fig. 5.24). In tal modo, si è ottenuto un dato strettamente legato agli obiettivi prefissati e, al contempo, di più agevole gestione nelle successive operazioni di integrazione, per le quali si è scelto di ragionare per sovrapposizione piuttosto che per fusione delle nuvole di punti al fine di potere individuare e manipolare separatamente – anche in seguito – il dato *image-based* e quello *range-based*.



Fig. 5.24 – Esito finale del processo di elaborazione videogrammetrica dei *frames* delle coperture (visualizzazione del modello *mesh*).

Elaborazione M. Pulcrano.

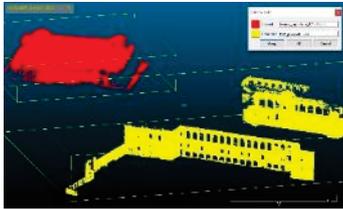


Fig. 5.25 – Processo di allineamento nel software *CloudCompare*: individuazione del modello di riferimento.

Elaborazione M. Pulcrano.

L'integrazione dei modelli *reality-based* è stata ottenuta sfruttando il software *CloudCompare* secondo l'iter precedentemente visto (Cfr. par. 5.2.2), che, però, è stato ridimensionato alla sola fase di allineamento dei modelli. Dunque, convertita nel formato compatibile *.xyz* la nuvola di punti videogrammetrica delle coperture ed estrapolata dal rilievo *range-based* la porzione di modello da utilizzare come riferimento (fig. 5.25), i due dati sono stati importati nell'applicativo scelto. La sovrapposizione è avvenuta individuando nei fronti Nord-Ovest del giardino e Sud-Est della Corte, e negli elementi che li caratterizzano, i punti di connessione che definiscono le *equivalent point pairs* (fig. 5.26).

Il processo eseguito, in pratica, ha permesso di collocare correttamente il modello videogrammetrico in ambiente digitale nello stesso sistema di riferimento relativo del modello *range-based*. Ma affinché esso sia codificato e compatibile con tutti gli altri dati di rilievo, è stato necessario eseguire un'ultima fase di lavorazione che ha previsto la registrazione nel formato finale *.rpf*, procedendo con operazioni di esportazione dal software *CloudCompare* e di importazione nel software *Autodesk Recap PRO*.

Fig. 5.26 – Individuazione delle *equivalent point pairs* e sovrapposizione dei modelli. Vista dello spazio modello *pre* e *post* allineamento.

Elaborazione M. Pulcrano.

In quest'ultimo applicativo, infine, è stata eseguita un'ulteriore fase di pulizia manuale della nuvola di punti videogrammetrica, più accurata rispetto alla precedente, volta alla rimozione del rumore generate sulle forme del complesso ospedaliero e all'estrapolazione dei soli dati utili alle fasi successive della ricerca.



CAPITOLO SESTO

**IL MODELLO H-BIM DELL'HOSPITAL SIMÓN RUIZ**  
***Framework di progetto e sviluppi operativi della  
modellazione informativa***

La nuvola di punti, ottenuta dal processo di rilievo *reality-based* illustrato nel precedente capitolo, rappresenta di fatto un modello discreto della realtà, senza soluzione di continuità e indistintamente caratterizzato negli elementi che lo compongono. Ciononostante, costituisce uno strumento imprescindibile nella definizione spaziale dell'Hospital Simón Ruiz. Il confronto e l'integrazione con i risultati delle ricerche bibliografiche e documentali, eseguiti anche col supporto della lettura visiva delle parti costituenti il manufatto, hanno reso però necessarie riflessioni preliminari sui diversi aspetti che interessano la costruzione del modello H-BIM, al fine di pervenire ad una riproposizione digitale del manufatto coerente con la realtà che rappresenta e scevra da possibili difformità nelle informazioni ad essa associate.

Nella costruzione delle forme tridimensionali, ad esempio, il ritmo, la regolarità e la ripetitività di alcuni elementi nella composizione degli alzati

se da un lato hanno consentito di intravedere soluzioni operative in linea con le logiche di parametrizzazione e ripetibilità della metodologia BIM, dall'altro hanno imposto l'individuazione di regole di semplificazione e principi di astrazione su cui fondare la costruzione del modello e dei componenti che lo connotano. Si è pervenuto in tal modo ad un modello puramente geometrico che garantisce una certa verosimiglianza col manufatto costruito. La verifica del grado di discostamento, con analisi delle divergenze tra la nuvola di punti e il modello parametrico, ha consentito la validazione del processo sulla base della definizione di un *range* di tolleranze con valori prestabiliti ritenuti accettabili al perseguimento degli obiettivi prefissati. Il *workflow* consolidato per la modellazione H-BIM (Cfr. par. 2.1.1), dunque, si è trasformato, delineando e implementando nuove fasi operative di verifica per rispondere alle specifiche esigenze di conoscenza, interpretazione e rappresentazione imposte dal processo metodologico messo in atto.

Il modello geometrico è stato arricchito con contenuti informativi attraverso una puntuale caratterizzazione ontologica degli oggetti di cui si compone, rendendoli dunque *smart*. Tale operazione, in alcuni casi, è stata condizionata dall'interpretazione degli strumenti offerti dalla piattaforma utilizzata per la modellazione. Ognuna delle parti è stata dunque inclusa in specifiche categorie compositive e funzionali ed eventuali eccezioni sono state gestite individuando il componente digitale che meglio ne rappresenta il comportamento reale, in funzione anche del livello di dettaglio, geometrico e informativo, a cui si è voluto tendere. A tal proposito, viste le finalità che muovono la ricerca, si è ritenuto adeguato riferirsi ad un LOG D (oggetto *dettagliato*), poiché le informazioni derivanti dal rilievo *reality-based* consentono di caratterizzare adeguatamente la geometria delle diverse componenti del modello, a cui è stato associato un LOI inferiore – C (oggetto *definito*) – poiché la documentazione reperita non consente di informatizzare dettagliatamente gli *smart-objects*. Laddove le lacune dei dati strumentali e/o informativi non hanno consentito di rispettare il LOG e LOI prefissato, il livello immediatamente precedente

è stato ritenuto comunque sufficiente a soddisfare i requisiti della modellazione.

Scomposizione semantica, sintesi e redazione di abacature, analisi geometriche e proporzionali, gestione del *file di progetto* e *modellizzazione* degli *smart-objects*, verifiche di aderenza e congruenza, etc., sono quindi le tematiche affrontate in questa fase della ricerca.

## **6.1 Scomposizione del sistema attraverso lo studio della documentazione acquisita**

A valle della definizione del *workflow* operativo, presupposto per la modellazione H-BIM è stata quindi l'organizzazione e sistematizzazione dei contenuti del *corpus* documentale, al fine di individuare gli elementi costitutivi del manufatto e rintracciare le regole che ne gestiscono la composizione, oltre che le relazioni tra le parti. Un'attenta analisi, in questa fase preliminare, consente di affrontare adeguatamente la *modellizzazione* dei diversi *smart-objects* e la costruzione del modello complessivo in ambiente BIM. Ciò risulta ancora più vero in esempi del patrimonio storico-architettonico – come quello rappresentato dall'Hospital Simón Ruiz – dove è chiaramente leggibile la volontà di rifarsi a precisi schemi geometrici e relazionali.

La sintesi che accompagna tali riflessioni, se rapportata al disegno inteso come modello grafico di comprensione e all'uso di punti e linee significative, ne mette in luce gli aspetti caratterizzanti e si connota come rivelatrice delle qualità intrinseche e non immediatamente percepibili<sup>173</sup>. In

---

<sup>173</sup> *Con la redazione del disegno la complessa realtà di un oggetto viene sintetizzata attraverso la rappresentazione di alcuni suoi punti o linee significative. Il processo di riproduzione sintetica esalta le qualità intrinseche dell'oggetto, eliminando gli aspetti ridondanti o non essenziali: un disegno correttamente condotto può arrivare a «far vedere» ciò che è nascosto o poco visibile.* (Docci, 2009, p. 3)

tal senso, quindi, il disegno diviene strumento atto a decifrare l'architettura, poiché essa stessa se ne è servita per esser progettata (Dotto, 2009).

La possibilità di procedere con letture multi-livello e multi-tematiche, conduce alla costruzione di diversi modelli interpretativi – tanti quanti sono gli aspetti indagati (formali, percettivi, spaziali, cromatici, materici, ritmici, etc.) – che a partire dallo schema generale e con analisi sempre più approfondite, conducono a schemi di dettaglio per le singole parti che compongono il manufatto (Docci, 2009). È chiaro che, se la costruzione del modello grafico non si fonda sul ricalco inconscio ma sulla selezione critica degli elementi da rappresentare, un forte grado di soggettività permea il disegno. Il risultato che ne consegue, dunque, è strettamente legato alla cultura di chi lo esegue e soprattutto condizionato dal punto di vista e dalla capacità di lettura dello stesso (de Rubertis, 1994).

Le attività di scomposizione e ricomposizione delle parti, proprie dell'analisi grafica<sup>174</sup>, hanno da sempre caratterizzato il modo di vedere, percepire e studiare l'architettura, seppur con modalità diverse relazionate all'epoca e alla tipologia di manufatto indagato<sup>175</sup>. Se l'uso di modelli codificati sulla base degli elementi e dei rapporti presenti nella trattatistica, ad esempio, è di supporto per l'individuazione delle regole sottese

---

<sup>174</sup> Il prof. M. Docci relaziona l'analisi grafica alle teorie dello strutturalismo, adottandole come riferimento scientifico. Per cui, per esaminare adeguatamente un determinato fenomeno, è necessario scomporlo nelle parti costitutive, classificarle e, in seguito, ricomporle comprendendone le relazioni che le legano reciprocamente e con il tutto. Il fenomeno viene in tal modo *modellizzato* e consente di effettuare riflessioni in base a molteplici punti di vista. Al fine di rendere esaustiva l'analisi grafica di un manufatto architettonico è necessario, quindi, condurre diversi studi riguardanti, ad esempio, l'aspetto funzionale, strutturale-portante, formale, spaziale e il rapporto con il contesto. Tra queste, quella maggiormente significativa è quella che interessa gli elementi costitutivi che ne definiscono la spazialità e ne rappresentano la forma – chiusure laterali (facciate), collegamenti col terreno (attacchi a terra), coperture (tetti e terrazze), raccordi tra le chiusure laterali (soluzioni d'angolo), collegamenti esterno-interno (ingressi e atri), collegamenti verticali (scale e rampe) –. (Docci, 2009)

<sup>175</sup> Si ricorre all'analisi grafica anche nella progettazione di nuovi edifici come controllo formale delle idee prima che si tramutino in progetto d'architettura vero e proprio.

all'articolazione formale nelle architetture di impronta classica, esso stesso diviene meno corrispondente in quelle moderne e contemporanee poiché caratterizzate con registri linguistici completamente differenti. Da qui la necessità di individuare le analisi che risultano più pertinenti allo studio del manufatto in oggetto, diversificando le attività operative non solo in funzione del *know how* personale ma anche degli strumenti a disposizione e delle modalità di esplicitazione dei risultati. Non può, quindi, essere considerato un processo univocamente determinato, ma iterativo.

Appaiono evidenti le analogie tra il processo metodologico sotteso all'analisi grafica e la costruzione del modello H-BIM: si spazia dalla scomposizione e ricomposizione del sistema in elementi costituenti, alla multi-dimensionalità delle tematiche trattate, oltre che ai diversi punti di vista che possono interessare le analisi sul manufatto, e alla trasposizione del modello grafico in un modello geometrico in ambiente BIM che funga da guida per la costruzione del modello informativo.

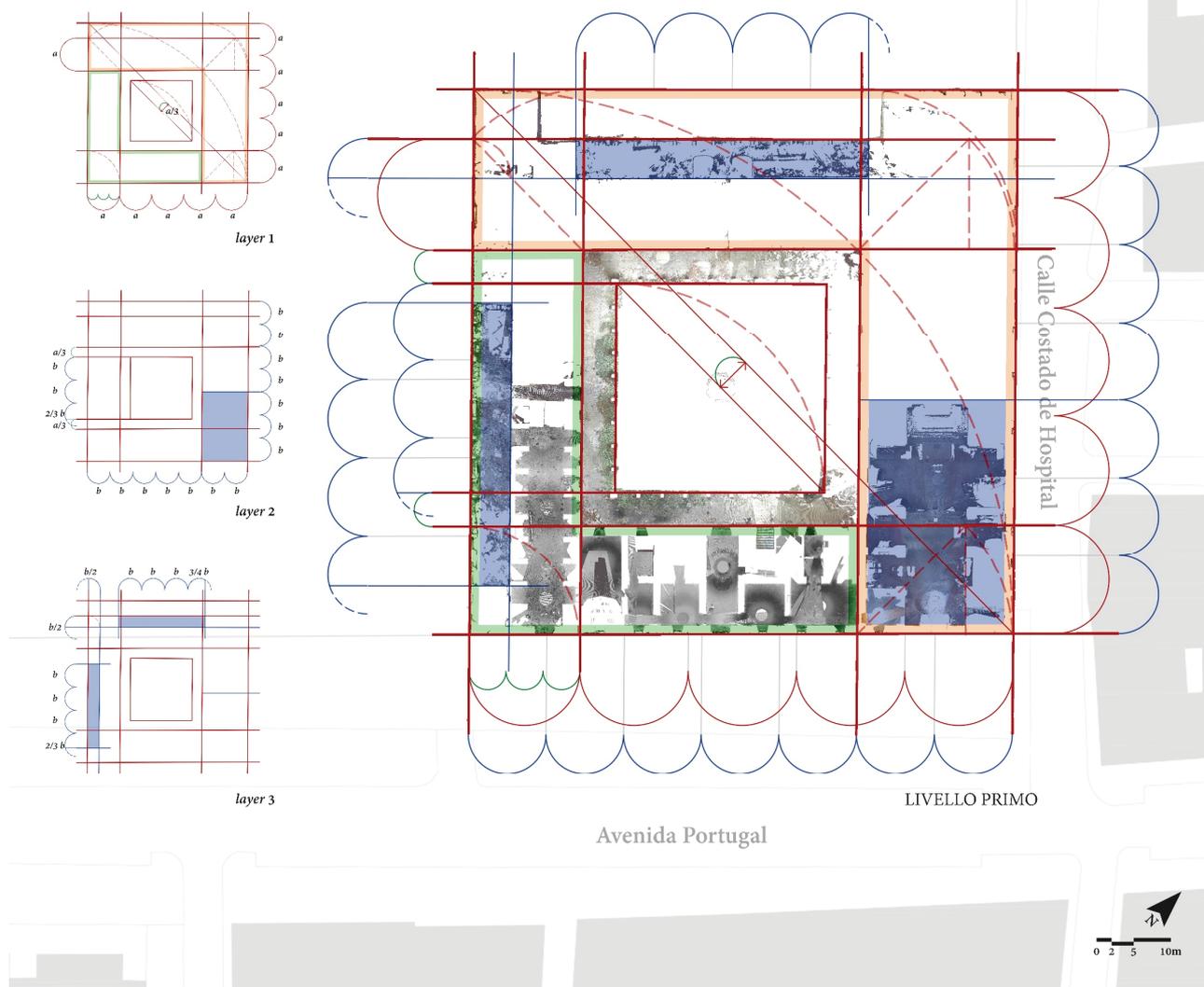
In tale ambito si muovono dunque le fasi preliminari delle analisi condotte sulla nuvola di punti dell'Hospital Simón Ruiz e sulle fonti documentali reperite, che hanno permesso di individuare sia rapporti geometrici e proporzionali generali sia informazioni di dettaglio per la strutturazione di abacature e schemi grafici.

### 6.1.1 Le regole compositive dell'Hospital Simón Ruiz

Dall'interpretazione degli ortofotopiani – di pianta, sezione e alzato – estratti dalla nuvola di punti *reality-based*, derivano i rapporti geometrici e le regole costitutive sottese alle forme dell'Hospital Simón Ruiz, che confermano parte delle ipotesi esplicitate da Luis Navarro García (Navarro García, 1998). Nello specifico, analisi generali hanno interessato la lettura della pianta e dei fronti, permettendo una visione d'insieme del complesso, mentre analisi di dettaglio sono state indispensabili per comprendere le proporzioni e la sintassi di elementi quali porte, finestre, arcate, etc.

Fig. 6.1 – Analisi geometriche e proporzionali dello sviluppo planimetrico dell'Hospital Simón Ruiz: scomposizione in *layer* di lettura e studio d'insieme.

Elaborazione M. Pulcrano.



In pianta le proporzioni riscontrate mostrano il quadrato come figura geometrica regolatrice della composizione generale: il rapporto tra lo sviluppo longitudinale e quello trasversale, infatti, è di circa 1:1. La mancanza di assialità della corte interna, che presenta anch'essa il medesimo rapporto geometrico, si riflette nella configurazione dei bracci del complesso che risultano a due a due corrispondenti, conformando delle L che, di fatto, la cingono e si incastrano nel generare la forma d'insieme. In particolare, i bracci posti in direzione Sud-Est, ovvero il fronte principale su *Avenida Portugal*, e quello Sud-Ovest, che guarda al giardino interno, hanno una dimensione inferiore agli altri due e, se considerata la loro larghezza come modulo di base  $a$ , si ha che lo sviluppo del complesso è pari a  $5 a$ . Gli altri due bracci – Nord-Ovest e Nord-Est (fronte su *Calle Costado de Hospital*) –, invece, presentano una larghezza pari a  $1,5 a$ <sup>176</sup>. Di conseguenza, è definibile la traslazione che caratterizza la posizione della corte, pari ad  $a/3$  in direzione Sud (fig. 6.1 *layer 1*).

La Chiesa, posta nell'angolo inferiore destro, ha invece un rapporto proporzionale di 2:3 nello sviluppo longitudinale e trasversale; se si individua in essa un nuovo modulo  $b$  e lo si pone in relazione con  $a$ , il loro rapporto è di circa 3:4. Attraverso  $b$  sono esprimibili anche le dimensioni della corte, pari a  $(2+2/3) b$ , mentre nel porticato che ne definisce i limiti e ne filtra il rapporto con le aree interne del complesso si ripresenta il modulo  $a$ , poiché la larghezza è pari a circa  $a/3$  (fig. 6.1 *layer 2*).

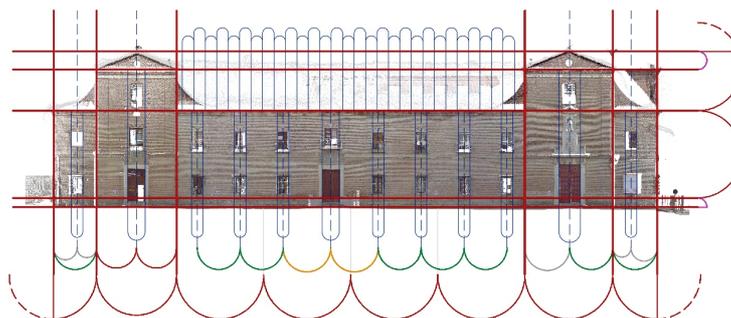
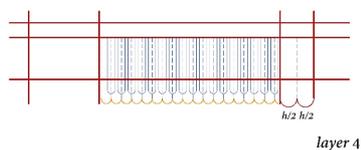
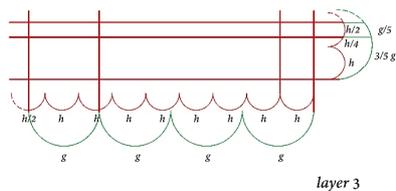
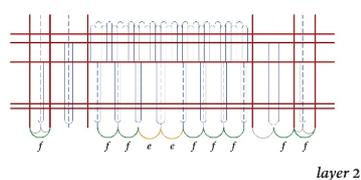
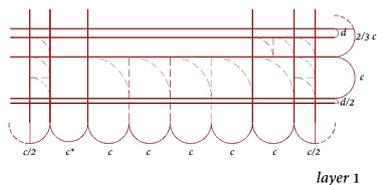
Diversamente, i porticati che danno verso il giardino sono esprimibili attraverso il modulo  $b$ . Essi infatti presentano una medesima larghezza pari a  $b/2$ , mentre nello sviluppo longitudinale differiscono leggermente, essendo pari a  $(3 + 2/3) b$  nel fronte Sud-Ovest e  $(3 + 3/4) b$  in quello Nord-Ovest (fig. 6.1 *layer 3*).

---

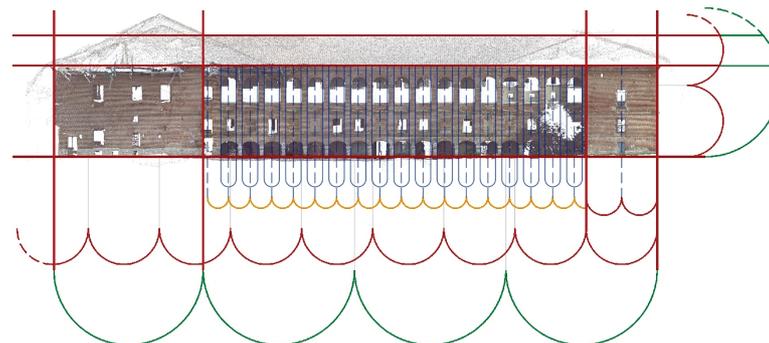
<sup>176</sup> Va precisato, però, che la configurazione pocanzi definita subisce una variazione formale se si escludono dalle considerazioni effettuate le porzioni aggettanti poste alle due estremità del fronte Nord-Ovest che guarda al giardino. Infatti, valutando le dimensioni che il braccio assumerebbe al netto di queste parti, pari a quelle in direzione Sud-Ovest e Sud-Est, non avremmo una doppia L, bensì una C.

Fig. 6.2 – Analisi geometriche e proporzionali del fronte su *Avenida Portugal* (Sud-Est) e Nord-Ovest.

Elaborazione M. Pulcrano.



FRONTE SUD-EST  
(Avenida Portugal)

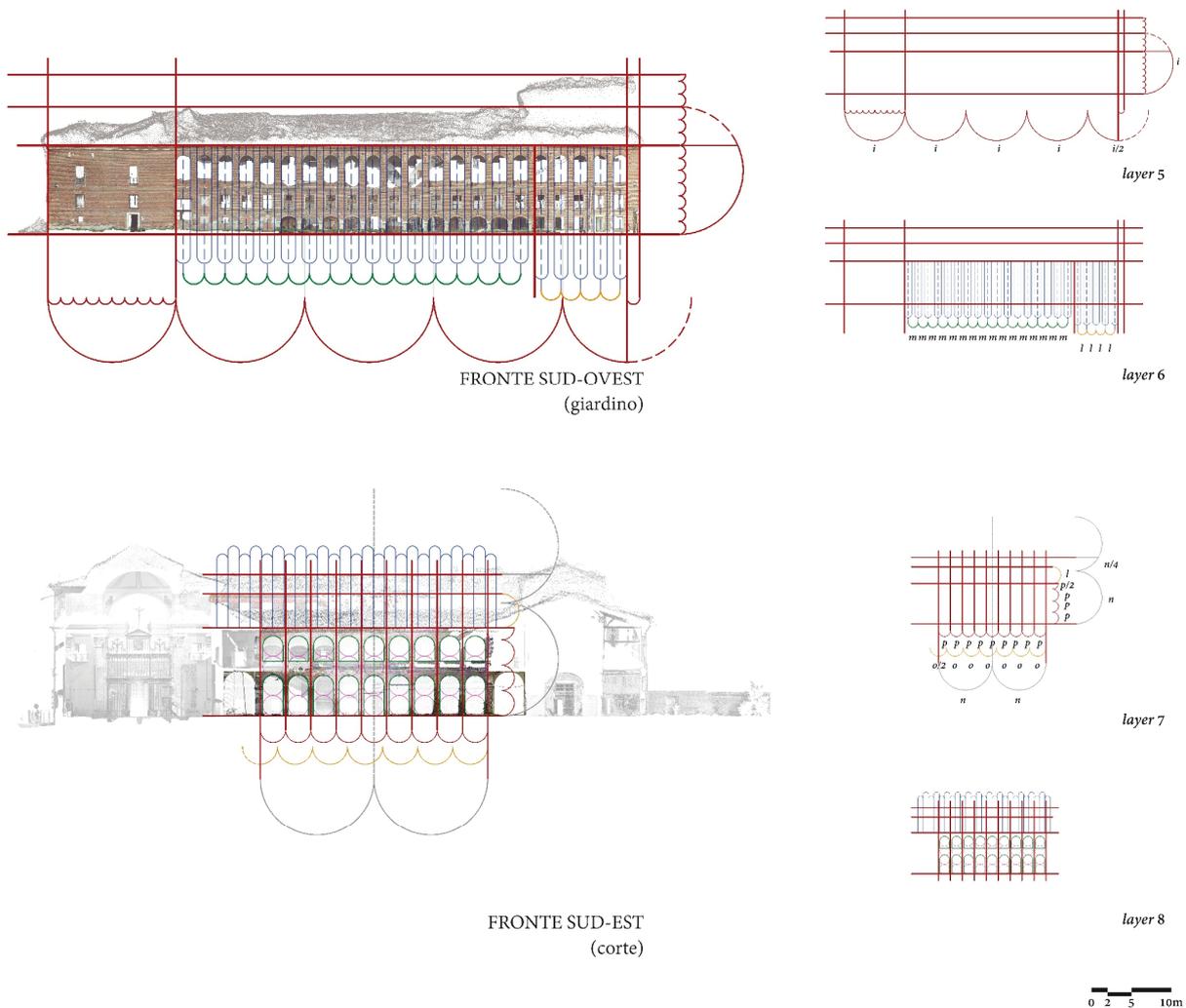


FRONTE NORD-OVEST  
(giardino)

0 2 5 10m

Fig. 6.3 – Analisi geometriche e proporzionali dei fronti Sud-Ovest e Sud-Est (corte).

Elaborazione M. Pulcrano.



È chiaro che le riflessioni appena esplicitate sulla composizione planimetrica, se condotte senza l'ausilio di studi preliminari e/o supporti grafici di riferimento non avrebbero prodotto i medesimi risultati, poiché la ripetitività di moduli e le proporzioni tra le parti che descrivono il manufatto non sono facilmente percepibili.

Lo studio dei fronti dell'Hospital Simón Ruiz, invece, appare più semplice e immediato e, sin dalle prime analisi in sito, è emerso chiaramente un preciso schema compositivo (Cfr. par. 4.2.2), in seguito confermato dalle analisi più approfondite eseguite sugli ortofotopiani degli alzati.

Ad esempio, su *Avenida Portugal*, individuata nella larghezza della porzione del fronte che descrive l'accesso alla Chiesa annessa al complesso il modulo  $c$ , il suo sviluppo risulta pari a  $6c$  implementato di un ulteriore quantità  $c^*$ , corrispondente all'accesso opposto che si discosta dal precedente di circa  $85\text{ cm}^{177}$ .

Analogamente alla composizione planimetrica, anche qui il quadrato è la figura geometrica prevalente. Infatti, ponendo come riferimento la quota superiore dello zoccolo in pietra ed escludendo dal computo la parte sommitale timpanata, sono chiaramente leggibili diversi quadrati disposti in sequenza. Nello specifico, la parte centrale del fronte, che definisce un ulteriore vincolo in altezza dato dalla presenza del cornicione aggettante, appare costituita da 4 quadrati. Mentre nell'accesso alla Chiesa e nelle appendici laterali estreme, ne sono individuabili 3 totali derivanti dalle dimensioni complessive e dai rapporti proporzionali che tali porzioni presentano – rispettivamente, pari a  $1:1,5c$  e  $1:3c$  – (fig. 6.2 *layer 1*).

---

<sup>177</sup> La distanza di riferimento  $c$  è pari a circa  $10,75\text{ m}$ ; di conseguenza, la differenza riscontrata con il modulo  $c^*$  è stata ritenuta significativa nella lettura della matrice formale del fronte. Se non fosse stata rilevata tale disparità, sarebbe stato possibile porre in analogia il modulo  $c$  con il modulo  $a$  dell'analisi planimetrica. Ma anche in questo caso, una leggera variazione, risultate dagli elementi che caratterizzano il fronte e dalla loro collocazione nello sviluppo dello stesso, porta a traslare l'inizio della sequenza ritmica di metà modulo.

A questa prima schematizzazione generale, le analisi più di dettaglio hanno dato luogo all'individuazione della scansione ritmica che caratterizza il fronte, espressa mediante moduli che si ripetono nell'alternanza tra pieni e vuoti. Fanno eccezione alcuni elementi, come il portale di accesso alla Chiesa e le fasce piene poste alla estremità della parte centrale del fronte, che risultano indipendenti dallo schema formale.

Infine, l'ultimo livello, sebbene presenti comunque una forte regolarità e un rimando dimensionale agli altri elementi, risulta completamente distaccato dal disegno sottostante, presentando una propria sequenza ritmica (fig. 6.2 *layer 2*).

Nel fronte Nord-Ovest che guarda al giardino interno, invece, la costante quadrata emersa dalle analisi precedenti – eletta quale elemento regolatore generale – viene a mancare. Infatti, pur procedendo con ragionamenti assimilabili a quelli del fronte su *Avenida Portugal*, ovvero relazionando lo sviluppo longitudinale con l'altezza complessiva sulla base di moduli desumibili dalle diverse parti che compongono il fronte, i risultati conducono a schematizzazioni differenti. Queste sono inoltre influenzate dalla diversa disposizione, tipologia e dimensione delle aperture che lo connotano.

I primi rapporti individuabili, quindi, sono legati ad una lettura complessiva del fronte che appare esprimibile secondo più relazioni in funzione della porzione intesa come modulo di base<sup>178</sup>. Analogamente, la suddivisione tra le parti estreme e quella centrale può essere rapportata agli stessi (fig. 6.2 *layer 3*).

La tripartizione del fronte si riflette anche sulle aperture, connotandole con caratteristiche differenti: piccole e in numero ridotto nelle estremità, ampie e numerose nella parte centrale. Di conseguenza, le prime determinano una prevalenza di spazi pieni, mentre le seconde aprono il

---

<sup>178</sup> Nello specifico, è stata riscontrata una relazione di  $4:4/5$  *g*, se si considera come modulo di base *g* l'ampiezza della parte estrema sinistra, e di  $(8+1/2):(1+3/4)$  *b*, se invece si considera quella opposta. Escludendo dalle analisi la copertura *e*, conseguentemente, considerando la sola porzione verticale del fronte, tali rapporti si trasformano in  $4:3/5$  *g* e  $(8+1/2):(1+1/4)$  *b*.

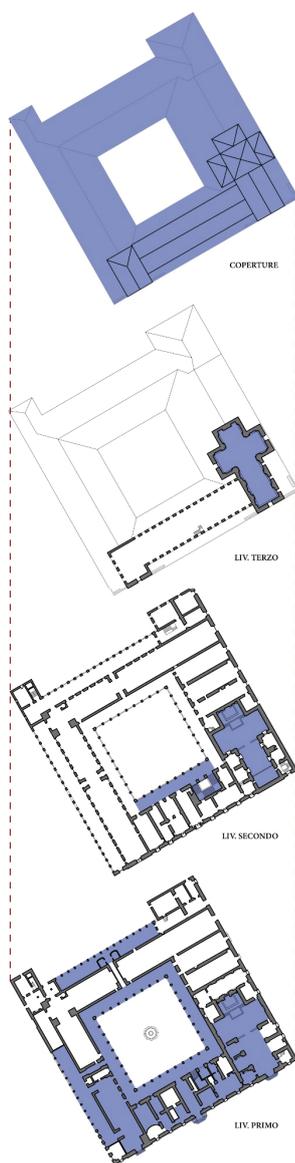


Fig. 6.4 – Pianta del complesso dell'Hospital Simón Ruiz con messa in evidenza (in blu) delle aree acquisite mediante rilievi *reality-based*.

Elaborazione M. Pulcrano.

fronte verso il giardino. Queste ultime, in particolare, sono organizzate per fasce orizzontali di tipologie differenti, con arcate policentriche nella parte inferiore e arcate a tutto sesto in quella superiore. Nel mezzo un filare di finestre rettangolari che, disposte assialmente rispetto alle precedenti, completano il disegno della campata tipo, la cui ripetizione da luogo allo sviluppo centrale del fronte. Esulano dal disegno complessivo le campate estreme (fig. 6.2 *layer 4*).

Le descrizioni formali su esposte vedono esplicitate le riflessioni condotte su alcune componenti esemplificative dell'Hospital Simón Ruiz. Ciononostante, le analisi sono state condotte anche per altre porzioni del manufatto, delle quali si riporta parte dei risultati (fig. 6.3).

### 6.1.2 L'organizzazione dei dati e la strutturazione di abacature grafiche e tabelle

Contestualmente all'analisi grafica degli ortofotopiani è stata eseguita una prima digitalizzazione del dato di rilievo in ambiente CAD. Tale scelta operativa, sebbene appaia contraddittoria in relazione al processo ormai consolidato di modellazione in aderenza alla nuvola di punti direttamente in ambiente BIM, in realtà è spinta dalla necessità di integrare le parti mancanti del rilievo (fig. 6.4) con la documentazione grafica reperita. Nello specifico, si è scelto di riferirsi al rilievo precedentemente condotto da Luis Navarro Garcia, poiché appare quello più completo, esaustivo e rappresentativo dello stato attuale dei luoghi<sup>179</sup>. Verifiche preliminari nelle parti comuni ai rilievi sono state di supporto per eliminare le incongruenze esistenti e garantire l'affidabilità delle informazioni nei disegni vettoriali.

<sup>179</sup> La documentazione altra a cui si fa riferimento, nello specifico, riguarda le elaborazioni grafiche redatte da Antonio Ponz alla fine del XVIII secolo (pianta piano terra, fronte principale e sezione longitudinale della Chiesa) e gli elaborati dell'inizio del XXI secolo che rappresentano esclusivamente la porzione della Chiesa poiché oggetto di intervento di restauro e rifacimento delle coperture.

**IL MODELLO H-BIM DELL'HOSPITAL SIMÓN RUIZ**  
*Framework di progetto e sviluppi operativi della modellazione informativa*

Fig. 6.5 – Pianta delle coperture dell'Hospital Simón Ruiz in relazione al contesto urbano in cui è inserito il complesso.

Elaborazione M. Pulcrano.

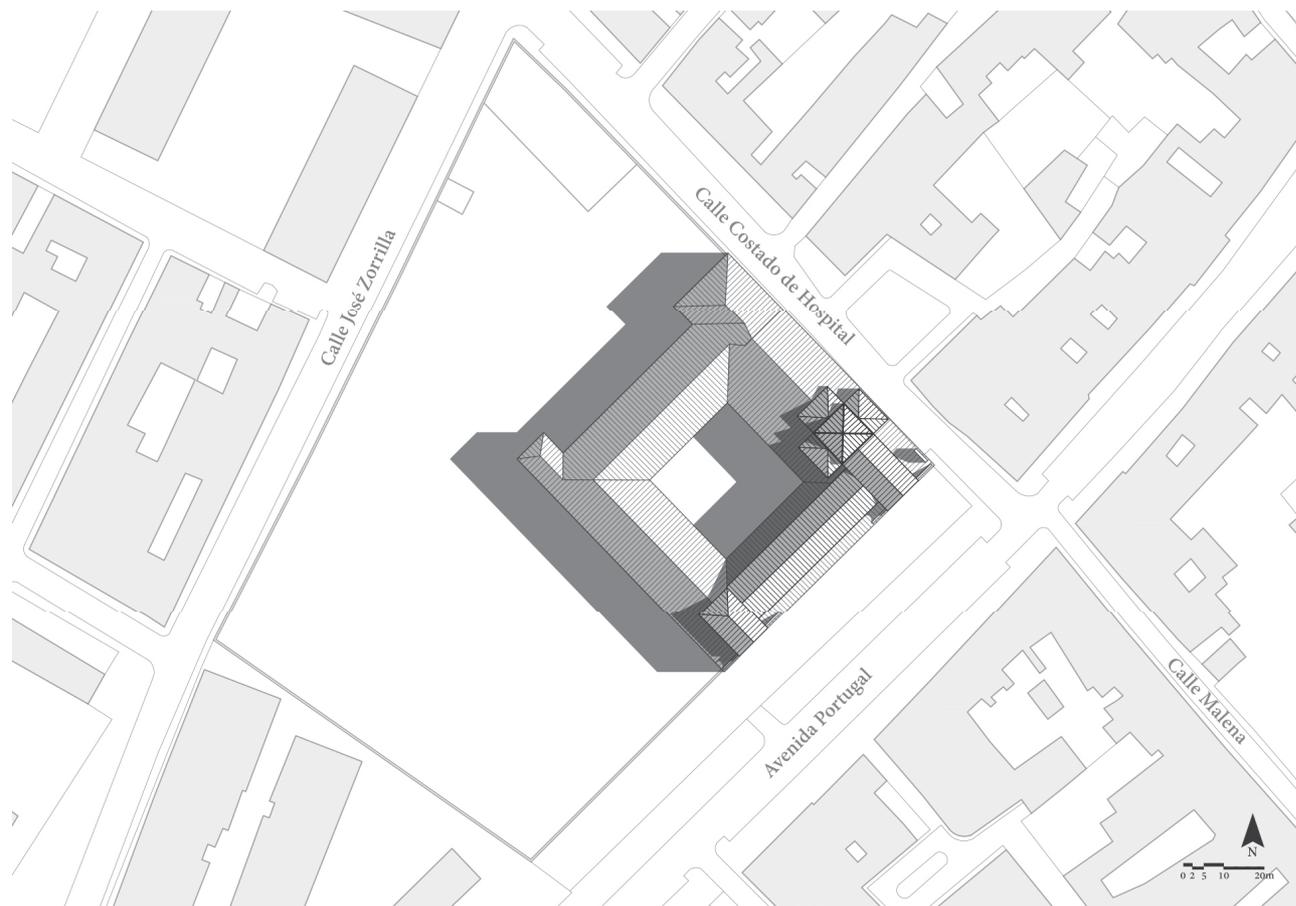
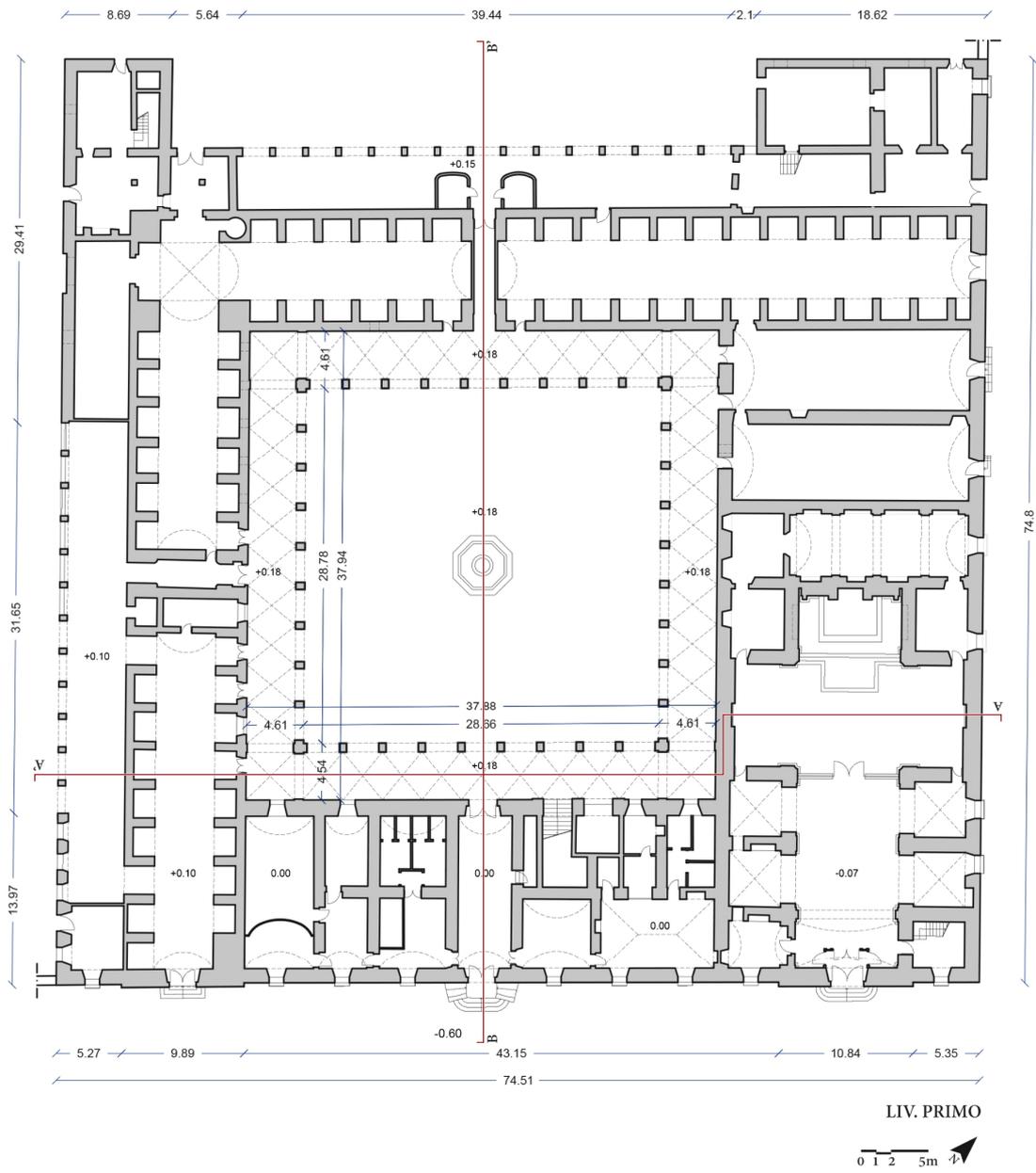
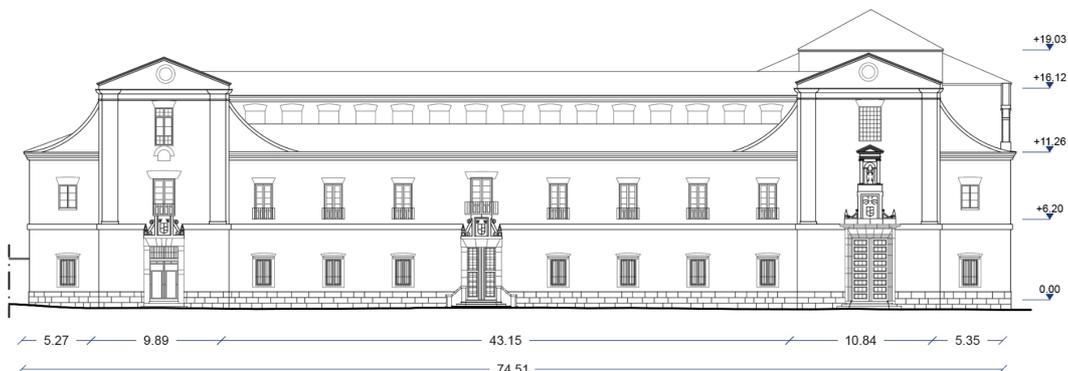


Fig. 6.6 – Pianta del primo livello  
(piano terra).

Elaborazione M. Pulcrano.

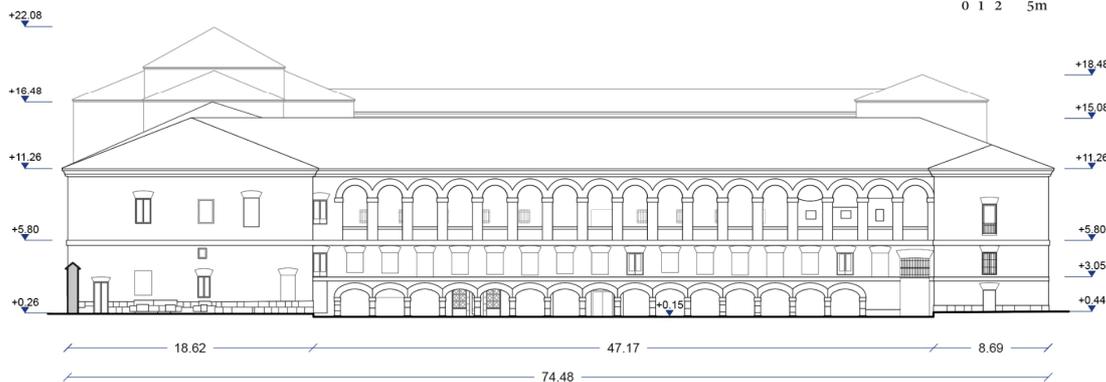


IL MODELLO H-BIM DELL'HOSPITAL SIMÓN RUIZ  
 Framework di progetto e sviluppi operativi della modellazione informativa



FRONTE SUD-EST  
 Avenida Portugal

0 1 2 5m



FRONTE NORD-OVEST

0 1 2 5m



SEZIONE AA'

0 1 2 5m

Fig. 6.7 (pagina precedente) –  
Fronte principale su *Avenida Portugal*,  
fronte Nord-Ovest del giardino interno  
e sezione AA'.

Elaborazione M. Pulcrano.

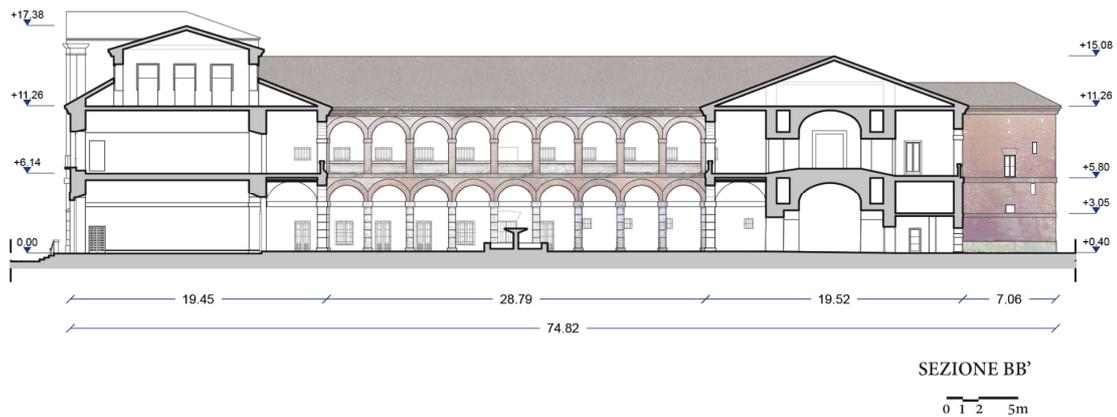
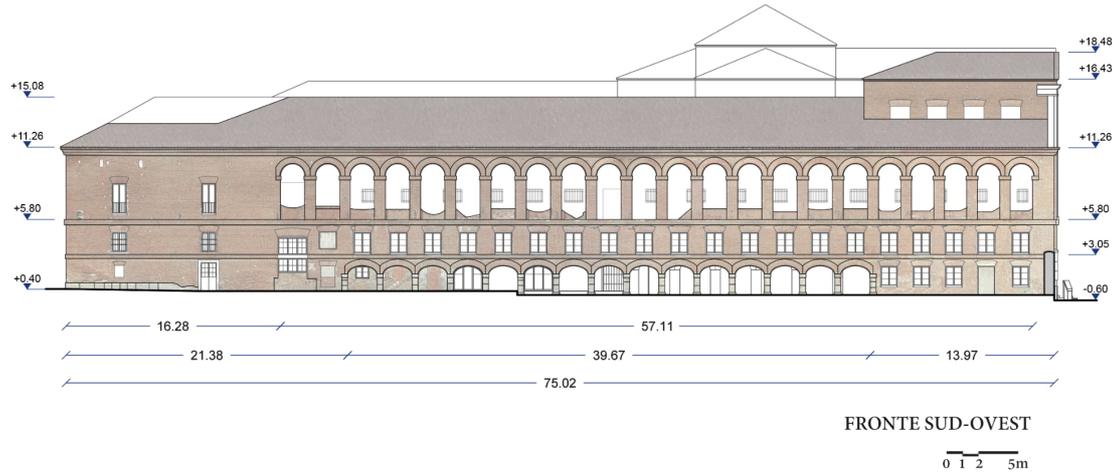
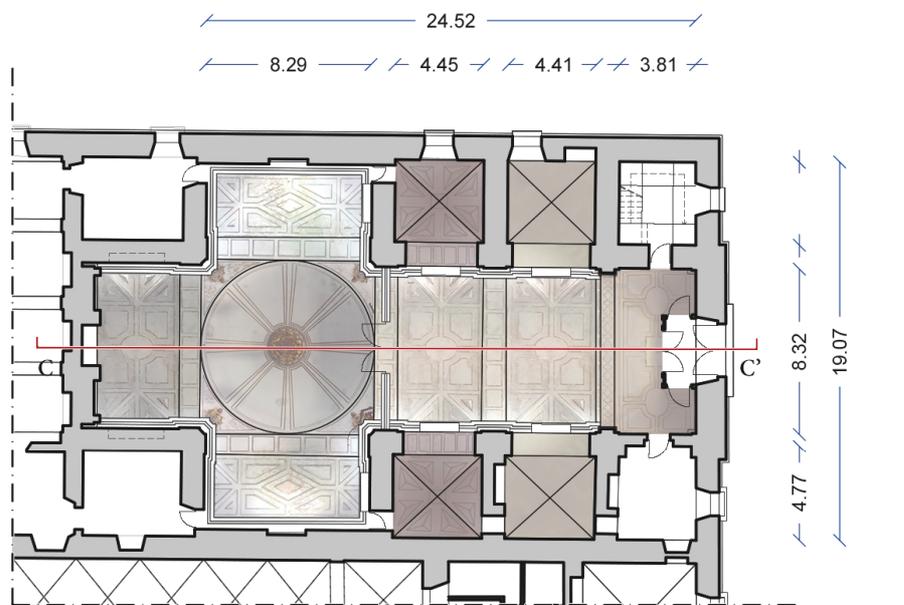


Fig. 6.8 – Fronte Sud-Ovest  
prospiciente il giardino e  
prospetto-sezione BB' della  
corte interna.

Elaborazione M. Pulcrano.



LIV. PRIMO

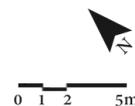


Fig. 6.9 – Ipografia e sezione longitudinale della Chiesa annessa al complesso.

Elaborazione M. Pulcrano.

### ARTICOLAZIONE DELLE FAMIGLIE NEL SISTEMA BIM AUTODESK REVIT

Le *famiglie di sistema* (muri, pavimenti, tetti, scale, livelli, quotature, etc.) sono elementi predefiniti e già caratterizzanti il file o ambiente di progetto (.rvt) e le uniche modifiche di cui possono essere oggetto sono la duplicazione del tipo e la caratterizzazione degli attributi al fine di essere rispondenti al componente reale.

Le *famiglie caricabili* o *componenti standard* (porte, finestre, pilastri, arredi, profili, etc.), invece, sono costruite in ambienti dedicati (editor delle famiglie) e, sebbene partano da modelli preimpostati (template) che ne definiscono la categoria di appartenenza e le relazioni con gli altri componenti, presentano una maggiore flessibilità nella gestione dell'elemento in termini di creazione delle forme e di parametrizzazione. A differenza dell'ambiente di progetto, infatti, nei template sono implementati tools per la costruzione e l'editing delle forme – in analogia con i più tradizionali software di modellazione solida – con specifici strumenti correlati alla tipologia di oggetto 2D o 3D da realizzare.

È evidente, però, che la scelta del template influisce sul comportamento dell'oggetto e non sempre risulta scontata, comportando, di fatto, riflessioni attente e accurate. In generale, una scelta errata impone la (continua)

Analogamente, si è proceduto con l'organizzazione degli altri dati – desunti prevalentemente da immagini fotografiche e fonti testuali – e con la strutturazione di *report* di sintesi sottoforma di abacature grafiche e tabellari. Ogni componente del sistema edilizio è stato classificato in funzione delle caratteristiche che presenta, delle relazioni che sussistono con gli altri componenti e delle procedure pratiche di modellazione da attuare (costruzione geometrica e categorizzazione). In altre parole, si sono prefigurati degli scenari plausibili per la *modellizzazione* degli *smart-objects*, ai fini di un processo efficace ed efficiente, speditivo nell'applicazione pratica e che non risenta di problemi di ridondanza o incoerenza del dato. Al contempo, si è tenuto conto dell'organizzazione logico-funzionale della piattaforma di modellazione.

A tal proposito, va precisato che *Autodesk Revit*<sup>180</sup> – software scelto per la costruzione del modello H-BIM – in linea con i principi di strutturazione IFC e di classificazione in *tipi*, *classi* e *superclassi*, suddivide le diverse componenti del sistema edilizio in *famiglie di sistema* e *famiglie caricabili*<sup>181</sup> (fig. 6.10). Ogni *categoria* (o *superclasse*) è composta da una o più *famiglie* (o *classe*), in relazione agli attributi geometrici e non geometrici che presenta, a loro volta ulteriormente suddivise in *tipi* – memorizzati nel *file master* della *famiglia* –, in base alle singole specificità. Alle *famiglie di sistema* e *caricabili*, si aggiungono le *famiglie specifiche* o *locali* ottenute mediante modellazione *in place* nell'*ambiente di progetto* dell'elemento dedicato.

In particolare, l'assemblamento di *famiglie caricabili*, consente la creazione di *smart-objects* complessi attraverso processi di scomposizione, ricomposizione e *ridificazione* di elementi più semplici. La corretta associazione dei parametri e dei vincoli geometrici-relazionali tra la *famiglia*

<sup>180</sup> <https://www.autodesk.it/products/revit/overview>

<sup>181</sup> In realtà, tutto le componenti in *Revit* sono basate sul concetto di *famiglia*; non solo, quindi, quelle costituenti il sistema edilizio, ma anche gli elementi di supporto e gestione grafica del progetto (le annotazioni grafiche e testuali, il sistema di quotatura, le tavole e gli abachi, etc.) sono strutturati come *famiglie* personalizzabili.

ospitante (*host*)<sup>182</sup> e quelle ospitate (*famiglie nidificate*) è funzionale alla gestione delle variazioni dei diversi componenti costituenti la *famiglia* risultante. Dunque, le *famiglie caricabili* consentono di costruire una vera e propria libreria esterna all'*ambiente di progetto* – in formato *.rfa* –, personalizzabile anche negli aspetti grafici grazie alla definizione delle modalità di visualizzazione degli elementi in riferimento ai livelli di dettaglio e alle specifiche viste di pianta, alzato e 3D<sup>183</sup>.

La schematizzazione dei dati (fig. 6.11), dunque, rappresenta la sintesi delle diverse riflessioni condotte e si è rivelata funzionale alla costruzione del modello H-BIM. Sono state vagliate le diverse implicazioni pratiche legate all'utilizzo del *software Revit* ipotizzando scelte operative che, in fase di modellazione vera e propria, sono state validate e/o ricalibrate sulla base delle specificità effettivamente riscontrate.

Alle abacature grafiche e tabellari sono stati associati disegni vettoriali codificati con opportuni *layers* e simboli grafici al fine di agevolarne la lettura con rappresentazioni sintetiche ma chiare ed esplicative delle analisi preliminari. Pur essendo selettivi e simbolici, i CAD predisposti mettono in luce specificità e componenti dell'Hospital Simón Ruiz, sia di carattere generale che negli elementi di dettaglio. Infine, in tali rappresentazioni si è

<sup>182</sup> Al concetto di *host* si lega anche la possibilità di costruire *smart-objects* che per poter essere collocati nell'*ambiente di progetto* necessitano di riferimenti (linee, piani di lavoro e superfici). Il vincolo che lega il componente finestra al componente muro, ad esempio, è una relazione del tipo *basato su muro* (Cfr. par. 2.1, nota 42), che ne impone la presenza affinché l'oggetto categorizzato come finestra possa essere correttamente posizionato. Se nella progettazione *ex-novo* tale espediente consente di gestire particolari soluzioni compositive, nella modellazione H-BIM rappresenta il presupposto per condurre ragionamenti critici sulle relazioni che sussistono tra gli oggetti del modello già previsti nelle piattaforme e quelli non previsti come paraste, cornici modanate, elementi decorativi, etc.

<sup>183</sup> Le modalità di visualizzazione dei componenti bidimensionali (annotazioni, linee, retini, etc.) e tridimensionali in *Revit* segue logiche dinamiche impostate con parametri di istanza – scala della rappresentazione (da 1:5.000 a 1:1) e livello di dettaglio (*basso, medio, alto*) – e relazionate alla vista a cui si riferiscono. Variando tali parametri, l'oggetto si modifica per essere rispondete alle opzioni grafiche settate.

(segue)

*creazione ex-novo della famiglia in quanto non sono previste variazioni di categoria, ad eccezione di componenti assimilabili tra loro, come porte e finestre. Va precisato, però, che esistono template generici (mod. gen. metrico, mod. gen. metrico adattivo, mod. gen. metrico basato su linea/muro/superficie, etc.) che consentono di categorizzare l'oggetto scegliendo tra le famiglie caricabili quella maggiormente rispondente allo scopo, ma le caratteristiche che presenterà saranno comunque diverse dalla famiglia impostata col template originario. Ad esempio, una finestra così costruita non sarà conscia di dover svuotare il muro perché, di fatto, in essa non è presente l'apertura (o il solido di sottrazione) che impone tale vincolo relazionale.*

*Infine, le famiglie specifiche o locali associano alla gestione delle famiglie di sistema – non sono caricabili da/ in altri file di progetto – l'editor di costruzione ed editing delle forme delle famiglie caricabili, consentendo la definizione di smart-objects unici e di masse concettuali, ovvero elementi non standardizzabili e ripetibili, ma altamente personalizzabili. Va detto, però, che sebbene si palesino come strumento idoneo alla replica delle irregolarità e specificità del patrimonio costruito, il loro utilizzo incrementa la dimensione del file e gli oneri computazionali dell'hardware grafico, incidendo sensibilmente sulla gestione e sulla fluidità del modello.*

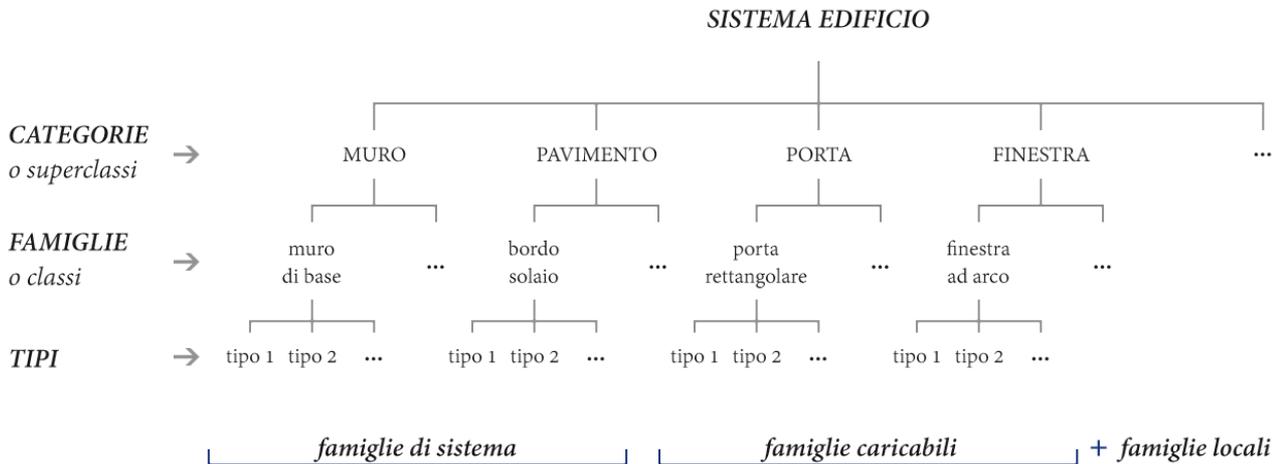


Fig. 6.10 – Scomposizione del sistema edificio nella logica BIM e nel sistema *software Autodesk Revit*.

Elaborazione M. Pulcrano.

scelto di riportare anche l'informazione sulle le porzioni di manufatto acquisite dalla strumentazione *reality-based* e quelle che invece sono state desunte dai rilievi precedenti.

## 6.2 Fasi operative nella costruzione del modello H-BIM

La modellazione H-BIM dell'Hospital Simón Ruiz ha visto il susseguirsi di diverse fasi operative (fig. 6.12) – a loro volta ulteriormente suddivise rispetto alle specifiche attività prefigurate – che dalle impostazioni generali del *file di progetto* hanno condotto alla configurazione del modello informativo:

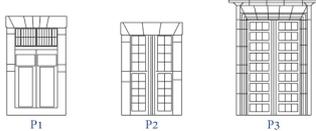
Fig. 6.11 (pagina seguente) – Report di sintesi delle analisi condotte sui diversi tipi di serramenti e aperture dell'Hospital Simón Ruiz. Esempificazione di alcune componenti del complesso mediante abaco grafico, tabellare e rappresentazione vettoriale.

Elaborazione M. Pulcrano.

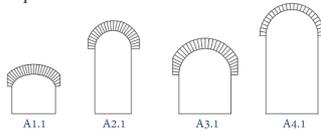
- predisposizione dell'*ambiente di progetto*;
- *modellizzazione* degli *smart-objects*: le componenti d'insieme;
- *modellizzazione* degli *smart-objects*: le componenti di dettaglio;
- *modellizzazione* degli elementi complessi: le superfici voltate.

**ABACO GRAFICO**

- portali



- aperture



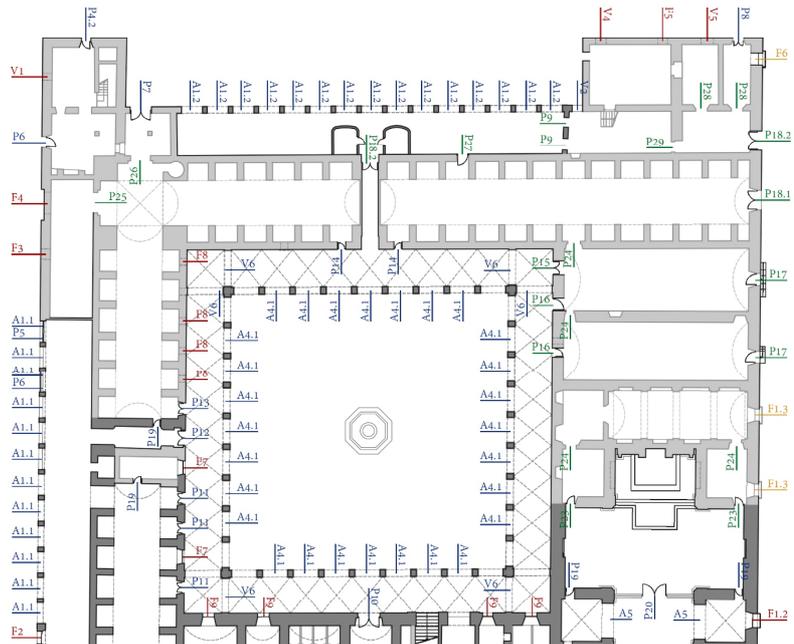
- porte



- finestre



**RAPPRESENTAZIONE VETTORIALE**  
 PIANTA LIVELLO PRIMO



**ABACO TABELLARE**

**ABACO DEI SERRAMENTI E DELLE APERTURE**

ID	DESCRIZIONE	COLLOCAZIONE	FRONTE	CATEGORIA	FAMIGLIA	TIPO	ANTA	LIVELLO	QUOTA	DIMENSIONI	RILEVATO
P2	portale di accesso centrale fronte principale	esterna	Sud-Ovest (Avenida Portugal)	porta	P2	tipo1	SP	primo	0.00 m	2.25 x 4.10 m	si
P3	portale di accesso Chiesa fronte principale	esterna	Sud-Ovest (Avenida Portugal)	porta	P3	tipo 1	SP	primo	0.00 m	2.70 x 4.83 m	si
A1.1	arcata policentrica su pilastri in pietra	esterna	Sud-Est	porta	A1	tipo 1	NP	primo	1.70 m	2.20 x 2.00 m	si
A1.2	arcata policentrica su pilastri in pietra	esterna	Nord-Est	porta	A1	tipo 1	NP	primo	1.62 m	2.17 x 2.00 m	si
P4.1	porta semplice	esterna	Sud-Est	porta	P4	tipo 1	SP	primo	0.10 m	1.30 x 2.20 m	si
P4.2	porta semplice	esterna	Nord-Est	porta	P4	tipo 2	SP	primo	0.50 m	0.98 x 1.70 m	si
P5	porta finestra con tre battenti e arco policentrico	esterna	Sud-Est	porta	P5	tipo 1	SP	primo	0.40 m	2.27 x 1.87 m	si
P7	porta di accesso a doppio battente lato giardino	esterna	Nord-Est	porta	P7	tipo 1	ANTA 5	primo	0.15 m	2.34 x 4.42 m	si
F1.1	finestra doppio battente con grata di protezione	esterna	Sud-Ovest (Avenida Portugal)	finestra	F1	tipo 1	ANTA 1	primo	1.56 m	1.22 x 2.10 m	si
F1.2	finestra doppio battente con grata di protezione	esterna	Nord-Est	finestra	F1	tipo 2	ANTA 1	primo	1.56 m	1.45 x 2.10 m	si
F1.3	finestra doppio battente con grata di protezione	esterna	Nord-Est	finestra	F1	tipo 3	ANTA 1	primo	1.56 m	1.22 x 2.10 m	no
F5	finestra a doppio battente	esterna	Nord-Est	finestra	F5	tipo 1	ANTA 6	primo	1.60 m	0.98 x 1.65 m	si
V4	vano vuoto con piattabanda e compagno	esterna	Nord-Est	finestra	V4	tipo 1	NP	primo	1.36 m	1.10 x 1.95 m	si
V5	vano vuoto con piattabanda e compagno	esterna	Nord-Est	finestra	V5	tipo 1	NP	primo	1.80 m	1.30 x 1.85 m	si

rilevato  
 non rilevato  
 cat. finestra rilevata  
 cat. finestra non rilevata  
 cat. porta rilevata  
 cat. porta non rilevata

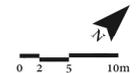




Fig. 6.12 – Fasi operative che hanno caratterizzato la costruzione del modello H-BIM dell'Hospital Simón Ruiz.

Elaborazione M. Pulcrano.

### 6.2.1 Predisposizione dell'*ambiente di progetto*

Preliminare alla fase operativa vera e propria è stata l'organizzazione dell'*ambiente di progetto*, con la definizione degli *input* di riferimento per la modellazione e la strutturazione del *browser di progetto*.

Il primo dato importato nello *spazio di modello* è stata la nuvola di punti mediante il collegamento dei gruppi in *.rpt* – unico formato che dialoga direttamente con *Revit*<sup>184</sup> – ottenuti dall'*editing* dei rilievi *reality-based* (Cfr. par. 5.1.2 e 5.3). La scelta di mantenere il raggruppamento per parti del manufatto e le informazioni di posizione relativa delle varie *scan position* consente una gestione più agevole del dato puntiforme nello spazio di lavoro *Revit*. Infatti, è possibile accendere e/o spegnere sia l'intero gruppo che i singoli *layer* delle nuvole di punti, apportando notevoli vantaggi nei processi *Cloud-to-BIM* per la lettura del modello *reality-based*, oltre che per gli oneri computazionali dell'*hardware* grafico utilizzato.

Il fronte principale in *Avenida Portugal* è stato scelto come riferimento per gli altri gruppi. Prima di procedere con il concatenamento delle nuvole di punti, però, si è reso necessario contestualizzare il gruppo del fronte nell'*ambiente di progetto*, attraverso la scelta della quota *zero* (coincidente con l'ingresso principale) e la direzione Nord di riferimento. È stato quindi scelto di variare il *Nord di progetto*<sup>185</sup>, allineando lo sviluppo del fronte ad un *piano di riferimento*<sup>186</sup> orizzontale, secondo una rotazione oraria di circa 48°.

<sup>184</sup> Va precisato che l'importazione di altri formati (*.asc*, *.e57*, *.fls*, *.las*, *.pts*, *.ptx*, *.txt*, etc.) è consentita ma avviene previa conversione e salvataggio in *.rpt* (progetto di nuvola di punti) o *.rvs* (nuvola di punti), mediante procedure di indicizzazione automatizzata del *file* in *Revit*, e non sempre produce i risultati attesi.

<sup>185</sup> Tra gli strumenti implementati in *Revit* vi è la possibilità di definire orientamenti diversi da quelli reali pur mantenendo l'informazione originale all'interno dell'*ambiente di progetto*. Quest'espediente permette di definire punti di vista diversificati in base alle esigenze di modellazione, ma di ritornare all'orientamento reale ogni qualvolta si rende necessario senza manipolare o compromettere il modello costruito.

<sup>186</sup> Sono delle guide di riferimento per la creazione e manipolazione degli elementi in ambiente *Revit*. Analogamente, nell'*editor delle famiglie* sono presenti anche *linee di riferimento* che, a differenza dei piani, presentano estensioni limitate (definite dai punti di inizio e fine), ma consentono una migliore gestione delle variazioni angolari.

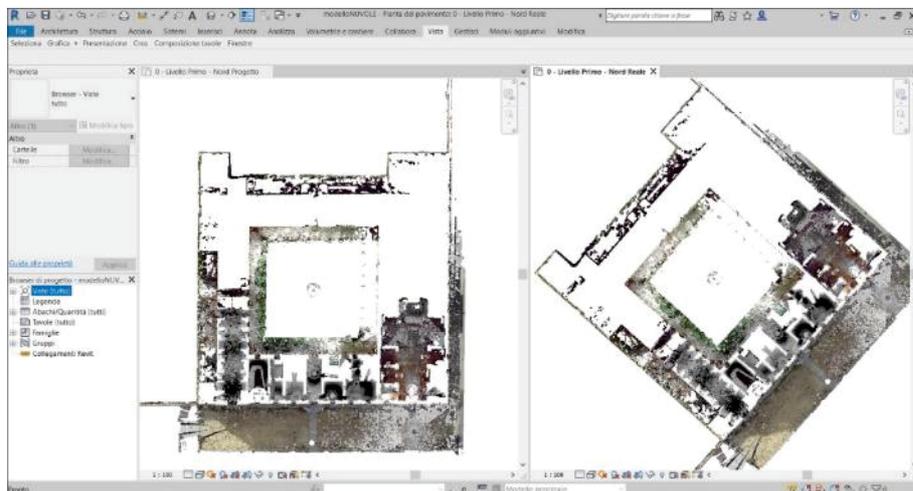


Fig. 6.13 – Visualizzazione affiancata della pianta del primo livello nello spazio modello Revit con orientamento Nord reale (vista sinistra) e Nord di progetto (vista destra).

Elaborazione M. Pulcrano.

L'inserimento delle altre nuvole di punti è quindi avvenuto impostando il collegamento sulle coordinate del gruppo precedentemente inserito – *da origine a ultimo posizionato* – così da consentire al software di leggere in automatico le variazioni di posizione e orientamento apportate per il fronte principale (fig. 6.13).

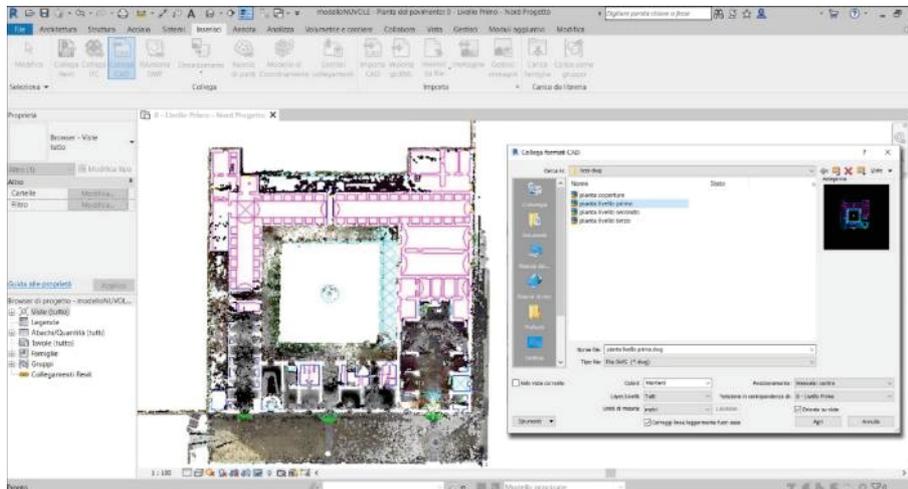
Attraverso viste di sezione e *snap* alla nuvola di punti, sul gruppo che riprende la scala interna del complesso si è basata l'impostazione dei livelli corrispondenti al camminamento della loggia del primo piano e alla quota di calpestio del piano superiore. Mentre la restituzione delle coperture mediante il processo videogrammetrico è stata fondamentale per definire correttamente i livelli corrispondente alle diverse quote di copertura. Livelli intermedi – imposta delle volte e delle arcate per i fronti interni e quota delle finestrate intermedie – sono stati posizionati al fine di agevolare la costruzione del modello H-BIM.

Contestualmente ai livelli, nel *browser di progetto*<sup>187</sup> sono state create automaticamente le corrispondenti viste di *pianta dei pavimenti* e dei

<sup>187</sup> Rappresenta il cuore del *file di progetto*, dove sono organizzate, secondo una gerarchia logica, tutte le componenti del modello BIM: le viste di pianta, sezione, alzato e 3D, i

Fig. 6.14 – *Input* di riferimento per la costruzione del modello H-BIM dell’Hospital Simón Ruiz: disegni CAD sovrapposti alla nuvola di punti *reality-based*.

Elaborazione M. Pulcrano.



*controsoffitti*, utili nel posizionamento dei diversi *smart-objects* e per l’inserimento dei disegni CAD – visti al punto precedente –. Per questi ultimi, in particolare, si è scelto di non precludere l’eventuale modifica o aggiornamento del dato vettoriale procedendo con le opzioni di collegamento<sup>188</sup> e definendo le modalità di visualizzazione per colori delle linee, in base alle proprietà dei *layer* impostati nel *software* CAD di riferimento, l’unità di misura in metri, concorde con quella del *file di progetto* in ambiente *Revit*, e il tipo di posizionamento, avvenuto manualmente per rapportarlo correttamente alla nuvola di punti (fig. 6.14).

Nella predisposizione del *file di progetto*, al fine di implementare l’informatizzazione del modello H-BIM, sono stati creati nuovi *parametri*

---

diversi *smart-objects* inseriti nel modello, gli abachi estrapolati, i collegamenti con altri *file di progetto Revit*, etc.

<sup>188</sup> Un’altra possibilità per inserire dei CAD nel *file di progetto* è mediante importazione; le impostazioni dei settaggi sono analoghe al collegamento, ma a modifiche del disegno vettoriale non corrispondono aggiornamenti in ambiente *Revit*.

di progetto<sup>189</sup> – *parametri testuali*, *parametri URL* e *parametri SI/NO* –. Tale scelta, legata al principio di trasparenza ed eseguita nell'ottica di eventuali aggiornamenti futuri, ha consentito di legare informazioni puntuali alle diverse istanze inserite nel progetto, secondo relazioni del tipo *parametro-oggetto*, di caratterizzare ulteriormente le abacature tematiche (fig. 6.17) – con dati del tipo rilevato/non rilevato, fonte dato testuale/immagine fotografica/rilievo *reality-based*, descrizione, tipologia di modellazione (*famiglia di sistema*, *famiglia caricabile*, *famiglia locale*) – e di associare *link* esterni di *cloud web* per la visualizzazione della documentazione reperita e di quella prodotta nelle preliminari fasi di studio e analisi

Infine, per il dato metrico rilevato/non rilevato impostato con il *parametro SI/NO*, sono state definite le modalità attraverso cui leggere l'informazione anche graficamente nelle diverse viste di pianta e sezione (fig. 6.15). Lo strumento *filtri*, infatti, permette di modificare la grafica e la visibilità degli elementi attraverso la definizione delle regole di visualizzazione. In pratica, al *parametro SI/NO* è stato fatto corrispondere un *filtro* di visibilità che consente, all'occorrenza, di accendere/spegnere le *istanze* in funzione del parametro associato e della regola grafica impostata.

## 6.2.2 Modellizzazione degli *smart-objects*: le componenti d'insieme

La modellazione dell'Hospital Simón Ruiz ha preso avvio con la disposizione planimetrica degli elementi murari e dei solai di piano, utilizzando come riferimento l'elaborazione CAD collegata al *file di progetto*, ma costantemente verificata con la nuvola di punti per garantire l'aderenza del modello H-BIM al rilievo *reality-based*. I disegni vettoriali, infatti, pur essendo redatti sulla base delle nuvole di punti, sono rappresentativi dei pochi ortofotopiani estrapolati in punti ritenuti particolarmente

<sup>189</sup> Analogamente ai parametri associati di *default* o implementati nelle *famiglie*, i *parametri di progetto* consentono di gestire le informazioni associate ai diversi oggetti costituenti il modello, ma, diversamente dai *parametri di famiglia*, sono legati allo specifico *ambiente di progetto* – non possono, in pratica, essere visualizzati in altri *file* di modello – e possono essere attribuiti a più categorie contemporaneamente.

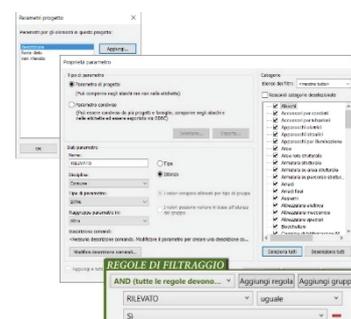


Fig. 6.15 – Impostazione dei *parametri di progetto* con l'individuazione delle categorie di componenti a cui associarli e la definizione delle regole di filtraggio per gestirne la visibilità nelle viste dello spazio modello. Esempificazione sul *parametro di progetto RILEVATO*.

Elaborazione M. Pulcrano.

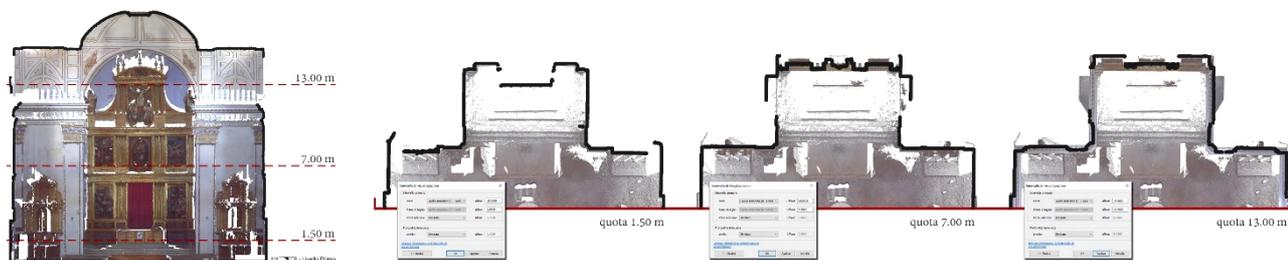


Fig. 6.16 – Impostazione dell'intervallo di visualizzazione nella vista planimetrica associata al livello 0 – *Livello Primo* per la corretta lettura degli elementi murari nella zona absidale della Chiesa annessa al complesso.

Elaborazione M. Pulcrano.

significativi, risultando carenti nell'informazione laddove il piano di taglio non ha intercettato il modello puntiforme.

A tal proposito si è rivelata interessante la gestione dell'intervallo di visualizzazione planimetrica presente in *Revit* che, a partire dal piano di taglio della sezione orizzontale, consente di definire dinamicamente cosa vedere nelle proiezioni inferiori (*parte inferiore e profondità della vista*) e superiori (*parte superiore*). Analogamente, nelle viste di sezione e prospetto, è dato definire il range di visualizzazione modificando – sia graficamente che numericamente – la regione di ritaglio, impostando larghezza e profondità della vista idonee alle esigenze di modellazione e rappresentazione. Strumenti utili, quindi, per superare le limitazioni imposte da visualizzazioni statiche e da eventuali occlusioni presenti nella nuvola di punti<sup>190</sup>, o per cogliere le irregolarità che caratterizzano il manufatto (fig. 6.16).

Muri e solai (*pavimenti* nella logica *Revit*) sono stati posizionati ricorrendo alle famiglie di sistema, definendone i parametri specifici attraverso la duplicazione del tipo e la relativa stratigrafia. Per gli elementi che invece

<sup>190</sup> Nella Chiesa annessa al complesso, ad esempio, la posizione dell'altare maggiore impedisce la lettura dell'andamento del muro di fondo poiché la struttura lignea che lo caratterizza occupa l'intera parete; per cui, una vista di pianta ad una tradizionale quota di calpestio (1.20/1.50 m) non consente di restituire l'informazione. Analogamente accade per le diverse murature interessate dagli altari minori e da arredi fissi. Modificando l'intervallo di visualizzazione associato alla vista di pianta considerata, è stato possibile completare la disposizione planimetrica degli elementi murari.

non possono essere esplicitati nel dettaglio, poiché le informazioni reperite non lo consentono, si è scelto di rappresentare la caratterizzazione superficiale – informazione recuperata dalla nuvola di punti – ipotizzandone spessori plausibili e componendo la restante parte del muro come strato generico, al fine di giungere alla descrizione geometrica completa dell'elemento. Per le dimensioni dei diversi tipi di muro e solaio riscontrati è stato scelto, già in fase di abacatura, di gestire le variazioni di pochi centimetri discretizzando gli elementi da caratterizzare attraverso l'associazione di più tipologie purché tale variazione interessi solo lo spessore e non la composizione materica dell'elemento. Ciò è dipeso dalla volontà di non arrivare alla costruzione di un modello *as built* in scala 1:1 – dispendioso in termini di tempo e complessità per la modellazione di alcuni elementi (volte, decorazioni, capitelli, etc.) – poiché non ritenuto necessario al perseguimento degli obiettivi del lavoro di tesi, che non richiede, appunto, l'aderenza millimetrica, bensì la rispondenza visiva del modello H-BIM con il manufatto reale.

Infine, ogni *smart-objects* è stato posizionato riferendo ai livelli inseriti i *vincoli di base* e della *parte superiore* per le murature (così da definirne l'altezza complessiva), mentre il livello di posizionamento per i solai di piano e dei

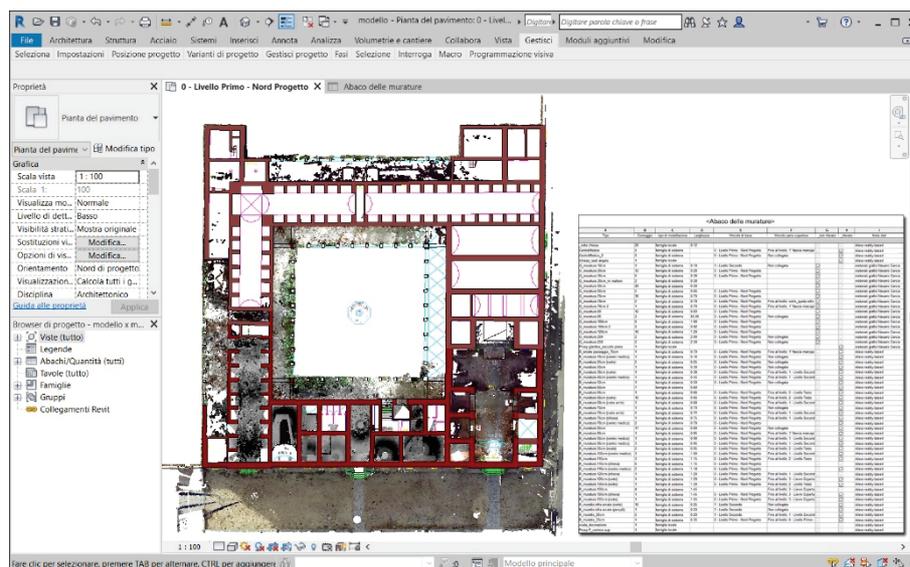


Fig. 6.17 – Modellizzazione delle strutture murarie dell'Hospital Simón Ruiz in relazione ai disegni CAD e alla nuvola di punti *reality-based*. Vista planimetrica del livello 0 – Livello Primo – Nord di Progetto in visualizzazione *nascosta* con livello di dettaglio basso. In rosso sono indicate le porzioni desunte dal rilievo, in bordeaux quelle relative alla ricerca documentale e bibliografica.

Elaborazione M. Pulcrano.

tetti di copertura, con *offset* – positivi e negativi – per gestire correttamente le variazioni puntuali nelle quote di riferimento.

### 6.2.3 Modellizzazione degli *smart-objects*: le componenti di dettaglio

Terminata la modellazione delle componenti d'insieme, la fase applicativa della ricerca è proseguita con la definizione delle componenti di dettaglio come porte, finestre, aperture arcate, profili modanati, cornici marcapiano, etc., per le quali si è reso necessario modellare *ex-novo* i diversi *smart-objects* poiché nella libreria associata di *default* al software *Revit* e nelle librerie *open* presenti in rete, non sono stati riscontrati oggetti digitali adeguati alla caratterizzazione del modello H-BIM dell'Hospital Simón Ruiz.

Ogni elemento reale è stato ulteriormente scomposto, individuando le singole parti che lo costituiscono, e successivamente ricomposto attraverso l'imposizione di vincoli geometrici e relazionali (aderenza, corrispondenza, equivalenza e congruenza). Il ricorso alle *famiglie nidificate* e all'associazione dei parametri ha dato luogo ad un comportamento unitario nella gestione delle variazioni nel componente risultante. La scelta di perseguire l'approccio delle *famiglie nidificate*, se da un lato ha imposto riflessioni sulle modalità di segmentazione dell'elemento reale – con la costruzione pratica di un numero maggiore di oggetti digitali e con valutazioni sull'assegnazione dei parametri –, dall'altro ha semplificato la modellazione delle singole parti, oltre che dell'insieme, e reso possibile la replicabilità in *smart-objects* simili ma differenti per composizione.

Per i serramenti interni ed esterni<sup>191</sup>, ad esempio, gli elementi da *nidificare* sono stati costruiti nei *template metrici generici*, in seguito caratterizzati come porte e finestre rendendo omogeneo il componente nella logica funzionale. *Template* specifici (*finestra metrica* e *porta metrica*) – generalmente

---

<sup>191</sup> Sia porte che finestre sono state suddivise in piattabanda, telaio fisso, telaio mobile con vetro, davanzale/soglia e ringhiera/griglia di protezione.

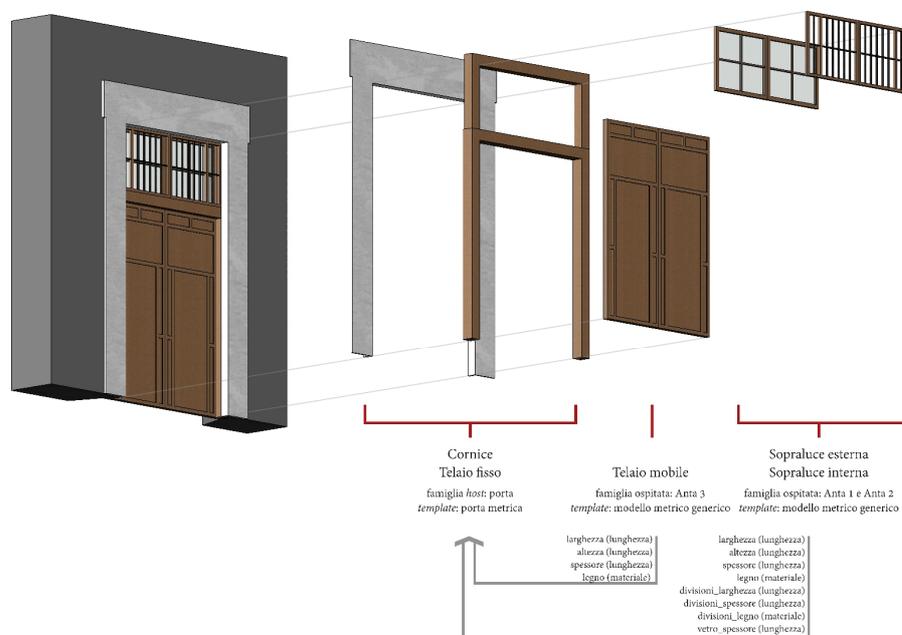


Fig. 6.18 – Modellazione della *famiglia nidificata* del portale di accesso sinistro P1 (fronte principale in *Avenida Portugal*): scomposizione in elementi, ricomposizione nella famiglia *host* e individuazione dei parametri da relazionare mediante *associazione parametro famiglia*.

Elaborazione M. Pulcrano.

coincidenti con il telaio fisso del serramento – sono stati invece utilizzati come *famiglia host* al fine di categorizzare correttamente lo *smart-object* finale (fig. 6.18). Infatti, nonostante la variazione effettuata per i *template metrici generici*, il comportamento reale dell’oggetto digitale non risponde appieno alle logiche relazionali definite aprioristicamente per gli *smart-objects*. Viene, in pratica, a mancare la possibilità di bucare automaticamente un componente appartenente alla *famiglia* muro; per cui risulta necessario operare con *famiglie host* dedicate.

Differentemente, per le cornici che decorano l’elemento è stata seguita una procedura di modellazione che prevede dapprima la definizione del profilo nello specifico *template profilo metrico*<sup>192</sup> e, in seguito, la nidificazione nella *famiglia host*. Riprendendo la costruzione geometrica delle diverse

<sup>192</sup> È un *template* diverso da quelli precedenti poiché non prevede un *editor* di creazione/modifica di oggetti tridimensionali, bensì solo strumenti per il disegno sul piano di forme chiuse.

modanature che si susseguono e relazionando le varie parti con piani di riferimento, con l'imposizione dei vincoli e con la parametrizzazione dimensionale è stato costruito l'andamento del profilo. La forma realizzata è stata utilizzata nella *famiglia host* per generare un solido attraverso lo strumento *estrusione su percorso*, che prevede, appunto, la definizione del percorso e la sezione – ovvero il profilo – che lo deve percorrere.

Analogamente, per le ampie aperture che definiscono i fronti interni del complesso, i diversi elementi sono stati categorizzati in *famiglie di porte* al fine di rendere la riproposizione digitale del componente reale coerente con la funzione di filtro e/o raccordo tra parti esterne e interne.

Per ogni parte del componente costituente la *famiglia caricabile*, quindi, è stato scelto il *template* e il grado di *nidificazione* (fig. 6.19) più adeguato<sup>193</sup> in riferimento al tipo di modellazione ipotizzata, agli strumenti previsti<sup>194</sup> e ai risultati attesi. Logiche analoghe hanno guidato la costruzione degli altri elementi dell'Hospital Simón Ruiz.

---

<sup>193</sup> Rappresenta il numero di *nidificazioni* necessario per costruire l'oggetto digitale; in pratica, a partire da una *famiglia ospitata* inserita in una *famiglia host*, a sua volta *ospitata* in un'altra *famiglia host*, e così via, si procede fino ad ottenere il componente finale desiderato. Ad esempio, nel replicare la ringhiera delle porte-finestre e le griglie di protezione delle finestre si è scelto di procedere con *nidificazioni* di secondo e terzo grado al fine di agevolare e rendere speditiva la modellazione con strumenti di riproduzione in serie. Per cui, l'elemento ringhiera, è stato modellato a partire dalla singola barra che compone la ringhiera stessa, *nidificata* in una *famiglia* per la riproduzione in serie, ulteriormente *nidificata* nella *famiglia host* finale. Analogamente, le griglie di protezione hanno visto la creazione della singola barra e la riproduzione in serie, con la modellazione di *famiglie* differenti per le barre orizzontali e verticali, prima di essere *nidificate* nella *famiglia* griglia di protezione, ospitata a sua volta nella *famiglia finestra* complessiva.

<sup>194</sup> Variano in funzione del *template* utilizzato. In generale è presente il *tool* per la modellazione tradizionale di solidi con *estrusione*, *estrusione su percorso*, *unione*, *unione su percorso* e *rivoluzione*, ma in alcuni *template*, come i *modelli generici metrici adattivi* e le *masse concettuali*, questi strumenti sono sostituiti da elementi bidimensionali di riferimento (punti, linee, *spline*, etc.) che consentono di procedere con una modellazione diversa basata sull'identificazione delle superfici di contorno del solido da creare. In altri ancora – *profili metrici*, *elementi di dettaglio*, *annotazioni*, etc. –, invece, non è proprio prevista la possibilità di realizzare forme tridimensionali, poiché sono considerati *template* di supporto alla modellazione o alla definizione della grafica dell'oggetto digitale.

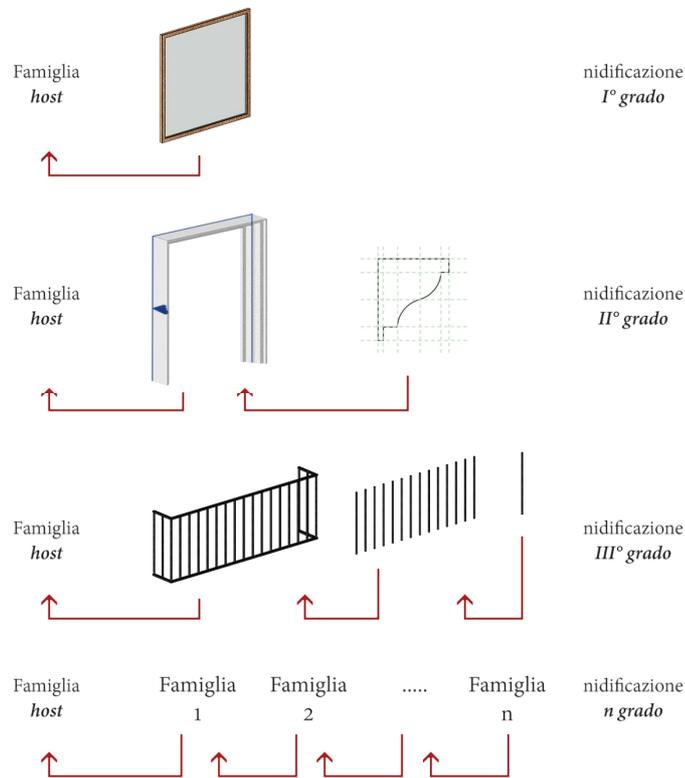


Fig. 6.19 – Esempificazione del grado di *nidificazione* realizzabile nel *software Revit* e adoperato nella costruzione delle *famiglie caricabili nidificate*.

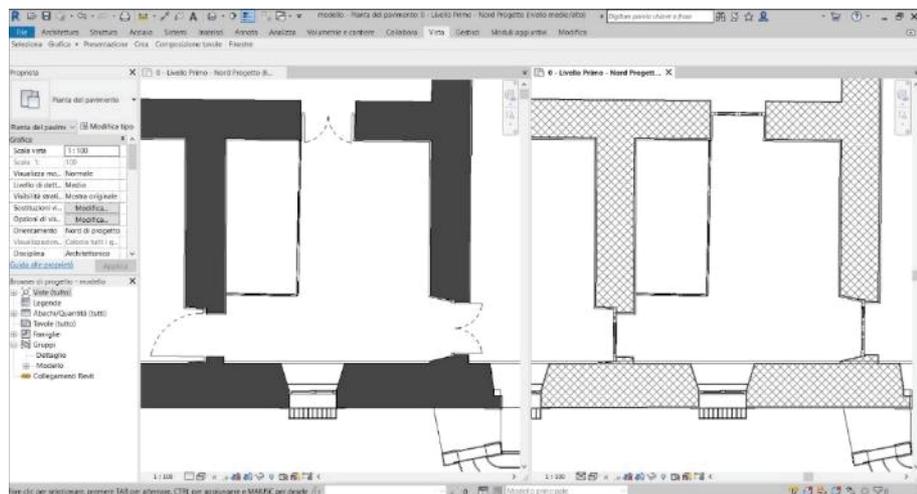
Elaborazione M. Pulcrano.

Per le paraste della Chiesa annessa al complesso, ad esempio, benché non sia presente uno *smart-object* dedicato, si è impostata la costruzione della forma sul riferimento del muro – *template modello generico metrico basato su muro* –. In pratica, sono state sfruttate le impostazioni alla base delle *famiglie* di porte e finestre, per le quali è necessario disporre di un elemento murario nell’ambiente di progetto per poter collocare il componente realizzato. Questa particolare soluzione si è dimostrata efficace per rispondere all’esigenza di replicare, in analogia con ciò che avviene nella realtà, il legame che sussiste tra i due elementi.

Alcune scelte operate nella *modellizzazione* delle *famiglie caricabili* sono state effettuate in previsione della gestione del componente nell'*ambiente di progetto*. Nello specifico, si tratta di soluzioni per la visualizzazione grafica, per la parametrizzazione e per l'imposizione dei vincoli geometrici. Per quanto concerne il primo aspetto, va precisato che le *famiglie di sistema*, sono conformate per adeguarsi dinamicamente alle variazioni delle impostazioni grafiche. In tal modo, componenti come muri e solai al *livello di dettaglio basso* fanno corrispondere un oggetto semplificato in cui non è dato visualizzare, nelle viste di pianta e sezione, la composizione stratigrafica dell'elemento – informazione recuperabile dalla scheda informativa del *tipo* –. Mentre i retini, le annotazioni, i modelli di linea, etc., riportano le proprie caratteristiche (infittimento e dimensioni) in funzione della scala di rappresentazione impostata. Tali proprietà dipendono, come è ben noto, dalla possibilità di estrapolare, automaticamente dal medesimo modello BIM, rappresentazioni differenti. In ragione di ciò, al fine di rendere omogenei gli *output* di pianta e sezione, si è scelto di conformare gli *smart-objects* affinché fossero rispondenti a tale logica di visualizzazione dinamica con dettagli diversificati a livelli *bassi* e *medio/alti* di visualizzazione. Si è reso necessario duplicare parte degli elementi costituenti la *famiglia*, talvolta rimodellandoli con gradi di

Fig. 6.20 – Modello H-BIM: vista di pianta in stile *wireframe* con *livello di dettaglio basso* (finestra sinistra) e *medio* (finestra destra).

Elaborazione M. Pulcrano.



semplificazione differenti ma imponendone comunque la riconoscibilità delle caratteristiche morfo-geometriche che lo connotano per renderlo, egualmente, coerente e rispondente al reale dal punto di vista della mimesi visiva. Ognuno di essi, quindi, è stato caratterizzato con opzioni grafiche specifiche – ovvero si è scelto cosa e come mostrare –, dipendenti sia dalla tipologia di vista impostata che dal *livello di dettaglio*. In particolare, per le viste di pianta caratterizzate dal *livello di dettaglio basso* l'inserimento di elementi di dettaglio – anch'essi facenti parte del sistema delle *famiglie caricabili* e nidificate nella *famiglia host* –, come campiture e linee, sono stati utili nel definire le modalità di rappresentazione nell'*ambiente di progetto* (fig. 6.20).

Le impostazioni di parametrizzazione, invece, sono state settate in seguito a riflessioni sulla tipologia di informazione (dimensioni, materiali, descrizione, fonte del dato, riferimenti esterni, etc.) da associare agli *smart-objects*, sulle modalità di costruzione degli stessi e del modello complessivo. Infatti, essendo la modellazione legata a logiche di serialità e di rapporti geometrico-proporzionali si è ritenuto opportuno gestire le variazioni del componente con parametri di *tipo* piuttosto che d'*istanza* (Cfr. par. 2.2.2), duplicandolo laddove necessario. Le poche eccezioni riscontrate – le arcate di raccordo tra i bracci della corte e gli elementi di supporto per la costruzione dei sistemi voltati (di cui si dirà in seguito) – riflettono il carattere di unicità dell'elemento che rappresentano, che ha imposto di settare il parametro come *istanza* al fine di agevolare la modellazione in *ambiente di progetto* e il raggruppamento nelle abacature tematiche.

Infine, nella costruzione delle *famiglie caricabili* l'impostazione dei vincoli geometrici (allineamento e concatenamento) è stata pensata affinché i diversi solidi che le compongono fossero rapportati correttamente al sistema di assi di riferimento impostato di *default* nei *template* utilizzati. In particolare, per le *famiglie di porta e finestra*, la scelta di mantenere centrato il riferimento è dettata dalla volontà di replicare il ritmo pieno/vuoto, caratterizzante i fronti del complesso, attraverso strumenti di supporto alla modellazione – quali griglie e piani di riferimento –.

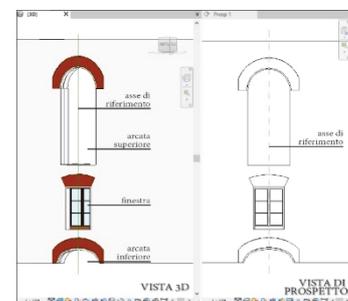


Fig. 6.21 – Composizione campata tipo del fronte Sud-Ovest che guarda al giardino interno del complesso.

Elaborazione M. Pulcrano.

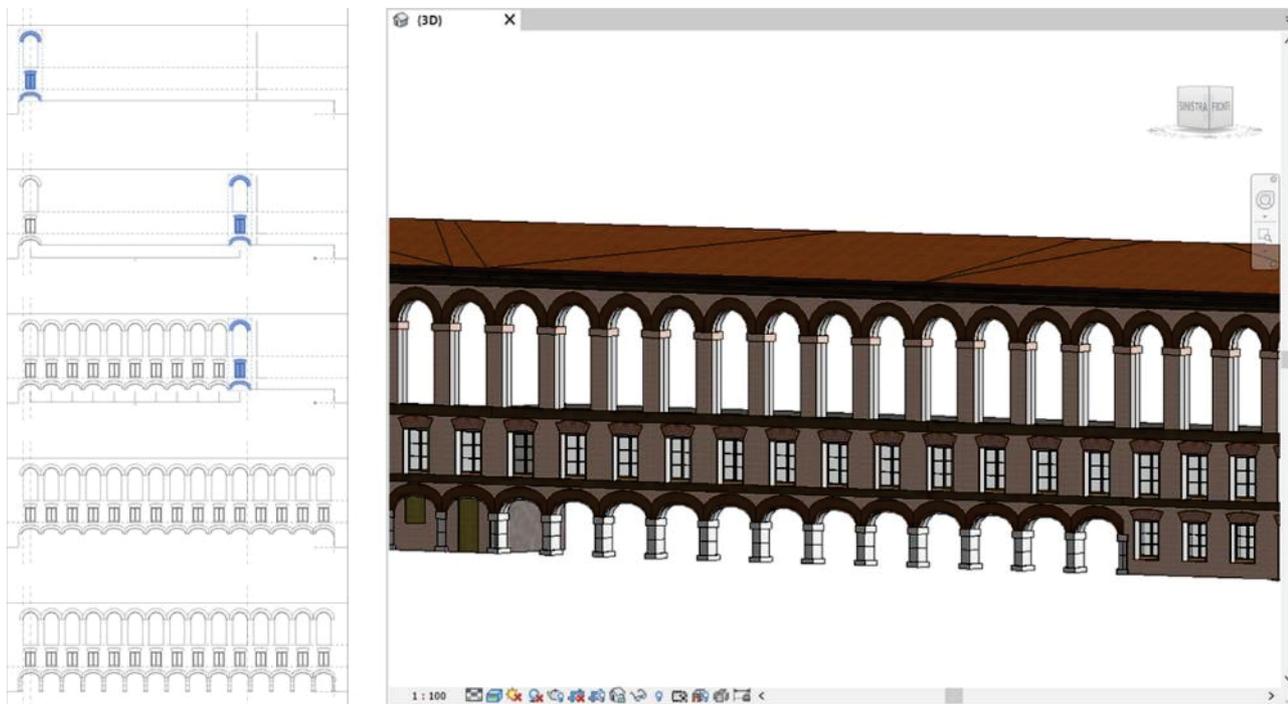


Fig. 6.22 – Costruzione del fronte Sud-Ovest dell’Hospital Simón Ruiz: sequenza delle operazioni per la riproduzione in serie della campata tipo e vista tridimensionale del risultato finale nello spazio modello del software Revit.

Elaborazione M. Pulcrano.

Ad esempio, per i fronti prospicienti il giardino dell’Hospital Simón Ruiz, modellizzati gli *smart-objects* delle arcate inferiori, delle finestre e delle arcate superiori, nell’ambiente di progetto di Revit al riferimento digitale è stato corrisposto l’asse verticale del componente. Mantenendo coassiali le diverse aperture e raggruppate per conformare un unico elemento – rappresentativo della campata tipo (fig. 6.21) –, si è potuto gestirne contestualmente la posizione, rendendo, in tal modo, speditive le operazioni di modellazione. Infatti, con gli strumenti e le opzioni di riproduzione in serie – definizione della lunghezza della serie e del numero di elementi – si è potuto costruire il fronte in tempi brevi, mantenendo costante la distanza tra i diversi elementi e replicando, conseguentemente, gli schemi geometrici desunti dall’analisi della nuvola di punti (fig. 6.22). Analogamente si è proceduto anche per gli altri fronti.

Gli schemi emersi dagli studi compositivo-proporzionali, dunque, sono divenuti l'ossatura del modello H-BIM, relazionando in tal modo l'Hospital Simón Ruiz, nella sua consistenza reale espressa dalla nuvola di punti, con le regole costitutive che lo connotano.

#### **6.2.4 Modellizzazione degli elementi complessi: le superfici voltate**

Nella costruzione del modello H-BIM dell'Hospital Simón Ruiz, le semplificazioni operative introdotte con la discretizzazione geometrica desunta dagli studi preliminari e la regolarità che caratterizza le componenti del sistema, hanno permesso di affrontare le operazioni pratiche di modellazione senza particolari difficoltà, sebbene per alcuni elementi sia stato necessario ricorrere ad *escamotage*, grafici e logico-funzionali, al fine di ottenere i risultati attesi. Sono d'esempio i sistemi voltati posti a copertura di ambienti interni ed esterni del complesso che presentano differenze nella tipologia di volta realizzata e nella presenza o meno di elementi decorativi.

In particolare, sono state riscontrate volte di tipo a botte, a botte con testa a padiglione, a botte lunettata, a crociera, a schifo e, infine, una cupola su pennacchi. La prima, la volta a botte, è collocata nei bracci funzionali alla deambulazione dei malati posti al piano terra e al primo piano<sup>195</sup>, negli ambienti del centro medico<sup>196</sup> e in alcune aree della Chiesa. La volta in esame rappresenta la classica volta a botte con arco policentrico, la cui regola formale varia in funzione delle dimensioni dell'ambiente<sup>197</sup> su cui insiste, diventando talvolta assimilabile ad una volta con arco a tutto sesto.

---

<sup>195</sup> La cui intersezione, nell'angolo Ovest del complesso, genera chiaramente una volta a crociera.

<sup>196</sup> Esula un unico ambiente che risulta coperto da volta a botte con testa a padiglione.

<sup>197</sup> Per gli ambienti del centro medico, ad esempio, sono state mantenute pressoché costanti la quota di imposta e l'altezza in chiave delle diverse volte, comportando, di fatto, la variazione dello sviluppo dell'arco policentrico.



VOLTA A SCHIFO  
copertura scala



VOLTA A BOTTE CON  
ARCO POLICENTRICO  
copertura padiglioni deambulazione malati



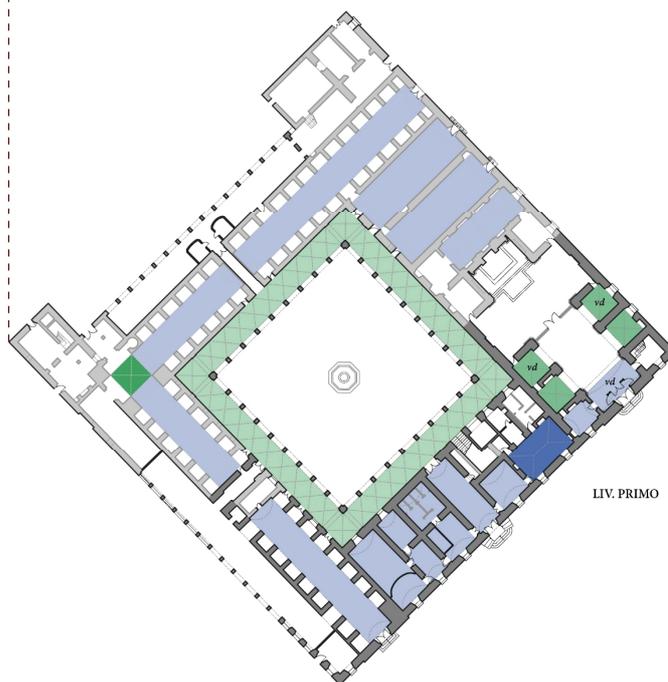
VOLTA A CROCIERA  
copertura porticati corte interna



VOLTA A BOTTE LUNETTATA e  
CUPOLA SU PENNACCHI  
copertura navata e transetto Chiesa

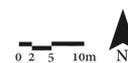


LIV. SECONDO



LIV. PRIMO

- rilevato
- non rilevato
- volta a botte con arco policentrico
- volta a botte lunettata
- volta a botte con testa a padiglione
- volta a crociera con unghie steroidiche e cilindriche
- volta a crociera a sviluppo inclinato
- volta a crociera
- volta a schifo
- cupola su pennacchi
- volta decorata *vd*



La volta a botte lunettata, invece, è presente nella Chiesa e, nel dettaglio, è posta a copertura dell'aula, del transetto e dell'altare; il suo sviluppo è basato su un arco a tutto sesto ed è intersecata da lunette sferoidiche caratterizzate da un arco di circonferenza sul lato frontale.

Le volte a crociera sono presenti prevalentemente nei bracci porticati della corte interna e presentano unghie a due a due corrispondenti, ovvero con andamento cilindrico e sferoidico; quelle che, invece, insistono nelle cappelle laterali della Chiesa sono classificabili come cilindriche ma con sviluppo inclinato. Infine, unici esempi di volta a schifo e cupola su pennacchi si hanno, rispettivamente, per la copertura della scala di raccordo ai piani e nell'intersezione tra la navata e il transetto della Chiesa. Quest'ultima, in particolare, è caratterizzata da un arco policentrico e presenta uno specchio centrale.

Per le aree documentate dai rilievi *reality-based* è stato possibile definire anche l'eventuale presenza di sistemi decorativi; la lettura della nuvola di punti mostra, infatti, superfici prevalentemente intonacate ad eccezione degli elementi posti a copertura della scala, degli ambienti principali della Chiesa e delle cappelle laterali in corrispondenza del transetto. Si tratta di schemi semplici, basati su decorazioni con elementi geometrici (quadrati, rombi, cerchi, triangoli, etc.) che riprendono lo sviluppo della superficie voltata (fig. 6.9).

Appurate queste prime informazioni – tipologia di volta/cupola e sistema decorativo – (fig. 6.23), nodo cruciale nella schematizzazione preliminare degli elementi voltati è stata la comprensione della tecnica costruttiva, poiché, come spesso accade, è un'informazione non sempre rinvenibile, soprattutto se non esistono documentazioni pregresse, documentazioni di cantiere o analisi invasive per la conoscenza della composizione stratigrafica. Ma, nel caso specifico dell'Hospital Simón Ruiz, lo stato di conservazione del complesso se da un lato ne pregiudica la fruizione, dall'altro ha permesso di analizzare in dettaglio i sistemi voltati che lo caratterizzano, laddove, appunto, si sono verificati dei crolli. Ad esempio, per alcune le volte a crociera della corte interna, è tutt'ora possibile leggere

Fig. 6.23 (pagina precedente) – Mappatura e classificazione delle diverse tipologie di volte individuate nell'Hospital Simón Ruiz.

Elaborazione e foto M. Pulcrano.

Fig. 6.24 – Stato di conservazione di una porzione della corte interna del complesso. Dal crollo è possibile evincere la tecnica costruttiva della superficie voltata in foto (volta a crociera a *foglio unico*).

Foto M. Pulcrano.



## VOLTE E CUPOLE NEI SISTEMI BIM

*Come è ben noto, la modellizzazione di volte e cupole rappresenta una delle maggiori criticità nell'H-BIM. Da un lato, infatti, nonostante l'attuale sviluppo software – con tools e plugin dedicati alla costruzione di forme complesse – e l'interoperabilità con piattaforme esterne di modellazione, permettano di costruire solidi fortemente aderenti alla realtà, le procedure operative da eseguire non sono scontate e non sempre sono semplici da replicare o gestire. Dall'altro, il mancato inserimento dell'elemento nei protocolli IFC e l'assenza della specifica categoria comporta la necessità di adattare la logica funzionale di smart-objects esistenti. In pratica, si perviene alla costruzione di un oggetto non propriamente intelligente, soprattutto nelle relazioni che vengono a mancare – o non sono correttamente esplicitate – con gli altri elementi del sistema. Tali tematiche sono tutt'ora al centro del dibattito scientifico; le ricerche condotte in merito (Adami et al., 2017; Brumana et al., 2013; Oreni, 2013; Quattrini et al., 2016; Scandurra 2020) mostrano le evidenti difficoltà che pone la modellizzazione di questi elementi e propongono diverse soluzioni al fine di emulare il componente nelle sue caratteristiche formali e funzionali e, al contempo, individuare processi operativi condivisibili e replicabili. (continua)*

un vuoto – corrispondente al rinfiacco non realizzato – tra la superficie curva della volta e la superficie piana del solaio sovrastante. La tecnica costruttiva, con mattoni disposti di piatto e non di taglio, è rappresentativa delle cosiddette volte a *foglio unico* poiché è chiaramente leggibile un solo filare di mattoni e la malta che li lega. Infine, uno strato di intonaco sulla superficie di intradosso della volta ne completa la composizione stratigrafica (fig. 6.24).

Rapportando tali evidenze con i disegni redatti da Luis Navarro García (Navarro García, 1998), è stato possibile riscontrare segni grafici differenti per le varie strutture voltate. Ciò ha lasciato presupporre una variazione nella tecnica costruttiva, ma in mancanza di dati certi al riguardo, si è scelto di differenziare gli elementi voltati sulla base alle caratteristiche tipologiche e tecnologiche, caratterizzando come generici quelli per i quali non vi è certezza del dato, al fine di non incorrere in una rappresentazione e documentazione dello stato di fatto errata. Tale differenziazione è stata mantenuta anche nelle fasi di modellazione e informatizzazione dei relativi *smart-objects*, operando con procedure diversificate in relazione alla specifica superficie voltata presa in esame.

Per la definizione geometrica delle volte, tra le diverse soluzioni applicative individuate<sup>198</sup>, si è scelto di ricorrere ai *modelli generici metrici adattivi* conformando, nell'*editor* delle *famiglie* di Revit, un oggetto tridimensionale in cui i parametri dimensionali e i vincoli relazionali tra le diverse parti sono stati stabiliti in funzione della specifica tipologia costruita. Il *template* utilizzato, oltre a rendere adattabile e, quindi, replicabile l'elemento, consente di gestire la costruzione del solido attraverso la definizione delle curve generatrici della superficie voltata.

---

<sup>198</sup> È chiaro che la *modellizzazione* dei sistemi voltati del complesso dell'Hospital Simón Ruiz si muove anche sulla base delle riflessioni condotte a valle dello studio delle ricerche di settore sul tema.

Per la volta a botte, ad esempio, le fasi operative hanno riguardato (i) la disposizione dei *punti adattivi*, (ii) la definizione delle curve di riferimento e (iii) la costruzione del solido. Nello specifico, quattro *punti di posizionamento* sono stati collocati nello spazio di modello per individuare il piano ideale di imposta della volta e sono rappresentativi dei quattro spigoli<sup>199</sup> dell'ambiente su cui essa insiste. Il loro raccordo con *spline* di riferimento ha permesso l'individuazione dei *piani di riferimento* verticale. Nella volta a botte, quelli di testata hanno ospitato la costruzione dell'arco policentrico che la genera mediante l'apposizione di diversi *punti di riferimento*<sup>200</sup>, utili alla definizione della curva e relazionati tra loro mediante parametri dimensionali – analoghi ma differenziati, al fine di poter gestire separatamente lo sviluppo delle due curvature –. I riferimenti così costruiti sono stati funzionali alla generazione del solido rappresentativo del componente voltato.

Il ridimensionamento delle curve e, di conseguenza, del solido stesso è avvenuto in *ambiente di progetto* sul riferimento nuvola di punti, ottenendo come risultato una forma maggiormente aderente e rispondente alla realtà (fig. 6.25). La scelta di operare con *famiglie caricabili adattive* e parametrizzate, ha, di fatto, snellito le procedure di modellazione, velocizzando – nel *file di progetto* – la reiterazione delle operazioni relative al posizionamento e al ridimensionamento del componente nei diversi ambienti interessati dal tipo di volta così costruito.

Analogamente, per le altre superfici voltate si è replicato il medesimo processo logico specificando le operazioni pratiche in funzione della tipologia da costruire e della genesi geometrica che la caratterizza. Per cui,

<sup>199</sup> Come illustrato dalle schematizzazioni grafiche di pianta, gli ambienti dell'Hospital Simón Ruiz presentano tutti una conformazione quadrata/rettangolare, per cui nella definizione dei punti di posizionamento, quattro sono sufficienti per adattare il solido alle diverse conformazioni. Ciò non toglie che, in situazioni differenti e laddove se ne palesi la necessità, tali punti possono essere implementati per rispondere alle esigenze di modellazione.

<sup>200</sup> Quello in chiave consente di impostare l'altezza complessiva della volta, mentre quelli intermedi sono utili per definire correttamente l'andamento dell'arco policentrico.

(segue)

*Alle riflessioni teoriche si accompagnano, quindi, quelle pratico-operative legate all'analisi delle potenzialità e criticità degli strumenti di modellazione dei software di BIM authoring. Viene valutata, tra le soluzioni offerte, quella ritenuta più idonea a rispondere agli obiettivi prefissati (Bolognesi, 2018) nell'ottica dell'open BIM e delle implicazioni derivanti da procedure di esportazione/importazione nel formato IFC (Lo Turco e Tonin, 2018).*

*In estrema sintesi, ciò che emerge è che dal punto di vista geometrico la replicabilità del componente voltato nei software BIM è agevolata dall'uso di elementi adattivi, che, proprio per le caratteristiche che possiedono, consentono di superare (in parte) la rigidità degli strumenti offerti adeguando l'oggetto digitale alle irregolarità delle forme presenti nel patrimonio costruito. Con operazioni manuali, vengono impostati i punti di posizionamento e manipolazione per consentire alla forma di adattarsi alle diverse conformazioni, mentre la variabilità della stessa e delle informazioni associate è garantita dalle medesime procedure di parametrizzazione di smart-objects tradizionali.*

*A queste procedure manuali si affiancano soluzioni semi-automatiche – con l'utilizzo di plugin dedicati (Garagnani, 2013) che (continua)*

(segue)

*desumono informazioni morfologiche direttamente dalla nuvola di punti – e modellazioni gestite attraverso la programmazione visuale (Sampietro et al., 2018).*

*È chiaro che le diverse ricerche mostrano risultati differenti sia in termini di aderenza tra l'elemento reale e la sua riproposizione digitale, che di replicabilità e adattabilità dello smart-object. Ma è altrettanto evidente che il ricorso ad un processo di modellazione, piuttosto che un altro, va valutato in funzione di molteplici fattori, come gli obiettivi, le caratteristiche del componente digitale, gli usi del modello e, non ultimi, i tempi e l'esperienza dell'operatore. Inoltre, vanno considerate le scelte di categorizzazione dell'oggetto digitale che spesso impongono compromessi al fine di definirne oltre alle caratteristiche topologiche e semantiche che deve possedere, anche quelle logico-funzionali e le relazioni che deve instaurare con gli altri elementi del modello. Talvolta, infatti, la logica insita in smart-objects analoghi per funzione, come muri, solai e coperture (Oreni et al., 2014), viene ritenuta adeguata ai fini della modellazione; altre volte si associano a modelli generici, ovvero smart-objects privi di categorizzazione, parametri testuali e descrittivi per codificare e identificare univocamente l'oggetto negli abachi e nelle viste tematiche estrapolate dal modello.*

ad esempio, la volta a crociera è stata restituita mediante l'intersezione di due volte a botte, mentre nella volta a schifo ulteriori quattro *punti di posizionamento* sono stati necessari per la definizione della parte centrale piana. La volta a botte lunettata, invece, è stata costruita direttamente in *ambiente di progetto* collocando le diverse parti che la compongono e, dunque, apponendo dapprima la volta a botte in direzione longitudinale e poi le diverse lunette nella direzione trasversale.

Unica eccezione è rappresentata dalla cupola su pennacchi che insiste sulla crociera della Chiesa, la cui genesi geometrica ha imposto procedure di modellazione differenti. Per essa, infatti, non si è reso necessario operare mediante *modelli adattivi*, ma è stato possibile realizzare la forma attraverso *solidi di rivoluzione in template generici metrici*. Non diversamente dalle altre tipologie di volte costruite, però, piani di riferimento e vincoli geometrici-relazionali tra le parti hanno consentito di parametrizzarla e renderla modificabile affinché fosse aderente alla nuvola di punti in *ambiente di progetto*.

La forma ottenuta nell'*editor delle famiglie*, rappresentativa della superficie di intradosso del componente voltato, talvolta è stata caratterizzata come *vuoto*, talvolta come *solido*, al fine di poter restituire, in *ambiente di progetto*, un oggetto digitale coerente sia con le schematizzazioni preliminari, sia con la realtà che rappresenta (fig. 6.26).

Nel primo caso, la forma è stata utilizzata come volume di sottrazione per un *pavimento* che, seppur sovradimensionato<sup>201</sup> per poter ospitare completamente il vuoto, a seguito delle operazioni di *taglio* appare comunque rispondente al reale dal punto di vista visivo. Va precisato, però, che l'oggetto volta così realizzato è incoerente in alcuni dati

<sup>201</sup> L'altezza del *pavimento* sarà pari alla distanza rilevata tra la quota di imposta e la quota massima dell'intradosso, corrispondente alla chiave della volta. A ciò, va poi aggiunto lo spessore del solaio sovrastante, necessario per raggiungere la quota di calpestio utile, il quale può incluso – oppure no – nell'oggetto *pavimento* così da ottenere un componente unico.

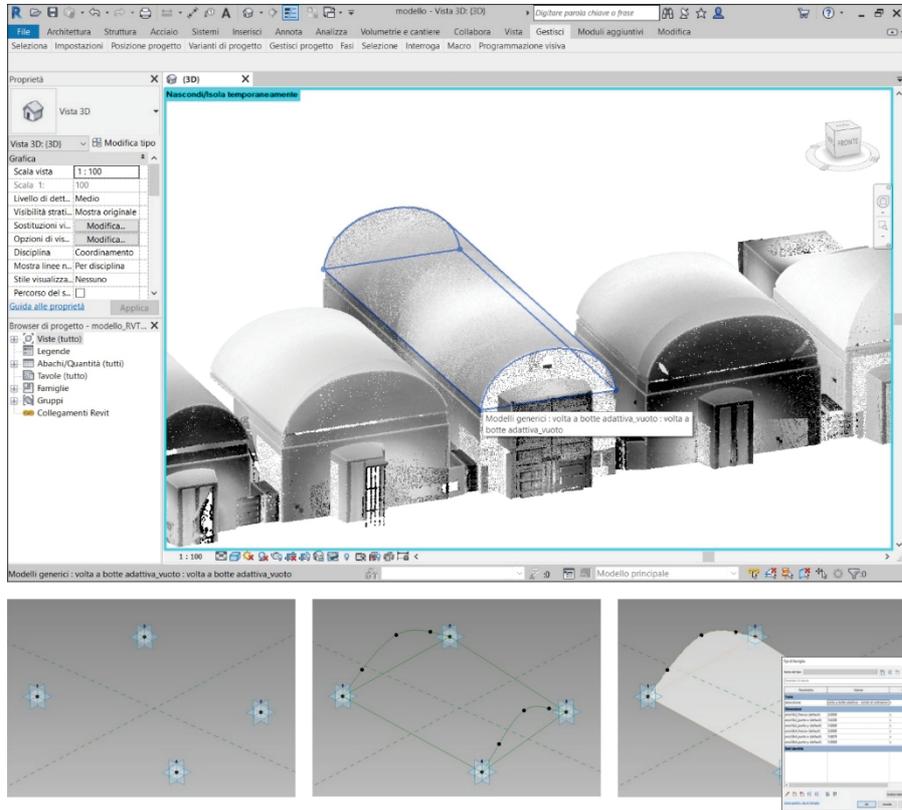


Fig. 6.25 – Costruzione del solido di sottrazione *adattivo* della volta a botte con arco policentrico: modellazione e parametrizzazione in *ambiente famiglia*; posizionamento e ridimensionamento in *ambiente di progetto* sulla nuvola di punti *reality-based*.

Elaborazione M. Pulcrano.

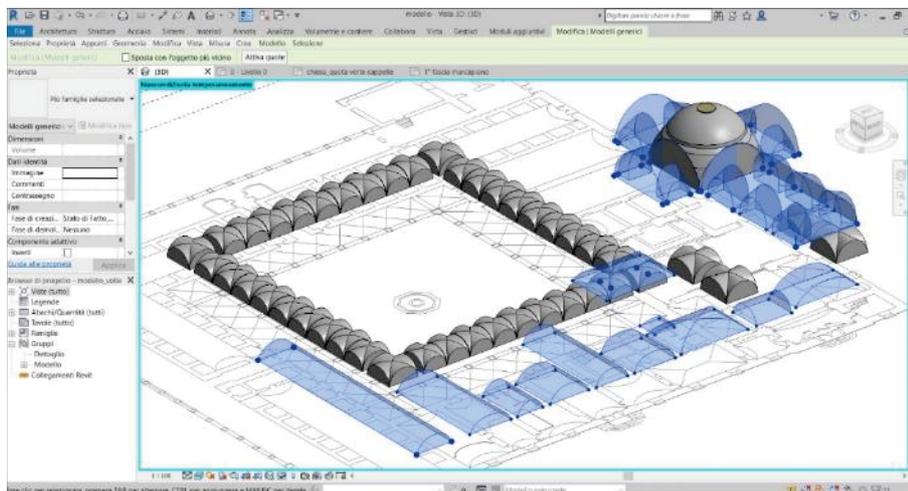
informativi<sup>202</sup> e nella restituzione grafica della stratigrafia<sup>203</sup>, per le conseguenze dipendenti dal *taglio* eseguito che, di fatto, risulta apparente e

<sup>202</sup> Ad esempio, nel conteggio automatico del volume l'informazione è desunta considerando altezza e superficie complessiva del *pavimento* senza sottrarre la quantità di *vuoto* presente, per cui, di fatto, risulterà maggiore di quello che si ha realmente. Va detto, però, che operando con *parametri globali* (differenti per funzione da quelli di *progetto*, poiché non sono associati a categorie specifiche, ma consentono di estrapolarne le proprietà) e formule matematiche è dato correggere il tipo di informazione.

<sup>203</sup> La programmazione del componente in *Revit* non consente di definire un diverso andamento per le superfici di intradosso ed estradosso del solaio. Di conseguenza, quando si verifica un *taglio* di questo tipo, la grafica della stratigrafia non riesce a seguire lo sviluppo della superficie curva, ma resta orientata orizzontalmente, comportando errori nella visualizzazione a *livelli di dettaglio medio/alti*.

Fig. 6.26 – Vista tridimensionale dello spazio modello di Revit in *ambiente di progetto* con la visualizzazione delle coperture voltate ottenute dal rilievo *reality-based*. In grigio sono individuati i *solidi* di riferimento per la creazione degli *smart-objects* con componenti *pavimento*, *tetto* o *muro da superficie*, mentre in blu sono evidenziati i solidi utilizzati come *vuoti* da sottrarre ad oggetti *pavimento*.

Elaborazione M. Pulcrano.



non effettivo. Tale soluzione è stata adoperata per quegli elementi di cui non si dispone di informazioni tecnologiche tali da poter caratterizzare nel dettaglio l'oggetto digitale.

Per le altre superfici voltate, invece, è stata applicata la seconda soluzione. Il *solido* è stato considerato come riferimento per posizionare un *pavimento*, *tetto* o *muro da superficie*, che ne riprende le informazioni morfo-metriche restituendo un componente *intelligente* in tutte le sue caratteristiche informative e relazionali<sup>204</sup>. Diversamente da quanto accade per la soluzione precedente, però, dove a variazioni dimensionali del vuoto corrisponde un aggiornamento automatico del *pavimento*, in questo caso l'oggetto volta risulta bloccato, comportando un reinserimento del componente *pavimento*, *tetto* o *muro da superficie* laddove sia necessario effettuare modifiche nei parametri geometrici.

In entrambi i casi, quindi, oltre alla gestione geometrica e alla rispondenza visiva della superficie voltata, gli espedienti adoperati hanno consentito di

<sup>204</sup> A questo primo componente, rappresentativo della sola volta *in foglio*, è stato poi corrisposto un ulteriore solaio – posto ad una certa distanza dipendente dalla quota di calpestio rilevata – al fine di definire correttamente tutto il sistema delle strutture orizzontali.

ottenere, seppur con le limitazioni che si sono palesate, uno *smart-object* volta categorizzato attraverso un componente analogo nella logica funzionale e semanticamente riconosciuto nelle piattaforme BIM.

Infine, nella restituzione degli elementi decorativi si è scelto di non operare secondo una soluzione univoca, ma di integrare modellazioni in *template di famiglie caricabili*, le quali talvolta sono costituite direttamente da porzioni di nuvola di punti, con modellazioni *in place*, per una migliore resa realistica dell'elemento, oltre che per una più agevole gestione dell'aderenza della decorazione alla superficie curva dell'oggetto volta.

### 6.3 Verifiche di aderenza del modello geometrico

Le ipotesi di semplificazione e astrazione geometrica derivanti dall'analisi grafica degli ortofotopiani dell'Hospital Simón Ruiz hanno dato luogo ad un modello geometrico coerente nella rispondenza grafico-visiva. Al fine di valutare se tale coerenza sia espressione non solo di aspetti qualitativi, ma anche quantitativi, si è scelto di verificare la difformità del modello H-BIM rispetto alla conformazione reale del manufatto. La sperimentazione applicativa, quindi, è proseguita replicando il processo operativo di confronto tridimensionale visto nei capitoli precedenti (Cfr. par. 1.2 e par. 5.2.2), utilizzando come dati di *input* la nuvola di punti e il modello informativo e valutando, con analisi automatizzate della divergenza, il grado di discostamento che quest'ultimo presenta.

Il confronto diretto è avvenuto nel *software CloudCompare* con operazioni preliminari di *editing* dei modelli, che hanno interessato, in particolare, la segmentazione in parti più contenute – per agevolare la computazione dell'analisi – e l'esportazione in formati compatibili. Si tratta di confronti puntuali se rapportati alle estensioni dell'intero complesso ma, al contempo, generali se, invece, si guarda alla singola porzione considerata.

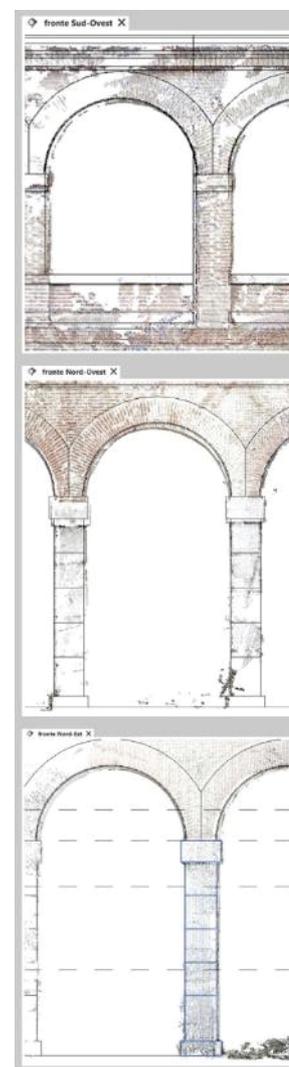
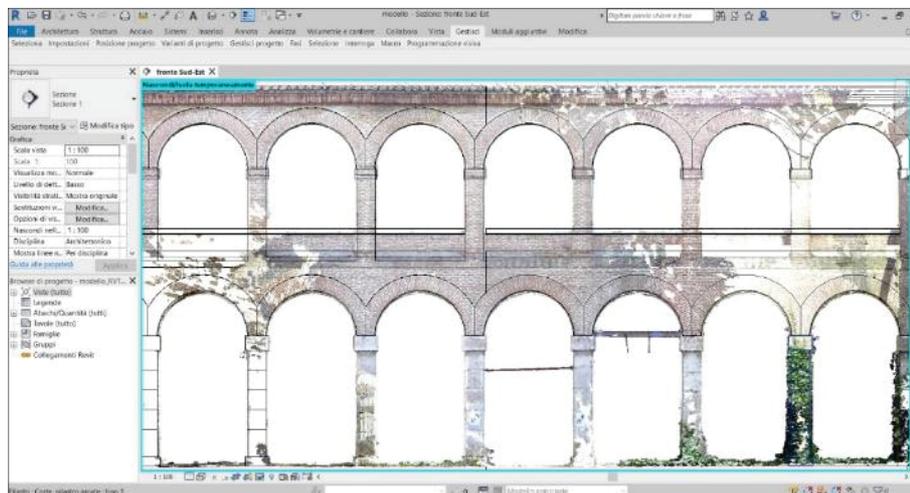


Fig. 6.27 – Sovrapposizione del modello alla nuvola di punti *reality-based*: discostamento di alcune campate dei fronti Sud-Ovest, Nord-Ovest e Nord-Est della corte interna.

Elaborazione M. Pulcrano.

Fig. 6.28 – Visualizzazione del fronte Sud-Est della corte interna in sovrapposizione alla nuvola di punti *reality-based*.

Elaborazione M. Pulcrano.



Le prime analisi sono state condotte sui fronti della corte, poiché già ad una prima verifica visiva in ambiente *Revit*, alcune campate che conformano il porticato e la loggia superiore presentano delle differenze nella visualizzazione in sovrapposizione del modello puntiforme e di quello geometrico (figg. 6.27 e 6.28).

La nuvola di punti era stata già segmentata in gruppi e parti (Cfr. par. 5.1.2, nota 142), ma la registrazione nel formato proprietario di *Recap* (.rvt) – utilizzato per le operazioni di pulizia del modello e per ottenere un formato compatibile per il collegamento in *Revit* – ha richiesto l'esportazione in .e57 per procedere con l'importazione nel software *CloudCompare*.

Per estrapolare la porzione di modello H-BIM corrispondente alla nuvola di punti, invece, si è scelto di non intervenire puntualmente sugli elementi che lo compongono, ma di gestire la visualizzazione della vista tridimensionale attraverso il riquadro di sezione, ovvero con la *box* di visualizzazione che, una volta definitone il perimetro, esclude dalla vista gli oggetti che ricadono al di fuori del limite impostato (fig. 6.29). Quest'espedito consente di esportare la sola porzione di modello

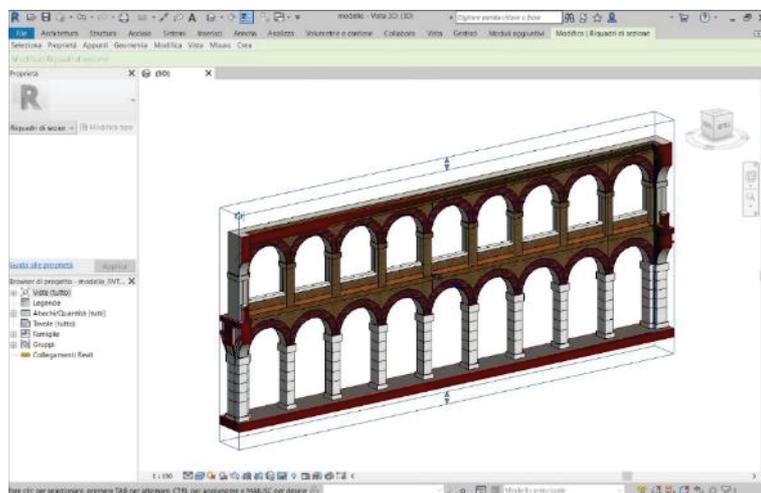


Fig. 6.29 – Selezione attraverso il riquadro di sezione della porzione di modello H-BIM (fronte Sud-Est della corte interna) da esportare in *.stl*.

Elaborazione M. Pulcrano.

visualizzata, limitando gli oggetti da assoggettare al processo; per cui, riquadrato il fronte interessato, si è avviata l'esportazione in *.stl*<sup>205</sup>.

Ottenuti i due modelli nei formati compatibili, si è dunque proceduto con l'importazione nel software *CloudCompare*. La predisposizione del file di progetto in ambiente *Revit* e le operazioni di contestualizzazione della nuvola di punti (Cfr. par. 6.2.1) hanno comportato una diversa impostazione per le coordinate generali del modello H-BIM. In particolare, ciò che risulta non coerente con le coordinate reali di posizionamento e orientamento del complesso è la quota altimetrica, poiché la nuvola di punti è stata oggetto di una traslazione verticale lungo l'asse z al fine di far

<sup>205</sup> Formato generalmente utilizzato per le stampe in 3D e implementato in *Revit* per mezzo del plugin *STL Exporter for Revit*. La scelta di utilizzare l'*.stl* deriva dalla valutazione dei risultati prodotti dai formati presenti di default; in particolare, si è riscontrato che il formato *.fbx* compatibile con *CloudCompare* comporta problemi di dimensionamento del modello, non potendo scegliere l'unità di misura nei settaggi dell'esportazione. Inoltre, mantiene la lettura per oggetti comportando ulteriori operazioni di editing, volte all'unione dei diversi solidi costituenti il modello, per poter effettuare il confronto. Il *.dxf* scompone tutte le geometrie secondo le superfici che li compongono, mentre il *.dwg* e il *.sat* non sono proprio compatibili con *CloudCompare*. Va precisato, però, che nonostante sia stata settata correttamente l'opzione per l'esportazione del colore, il modello salvato in *.stl* ne risulta mancante, ma, visto che gli obiettivi del confronto sono legati a valutazioni metrico-dimensionale si è ritenuto di poter sorvolare su tale aspetto.

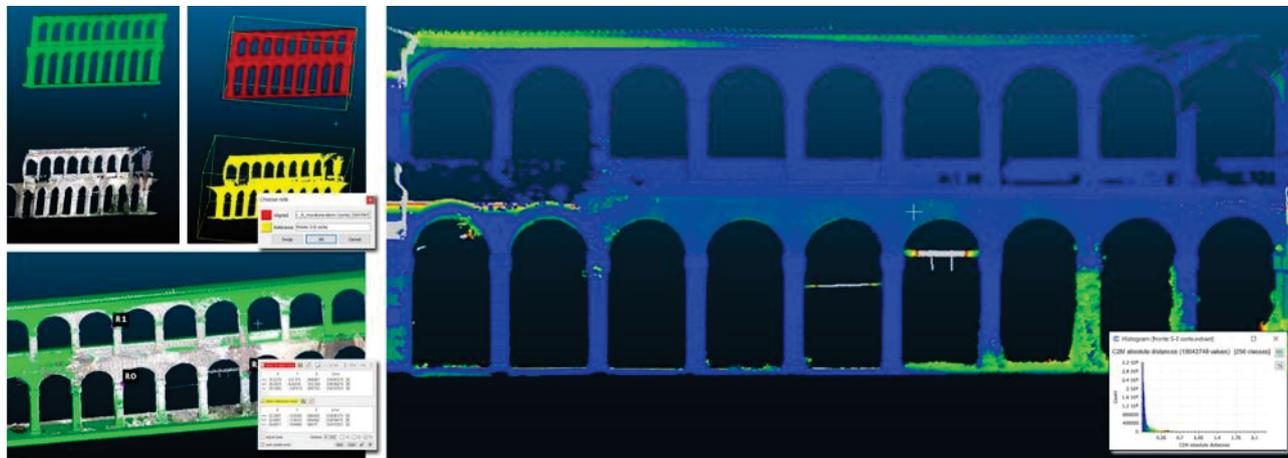


Fig. 6.30 – Analisi automatizzata della divergenza *cloud to mesh* eseguita tra la porzione di nuvola di punti *reality-based* e il modello H-BIM del fronte Sud-Est della corte interna.

Elaborazione M. Pulcrano.

corrispondere l'ingresso principale in *Avenida Portugal* col livello *zero* impostato di *default* in *ambiente di progetto Revit*. Di conseguenza, in seguito all'importazione, il modello H-BIM non risulta correttamente allineato alla nuvola di punti – cosa che invece accade in *Revit* –, rendendo necessario un ri-allineamento tra i due modelli prima di poter avviare l'analisi della divergenza.

Analogamente ai confronti *cloud to cloud* effettuati per la Chiesa annessa al complesso, è stato indicato il modello di riferimento, coincidente con la nuvola di punti, sono state individuate le *equivalent point pairs* ed è stato avviato il processo di allineamento. Ma, diversamente da quanto impostato per i confronti precedenti, in questa occasione si è scelto di mantenere invariata la scala del modello da allineare e di limitare le trasformazioni alla sola traslazione nel piano verticale (fig. 6.30). Inoltre, non si è ritenuto necessario procedere con allineamenti *raffinati* basati sull'ICP.

Anche il processo di analisi vero e proprio, non si discosta molto da quello *cloud to cloud*. È chiaro che la tipologia di elementi sottoposti a confronto – nuvola di punti e modello solido – rendono necessario operare mediante processi *cloud to mesh*, dove i valori computati non dipendono dalla ricerca del punto più vicino, ma dal triangolo più vicino analizzando la distanza, in direzione ortogonale, tra la superficie e il punto considerato.

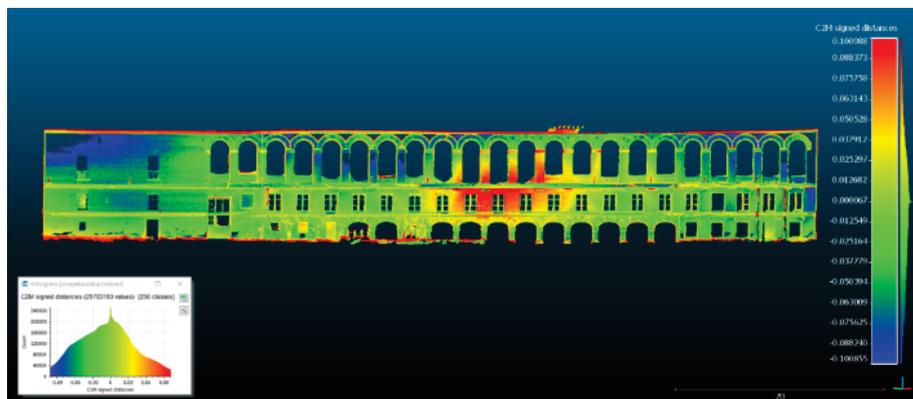


Fig. 6.31 – Risultato del confronto *cloud to mesh* eseguito per il fronte Sud-Ovest che guarda al giardino interno del complesso.

Elaborazione M. Pulcrano.

La medesima procedura è stata reiterata per le altre parti del complesso al fine di ottenere un'analisi complessiva del modello (fig. 6.31).

La lettura dei risultati mostra quanto già emerso in ambiente BIM, ovvero che sussiste un'elevata aderenza tra il modello puntiforme e quello solido e che le semplificazioni introdotte con le analisi geometriche e proporzionali sono rispondenti alla conformazione reale del manufatto. Ciononostante, in alcune porzioni ed elementi specifici si riscontrano delle incongruenze dimensionali e di posizione, che si discostano dalla regola individuata e che lasciano supporre errori o modifiche eseguite in corso d'opera durante le attività di edificazione del manufatto. Infine, alcuni dei risultati sono giustificabili col trascorrere del tempo che non ha reso immune l'Hospital Simón Ruiz ai diversi fenomeni di degrado e dissesto che lo caratterizzano.

### 6.3.1 L'utilizzo delle *fasì temporali* nella caratterizzazione del modello geometrico e del modello reale

Le verifiche condotte sul modello H-BIM e i risultati ottenuti, seppur non eccessivi nei valori riscontrati e in linea col processo di discretizzazione attuato, hanno posto interrogativi sulla necessità di ricalibrare le parti e gli elementi risultati particolarmente divergenti rispetto alla nuvola di punti,

per una corretta trasmissibilità del dato che sia funzione non solo di una mera visualizzazione, ma che il modello stesso diventi strumento utile in interventi futuri sul manufatto. Sono quindi state apportate le dovute correzioni al dato metrico, intervenendo puntualmente sui diversi *smart-objects*. In tale ottica, si sono rese necessarie riflessioni sulle modalità di associazione del tipo di dato e sullo strumento più idoneo a rappresentarlo e documentarlo.

È ampiamente noto che gli strumenti messi a disposizione delle attuali piattaforme BIM, nonostante i continui sviluppi, non siano ancora adeguatamente predisposti per rispondere alle necessità che si palesano nella costruzione di un H-BIM del patrimonio storico-architettonico. Sono, in pratica, anch'essi soggetti ad interpretazioni, al pari degli elementi da *modellizzare*, affinché risultino rispondenti allo scopo ma, al contempo, non siano completamente trasformati nel comportamento e nella logica funzionale dalle operazioni attuate per conformare gli *smart-objects*.

Per procedere con la sperimentazione, dunque, sono stati vagliati i diversi strumenti messi a disposizione dal *software Revit* ed è stato scelto di utilizzare la gestione del dato temporale per mappare, all'interno dello stesso modello, le modifiche sui diversi elementi al fine di rendere il modello complessivo maggiormente aderente alla nuvola di punti<sup>206</sup>. È stato, di fatto, costituito un modello a doppia valenza, da un lato strettamente rappresentativo della conformazione reale, dall'altro esplicativo di rapporti geometrici ideali. Tale scelta operativa è stata dettata dalle modalità di gestione dello strumento stesso; in particolare le funzioni di confronto, attraverso *le viste comparative* e il *filtro delle fasi di lavoro*, sono state ritenute interessanti nel mostrare ed esplicitare contestualmente le differenze che sussistono tra i modelli (fig. 6.32). Inoltre, non si sono rilevati, dall'analisi della documentazione reperita, particolari eventi

---

<sup>206</sup> Va precisato che tali modifiche non interessano le componenti d'insieme (muri, solai, coperture, etc.) ma gli elementi di dettaglio (dimensione e posizione) e, in particolare, la sequenza di porte, finestre e arcate impostata nella definizione formale dei fronti del complesso.

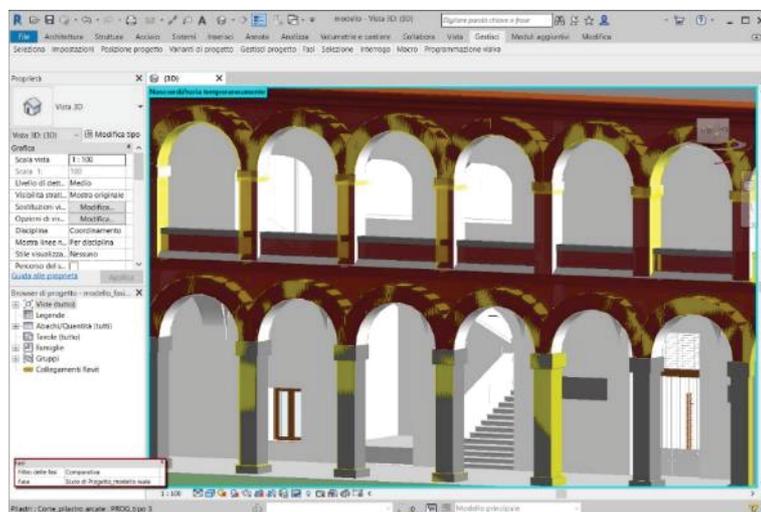


Fig. 6.32 – Vista tridimensionale comparativa della corte interna in visualizzazione ombreggiata. In giallo sono evidenziati gli elementi appartenenti alla fase di costruzione del *modello geometrico*.

Elaborazione M. Pulcrano.

significativi che hanno inciso sul complesso dell'Hospital Simón Ruiz modificandone la struttura, per cui si è ritenuto di poter utilizzare lo strumento in quest'ottica senza incorrere in incongruenze o errate interpretazioni del dato.

Impostate dunque le due *fasi del progetto*<sup>207</sup>, una rappresentativa del modello geometrico e l'altra di quello reale, ogni *smart-objects* è stato caratterizzato affinché la sua costruzione fosse rispondente alla fase corrispondente, secondo regole di associazione del tipo *parametro-oggetto*. Le *fasi di creazione*

<sup>207</sup> In generale, servono per definire le configurazioni del modello in ogni istante del ciclo di vita del manufatto, dall'ideazione, alla cantierizzazione, fino alla manutenzione e dismissione. Ogni periodo temporale corrisponde ad una determinata *fase di progetto* del modello e può essere ulteriormente suddivisa in *step* di dettaglio al fine di conoscere specificatamente il tipo di lavorazioni da eseguire e ottenere, di conseguenza, un maggior controllo su esse. In pratica, con tale strumento si traspone nell'ambiente digitale e direttamente collegato al modello BIM il tradizionale diagramma di *Gantt*, utile alla definizione del cronoprogramma dei lavori. Nei modelli H-BIM le *fasi di progetto* sono utili nel definire le configurazioni pregresse che il manufatto ha assunto col passare del tempo, percorrendo a ritroso la sua costruzione nel tempo.

e *demolizione*<sup>208</sup>, infatti, sono parametri di *istanza* da attribuire specificatamente ad ogni singolo oggetto posto nell'*ambiente di progetto* e richiedono una successione cronologica per gestire correttamente lo sviluppo temporale del modello. A tal fine, è stata caratterizzata la sequenza impostando il *modello geometrico* come fase preliminare, sia in coerenza con il processo operativo di modellazione messo in atto, sia perché parte degli elementi che lo compongono sono rappresentativi anche del modello reale. Diversamente per gli altri *smart-objects*, invece, è stata impostata anche la *fase di demolizione* – coincidente con la fase del *modello reale* – ottenendone l'esclusione nelle diverse viste in funzione dell'impostazione dello *stato della fase* e del *filtro delle fasi di lavoro*<sup>209</sup>. Al contempo, la duplicazione dell'oggetto, nell'esatta collocazione e caratterizzazione dimensionale rispetto alla nuvola di punti, è avvenuta impostandone la *creazione* nella *fase del modello reale*, così da visualizzare il modello completo in tutti i suoi elementi.

---

<sup>208</sup> Rappresentano le proprietà associate agli elementi in relazione alle *fasi di progetto* impostate nel modello, ovvero, in base alla specifica *fase*, ogni elemento potrà essere caratterizzato come *creato* (l'oggetto viene aggiunto nella visualizzazione di quella *fase* e non è visibile nelle *fasi* precedenti) o *demolito* (l'oggetto viene eliminato nella visualizzazione della *fase* e non sarà visibile nelle *fasi* successive).

<sup>209</sup> Lo *stato della fase* consente di settare per ogni vista la visualizzazione degli elementi *nuovi* (creati nella fase corrente), *esistenti* (creati in una fase precedente e ancora esistenti nella fase corrente), *demoliti* (creati in una fase precedente e demoliti nella fase corrente) e *temporanei* (demoliti nella fase corrente). Mentre i *filtri delle fasi di lavoro* sono utilizzati per gestire quali elementi visualizzare e alcuni sono previsti di *default* (*nessuno*, *mostra tutto*, *mostra demo + nuovo*, *mostra nuovo*, etc.).

CAPITOLO SETTIMO

**APPLICAZIONI DI *VIRTUAL REALITY***  
**Progettazione e fruizione di *tour* virtuali**  
**per l'Hotel Simón Ruiz**

La simulazione del reale per fini conoscitivi e divulgativi attraverso operazioni di virtualizzazione del patrimonio storico-architettonico non è una prassi innovativa, ma ad oggi vive un momento di rinnovato interesse, grazie anche all'integrazione, nelle fasi prettamente operative, di tecniche di *game engines* e della *computer graphic and animation* (Cfr. cap. 3). Non mancano, infatti, esempi di applicazioni *Extended-Reality* (XR) che ricorrendo a specifiche strumentazioni – *software, hardware*, dispositivi di visualizzazione e interazione, etc. – mettono in relazione i manufatti reali con le loro riproposizioni virtuali, conformando complessi sistemi di interpretazione, descrizione e visualizzazione dei contenuti ad esse associati.

In questo ampio processo integrato di conoscenza e disseminazione del patrimonio costruito, l'applicazione della metodologia BIM come supporto per la definizione di progetti di *Augmented Reality, Augmented*

*Virtuality* e *Virtual Reality*, è un tema di grande interesse e molto investigato presso la comunità scientifica di settore, poiché non si è ancora pervenuti a metodologie ben definite o consolidate atte a gestire il *continuum* di relazioni informative che si instaurano nelle diverse fasi del *framework* operativo. Ciò deriva dalle caratteristiche del campo di ricerca, ancora troppo giovane e inesplorato, ma che mostra già i primi risultati interessanti nella definizione di procedure per la connessione diretta tra il modello BIM / *Heritage*-BIM e quello XR. Da un lato, infatti, si cerca di limitare la perdita di quantità e qualità delle informazioni – intesa come accuratezza e tracciabilità del dato –, dall’altro di agevolare la visualizzazione di contenuti, spesso troppo complessi per utenti non esperti, in quanto caratterizzati sia dall’eterogeneità delle informazioni che da codifiche specifiche derivanti dai settori tecnici di riferimento. Aspetti ai quali si aggiungono le difficoltà insite nella manipolazione di strumentazioni *software* dedicate al mondo BIM.

Dunque, l’ultima parte del lavoro di tesi si inserisce in tale ambito di sperimentazione guardando, più in generale, alla tematica di usabilità del modello informativo. Diversi, infatti, sono gli obiettivi e le applicazioni per le quali il modello H-BIM viene visto come fase intermedia di un *workflow* più ampio: dalle analisi termiche per riqualificazioni energetiche, alla programmazione delle attività di gestione e manutenzione, fino alla creazione di *storytelling* del manufatto in oggetto. La scelta di strutturare il progetto XR a partire dal modello H-BIM muove da obiettivi complessivi volti ad ottenere simulazioni della realtà interattive e informatizzate, a cui si associano obiettivi più specifici destinati alla condivisione, in un unico sistema, dei dati acquisiti ed elaborati nelle diverse fasi che hanno caratterizzato lo sviluppo della ricerca. La definizione logico-metodologica e pratico-operativa di quest’ultima parte della sperimentazione è relazionata quindi alle modalità di connessione tra il modello informativo e quello virtuale, ma anche alla conformazione di uno strumento che renda fruibili, secondo approcci alternativi ma semplificati, tutte le informazioni inerenti l’Hospital Simón Ruiz, esulando dalla conoscenza diretta del

sistema che le prodotte (siano essi gli strumenti per la gestione della nuvola di punti o *software* di BIM *authoring*).

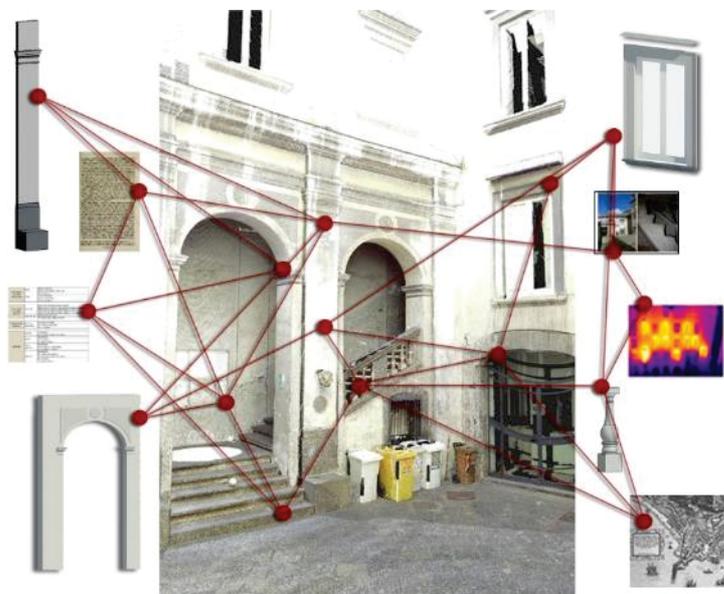
Nello specifico, quindi, le tematiche trattate hanno interessato (i) la scelta della tipologia di fruizione XR a cui dedicarsi – per questa ricerca, in particolare, si è approfondito il tema della VR –, (ii) l'analisi della potenzialità e degli strumenti nel *framework* H-BIM VR, mediante lo studio di progetti di ricerca di settore inerenti le relazioni tra i modelli informativi e le fruizioni virtuali, (iii) l'individuazione degli obiettivi e la progettazione delle modalità di esecuzione della VR, (iv) la definizione del sistema di fruizione, sia nelle componenti *software*, che nell'individuazione dei dispositivi di visualizzazione e interazione e, infine, (v) lo sviluppo vero e proprio del progetto di VR, con approfondimenti sulle procedure pratiche da attuare al fine di rispondere agli obiettivi prefissati.

## 7.1 Dai modelli *Heritage* - BIM al *Virtual Heritage*

Le modalità di condivisione delle informazioni – geometriche e non geometriche – inserite in un modello BIM rappresentano ancora un nodo cruciale nell'applicazione della metodologia, sia essa relativa alla strutturazione di un progetto di edificazione *ex-novo*, che di configurazione del *repository* di un manufatto esistente. Se è vero, infatti, che il ricorso a protocolli di standardizzazione internazionale – in particolare all'IFC – consente di agevolare la collaborazione tra i diversi specialisti di settore che intervengono nella costruzione del modello e di perseguire obiettivi legati all'interoperabilità e all'*open* BIM, è pur vero che la formalizzazione delle strutture che regolano tali protocolli non ha ancora raggiunto un livello di definizione tale da consentire la corretta trasmissibilità del dato.

Fig. 7.1 – Interrelazione di dati tecnici e non nella costruzione di un sistema BIM per il patrimonio storico-architettonico.

Fonte: di Luggo et al., 2019



Di conseguenza, è sovente l'insorgere di incongruenze e/o lacune geometriche e informative dovute anche alle molteplici interpretazioni date dalle *software house* di BIM *authoring* nella definizione dei domini delle varie categorie di componenti – non sempre assimilabili sebbene siano riferiti al medesimo oggetto – (Jiang et al., 2019). Ciò risulta ancora più veritiero in riferimento al patrimonio storico-architettonico e ai modelli H-BIM, dove la conformazione di *smart-objects* dedicati impone la costruzione di apposite librerie – derivanti dalle esigenze di documentazione e rappresentazione – e, conseguentemente, l'adozione di una specifica piattaforma BIM al fine limitare le mancanze nella condivisione del modello.

Analogamente, anche il tema dell'accessibilità, intesa come reperibilità di una determinata informazione all'interno del vasto sistema eterogeneo di dati che caratterizza i modelli BIM, va analizzato con attenzione per i diversi interrogativi che pone sull'individuazione, sulla visualizzazione e sulle modalità di gestione della stessa. Operazioni per le quali, la conoscenza delle codifiche nella strutturazione del *database* e l'esperienza

nell'utilizzo dell'ambiente BIM prescelto, nonché la gestione delle autorizzazioni alla piattaforma impiegata e allo specifico progetto<sup>210</sup>, giocano un ruolo fondamentale nell'accessibilità del dato. Nei modelli H-BIM, tale aspetto comporta ulteriori criticità poiché il sistema, come è ben noto, è implementato anche con indicazioni non prettamente tecniche, ma descrittive degli aspetti qualitativi che connotano il manufatto in oggetto (fig. 7.1).

In sintesi, dunque, nell'approccio BIM/H-BIM molte sono le questioni teoriche e pratiche ancora aperte, ma particolare attenzione va posta agli aspetti relativi le modalità di condivisione e accessibilità del modello e delle informazioni ad esso associate, al fine di non vanificare le attività condotte nelle precedenti fasi. In riferimento al patrimonio storico-architettonico, in particolare, diversi studi e ricerche (Banfi et al., 2019(a); Chionna et al., 2015; Davidson et al., 2020; Diao e Shih, 2019; Parrinello e Dell'Amico, 2021; Quattrini et al., 2018; Zaker e Coloma, 2018) affrontano la tematica proponendo modalità alternative di visualizzazione, basate sulla costruzione di progetti di fruizione XR (fig. 7.2). In questo modo, agli obiettivi di collaborazione tra le figure professionali, dell'*open* BIM, della definizione di protocolli operativi, del LOD da raggiungere, etc., si integrano quelli legati alla costruzione di un *sistema edificio* più ampio volto da un lato alla gestione delle operazioni di conoscenza e conservazione da condurre sul manufatto, dall'altro alla valorizzazione e divulgazione dei valori di cui esso è portatore. A tali obiettivi, talvolta, si aggiungono anche quelli legati alla valutazione delle condizioni di sicurezza (Sidani et al., 2018) inerenti sia la gestione del cantiere edile che le simulazioni delle azioni da intraprendere in situazioni critiche di pericolo come, ad esempio,

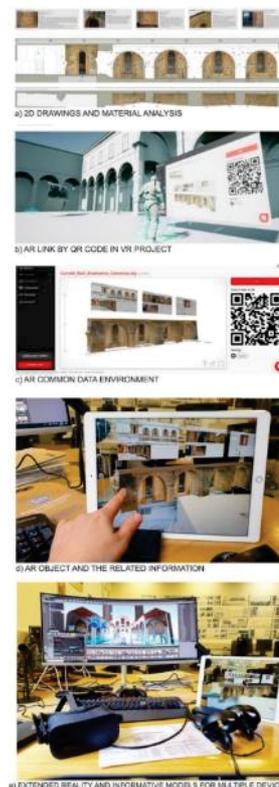


Fig. 7.2 – Visualizzazione della componente geometrica del modello informativo e dei metadati associati attraverso tecniche di *Augmented* e *Virtual Reality*.

Fonte: Banfi et al., 2019(a)

<sup>210</sup> Non è scontato che tutti gli attori della filiera AECO inseriti nel medesimo progetto, ivi inclusi i committenti, posseggano le autorizzazioni necessarie per visualizzare il progetto nella sua totalità – sia esso legato ad un *software* di BIM *authoring* oppure caricato su una piattaforma dedicata –. Se da un lato questa prassi operativa consente di individuare gli specifici compiti di ognuno di essi e gestirne in modo adeguato lo sviluppo, dall'altro ne potrebbe limitare la conoscenza e, di conseguenza, influire sulle scelte tecniche e progettuali.

la verifica delle procedure antincendio o di evacuazione in caso di emergenza (Nandavar et al., 2018). Viene, in pratica, convogliato in un unico strumento sia l'aspetto prettamente tecnico che quello divulgativo del modello rendendone, al contempo, più semplice la fruizione non solo per gli specialisti di settore, ma anche per il potenziale utente a cui è destinata l'esperienza XR (Mitchell e Murphy, 2019).

Per cui, tralasciando le ben note difficoltà legate alla costruzione di modelli H-BIM – precedentemente discusse sia in termini generali di applicazione metodologica (Cfr. cap. 2), che con specifici riferimenti al caso studio dell'Hospital Simón Ruiz (Cfr. cap. 6) –, e ponendo l'attenzione sulle modalità di gestione della trasformazione del modello informativo in un modello virtuale interattivo e informatizzato, diverse sono le tematiche che entrano in gioco, alcune delle quali intrecciano aspetti teorici con quelli prettamente pratici legati alla tipologia di *software* utilizzato per la costruzione dell'esperienza fruizione e alla definizione del sistema per la sua esecuzione.

### **7.1.1 Potenzialità delle fruizioni *Heritage* - BIM VR**

La simulazione del reale attraverso modelli informativi e implementabili, resi interattivi mediante l'utilizzo delle *user interfaces* (Cfr. par. A.3), è una delle principali potenzialità che interviene nell'individuazione delle possibili connessioni tra la metodologia BIM e la tecnica VR. Tale aspetto, in realtà, si snoda in sotto-tematiche ben delineate nella forma concettuale, che se analizzate nell'insieme convergono tutte nel caratterizzare il modello H-BIM come valido supporto per la costruzione dell'ambiente virtuale.

La prima questione che si pone è legata al processo di modellazione attuato che, come è ben noto, nei sistemi BIM risulta inverso rispetto alle tradizionali tecniche, portando alla definizione della conformazione spaziale del manufatto esistente mediante la collocazione nell'ambiente digitale di elementi tridimensionali. Enormi vantaggi ne conseguono per

la qualità dell'informazione che verrà visualizzata, poiché non sarà più dipendente da operazioni di conversione di dati 2D, ma sarà già costruita in 3D<sup>211</sup>.

Nelle tecniche consolidate di VR, invece, è prassi comune realizzare il modello destinato allo sviluppo della fruizione a partire da rappresentazioni di pianta, sezione e alzato e con processi di estrusione, operando con semplificazioni – talvolta necessarie – al fine di ottimizzarne la visualizzazione e ridurre la quantità di dati da elaborare, con ripercussioni negative sulla qualità degli stessi. Vengono volutamente tralasciate informazioni di tipo tecnico o dettagli ritenuti non necessari agli scopi puramente figurativi del modello tridimensionale. Inoltre, va precisato che le rappresentazioni su cui si fonda la modellazione non sempre sono esplicative di ogni particolare: spesso, infatti, sono redatte per i pochi punti ritenuti significati e, conseguentemente, un certo grado di incertezza caratterizza il modello tridimensionale<sup>212</sup>. Sorgono, dunque, questioni teoriche legate all'accuratezza e all'autenticità del dato visualizzato (Roussou, 2002) – non garantite appieno nella conversione dal 2D al 3D –, le quali però si possono limitare ricorrendo all'H-BIM, poiché l'applicazione stessa della metodologia e del *framework* operativo presuppone la creazione di un modello digitale coerente con il reale, sia nell'aspetto visuale che in quello logico-funzionale (Cfr. par. 2.1).

Ma il *cosa* modellare non è l'unico fattore ad incidere sulla qualità della fruizione VR, i cui esiti, invece, sono strettamente dipendenti dal *come* sono

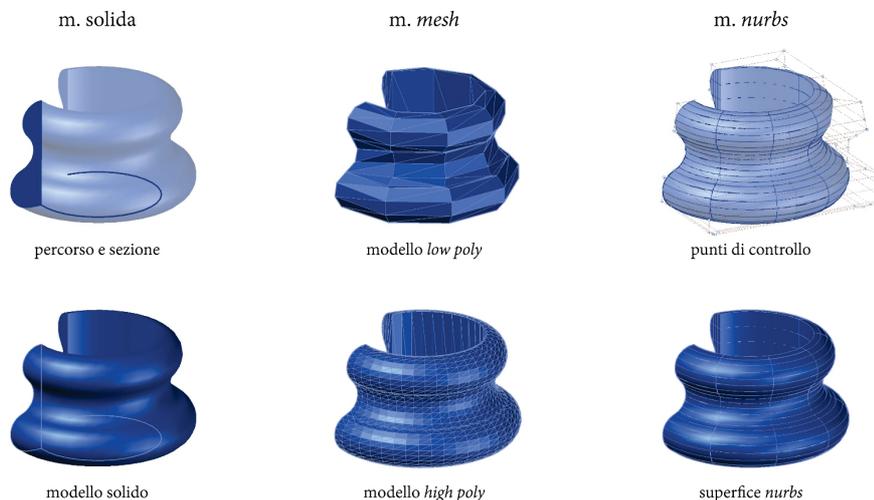
---

<sup>211</sup> Non sarà quindi necessario eseguire delle operazioni di estrusione di rettangoli per realizzare muri, poiché essi saranno già collocati nell'ambiente di modellazione BIM come parallelepipedi, ovvero come oggetti tridimensionali.

<sup>212</sup> Diversamente, con l'applicazione della metodologia BIM, poiché gli *smart-objects* inseriti nel progetto sono legati ad un unico *database* attraverso il quale viene gestito il contenuto informativo del modello, escludendo eventuali mancanze nello stesso, tutte le rappresentazioni che possono essere estrapolate (bidimensionali, tridimensionali e di dettaglio, nonché abachi e tabelle) non potranno presentare incongruenze o difformità, in quanto derivanti dalla stessa tipologia di dato.

Fig. 7.3 – Costruzione di una forma attraverso le diverse procedure di modellazione solida, *mesh* e *nurbs*.

Elaborazione M. Pulcrano



realizzati gli oggetti tridimensionali e, in particolare, gli elementi complessi – non guardando tanto alla forma, quanto piuttosto alla tipologia di modellazione (solida, *mesh* o *nurbs*) – (fig. 7.3).

I dispositivi di visualizzazione VR, infatti, utilizzano tecniche di *rendering in real time*<sup>213</sup> per le quali è necessario non gravare sulla gestione grafica del progetto per non influire negativamente sulla scena visualizzata e sulla sua

<sup>213</sup> Applicata prevalentemente nel campo del *visual design* e dei *game engines*, il *render in real time* è una tecnica che consente di elaborare sequenze di immagini di scene tridimensionali, ovvero di convertire i dati 3D di *input* in dati 2D *raster* di *output* in una determinata posizione e orientamento dipendente dalla visuale della camera utilizzata, con una rapidità tale da indurre l'illusione del movimento. Il tempo impiegato è influenzato non solo dalla qualità impostata per generare l'immagine, ma anche dalle dimensioni, dalla complessità geometrica e dal numero di sotto-elementi che costituiscono l'oggetto da *renderizzare*. Alcuni tipi di modellazione, come ad esempio quella *mesh* ad alta risoluzione, restituiscono modelli tridimensionali costituiti da numerose superfici poligonali, al fine di rendere elevati dettagli e morbidezza delle forme; di fatto, però, tali oggetti comportano tempi eccessivamente lunghi nella *renderizzazione* e, per contro, una loro riduzione non garantirebbe la stessa accuratezza nella rispondenza visiva col reale, con conseguente perdita di qualità. Ciononostante, se le esigenze di visualizzazione lo richiedono, è necessario procedere con operazioni di semplificazione affinché l'oggetto tridimensionale possa essere correttamente gestito in *real time* (Banfi et al., 2019(b)).

esecuzione, con mancate risposdenze con le *texture* reali e limitata fluidità sia nei movimenti dell'utente che nelle variazioni di ambientazione. Di conseguenza, al fine di limitare l'insorgenza di incongruenze o ritardi è bene valutare il tipo di modellazione da attuare e le semplificazioni da introdurre in funzione non solo dell'oggetto da realizzare, ma anche del grado di dettaglio che si rende necessario ai fini della fruizione, oltre che del sistema adoperato per l'esecuzione della stessa.

Le geometrie realizzabili in piattaforme H-BIM, in particolare, seguono regole e principi della modellazione solida tradizionale: si tratta, quindi, di elementi più semplici, leggeri e veloci da *renderizzare*, in linea con le richieste grafiche delle fruizioni VR. Ciononostante, riflessioni sull'adeguatezza del dato tridimensionale vanno condotte per comprendere se la complessità geometrica e formale rappresentata nel modello è rispondente sia alla visualizzazione VR, che al livello LOD a cui si vuole tendere. Laddove, però, le richieste siano divergenti, un valido supporto è dato dai *software* BIM che consentono di caratterizzare gli *smart-objects* con diversi livelli e gradi di dettaglio. Tale procedura, sebbene comporti ulteriori ragionamenti nello sviluppo del *workflow* di modellazione H-BIM, sia per le riflessioni logiche da condurre nell'individuazione delle modalità di semplificazione da adottare ai diversi livelli, sia per le operazioni pratiche da eseguire, consente di conformare un unico modello rispondente al reale, alla logica BIM e, al contempo, alla VR.

All'aspetto puramente formale, infine, si somma l'interrelazione che lega i metadati con la geometria del sistema H-BIM (dimensioni, materiali, colore, codici identificativi, etc.), che consente, com'è noto, di modificare contestualmente gli *smart-objects* e il *database* associato.

Ciò rappresenta un grande vantaggio se visto in riferimento alle tradizionali metodologie di strutturazione della VR (fig. 7.4), dove al modello geometrico-visuale viene collegata una banca dati esterna mediante *link* e codici di programmazione. Se fosse necessario apportare correttivi anche lievi, le procedure attuate impongono di modificare

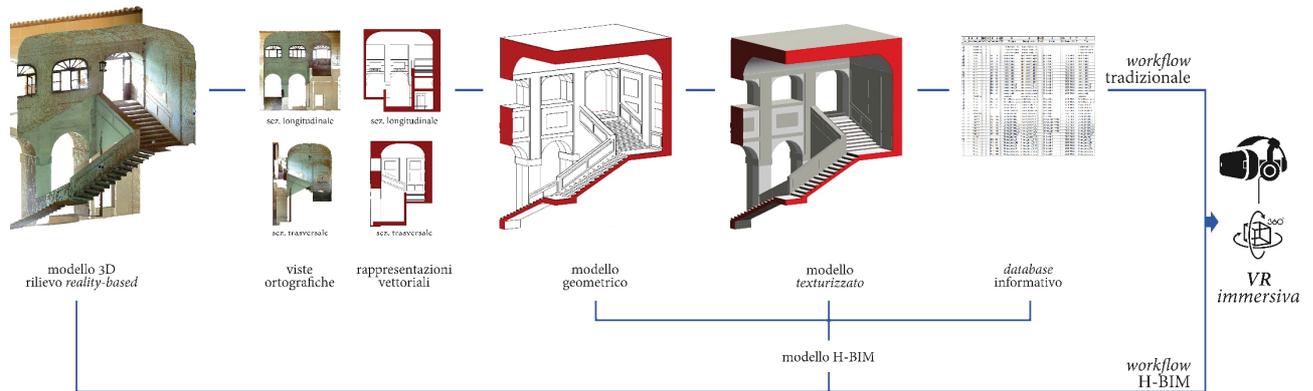
geometria e metadati in momenti e piattaforme ben distinte e separate – dipendenti dal *file* di origine –: operazione da condurre con particolare cura e attenzione affinché non vi siano incongruenze nelle diverse tipologie di informazioni visualizzate. Problematica, che, appunto, viene limitata ricorrendo ai modelli H-BIM, dove tutto è strettamente correlato<sup>214</sup> e la gestione in un'unica piattaforma consente di ottimizzare i tempi di modifica dei *files* e della VR stessa.

L'aggiornamento segue generalmente processi unilaterali – o unidirezionali –, ovvero la manipolazione delle informazioni viene eseguita esclusivamente nel *software* BIM, mentre al sistema VR è destinata la sola attività di visualizzazione e strutturazione della fruizione. Ad oggi, il collegamento tra i due ambienti avviene per procedure manuali e semi-automatizzate, dove, in pratica, è necessario effettuare di volta in volta operazioni di esportazione/importazione in funzione dei sistemi utilizzati. Ma le sperimentazioni condotte in merito, supportate anche dallo sviluppo di piattaforme dedicate<sup>215</sup> con collegamenti diretti e bilaterali tra il modello H-BIM e la VR, consente di prefigurare aggiornamenti automatizzati, in modo che a modifiche del modello corrispondano contestualmente modifiche della geometria e dei metadati in VR (colori, materiali e posizione degli oggetti, annotazioni, etc.), e viceversa. Tali piattaforme sono nate come supporto alle attività di *interior design*, ma le potenzialità

---

<sup>214</sup> Aspetto di grande rilevanza se si considera la mole di dati eterogenei che, molto spesso accompagna il patrimonio storico-architettonico e che, proprio nel modello BIM, trova una sintesi coerente.

<sup>215</sup> Ad esempio, *usBIM platform* e *Fuzor*. La prima è una piattaforma progettata dalla società ACCA *software* che utilizza il formato *open IFC* per garantire la collaborazione tra i diversi specialisti che partecipano alla costruzione del modello BIM e, inoltre, con *tools* dedicati consente la visualizzazione stereoscopica del modello e la possibilità di apportare modifiche direttamente in VR. *Fuzor*, invece, è un *software* per la progettazione di ambientazioni VR che, attraverso *plugin* specifici per i maggiori *software* di BIM *authoring*, consente flussi bidirezionali di informazioni mediante sincronizzazioni automatizzate.  
<https://platform.usbim.com/index.vm>  
<https://www.kalloeotech.com/index.jsp>



che mostrano nell'approccio applicativo le rende un valido supporto, sia nell'ottimizzazione dei tempi che nella valutazione e validazione degli interventi e delle attività da condurre sul manufatto in oggetto. Ciononostante, necessitano ancora di essere perfezionate al fine di soddisfare le esigenze di personalizzazione della esperienza di fruizione.

Fig. 7.4 – Esperienze di fruizione immersiva: differenze nel processo di costruzione della VR a partire da rilievi *reality-based* nell'approccio tradizionale e nell'approccio H-BIM VR applicato nella presente ricerca.

Elaborazione M. Pulcrano

### 7.1.2 Strumenti *software* per il progetto di *Heritage* - BIM VR

È chiaro che la scelta del sistema da adoperare per la costruzione della VR è funzione del grado di *immersività* e *interattività* che si vuole rendere nella scena, oltre che della sua esecuzione e degli scopi per i quali viene richiesto il progetto di comunicazione, in quanto le diverse soluzioni attualmente disponibili, non consentono di rispondere in modo analogo al medesimo obiettivo. Infatti, sebbene siano stati sviluppati *software* e *plugin* direttamente collegati alle piattaforme di BIM *authoring* per fruizioni alternative del modello, spesso si rivelano non adeguati alla definizione di ambientazioni VR per le limitazioni che impongono soprattutto nella costruzione e nell'integrazione di contenuti personalizzati. A tal fine, le attuali ricerche in merito mostrano, invece, come risultati soddisfacenti si possano ottenere integrando nel *framework* H-BIM VR le tecnologie del *gaming engine*. Queste, sebbene richiedano competenze e conoscenze che

## NAVIGAZIONE NELLE FRUIZIONI XR

*L'utente della fruizione XR può camminare tra gli elementi che compongono la scena o volare su essi. Nel primo caso – walk-through o camminata – si è vincolati ad uno specifico piano, generalmente coincidente con il piano di calpestio xy; nel secondo – fly-through o volo d'uccello –, invece, non esiste nessun vincolo, si è liberi di muoversi nello spazio digitale e, per tale motivo, si ha la sensazione di volare.*

*Entrambe le modalità consentono una navigazione dinamica poiché il punto di vista virtuale si aggiorna in base alla direzione visuale scelta dall'utente. Nelle fruizioni stereoscopiche (esperienze immersive e semi-immersive), in particolare, la camera di visualizzazione coincide con la vista dell'utente – first person (FP) –, aumentando la sensazione di presenza percepita.*

*Nel walk-through, inoltre, all'FP può essere sostituito il third person (TP), una diversa modalità di visualizzazione in cui la camera non coincide con la vista dell'utente, ma viene tralata per seguirne i movimenti. Questi sono virtualizzati attraverso un avatar che lo rappresenta. La modalità walk-through, infine, può essere resa statica legando la posizione del punto di vista ad una specifica inquadratura: la navigazione del modello, in pratica, (continua)*

esulano dalle attività proprie del settore AECO e siano state pensate prettamente per fini ludici e dell'*entertainment*, consentono di strutturare progetti di fruizione XR coerenti con le finalità tecniche e divulgative.

Per cui, si rende necessaria la distinzione tra gli strumenti di pura visualizzazione e quelli che, invece, consentono di progettare lo svolgimento della VR.

I primi<sup>216</sup>, sono strutturati per la navigazione del modello (fig. 7.5) – spesso in entrambe le modalità *walk-through* e *fly-through* – mediante un'interfaccia grafica semplificata, che permette di concentrare l'attenzione sull'oggetto visualizzato, di muoversi al suo interno senza particolari difficoltà e di registrare video del percorso effettuato. In alcuni casi, mediante l'associazione con dispositivi HMD, la visione diviene stereoscopica per eseguire la fruizione del modello in VR e indurre nell'utente la sensazione di *presenza* all'interno dell'ambiente virtuale, ma la discreta resa delle *texture* riprodotte sugli elementi e la mancata possibilità – in alcuni dei visualizzatori – di gestire le condizioni di illuminazione, sia naturale che artificiale, ne alterano la percezione realistica.

Sebbene tali *software* non consentano la costruzione di narrazione e *storytelling*, percorsi di fruizione predeterminati o l'integrazione di componenti e dati aggiuntivi, sono comunque utili strumenti per percepire la spazialità del manufatto rappresentato dal modello, le informazioni ad esso associate – inserite nel *software* di BIM *authoring* – e, se consentito, collegare *query* direttamente agli elementi. Inoltre, il caricamento del modello in *cloud* virtuali – talvolta obbligatorio per la sua fruizione – consente di visualizzarli anche da remoto con collegamenti a siti dedicati o attraverso *App* e dispositivi *mobile*. In questo modo, diventano un supporto importante soprattutto nelle fasi di controllo e manutenzione

<sup>216</sup> Tra i visualizzatori più utilizzati troviamo, ad esempio, *Autodesk Viewer*, *A360*, *BIM360*, *BIMx*, *Enscape*, *Navisworks*, *Iris VR*, *VR AX 3000 Virtual Reality*, etc. Funzionano in modo analogo e alcuni di essi sono stati sviluppati direttamente dalle *software house* di BIM *authoring* così da garantire un'interoperabilità diretta tra modellatore e visualizzatore.

dell'edificio, semplificando la comunicazione tra i diversi specialisti che collaborano al progetto BIM e la verifica di eventuali problematiche connesse al modello virtuale, oltre che a quello reale.

Infine, in alcuni casi, il visualizzatore è direttamente collegato al *software* di modellazione BIM scelto, attraverso *tools* e *plugin* dedicati: aspetto rilevante nell'ottimizzazione del processo di condivisione e sincronizzazione del modello.

Nel secondo caso, invece, si ricorre ai motori di gioco<sup>217</sup> al fine di ampliare le possibilità di interazione col modello, oltre che personalizzare l'esecuzione della scena introducendo, ad esempio, i diversi elementi presenti nella piattaforma utilizzata (personaggi, oggetti, ambientazioni, etc.) che, entrando in relazione con l'utente, ne favoriscono un maggior coinvolgimento psicologico e mentale. Inoltre, essendo ideati per lo sviluppo di giochi e strutturati sui principi della *computer graphic and animation*, particolare attenzione viene data alla resa materica delle superfici e alla gestione dell'illuminazione della scena, al fine di garantire un'elevata qualità fotorealistica nelle *texture* degli oggetti e la generazione corretta delle ombre, in funzione sia della luce naturale che di quella artificiale. Infine, lo sviluppo effettuato con i *software* di *game engines*, come è noto, consente di strutturare progetti multi-piattaforma, ovvero destinati alla elaborazione di applicativi da eseguire su diversi dispositivi. In pratica, il medesimo progetto di fruizione può essere destinato, ad esempio, sia alla visualizzazione *desktop* – mediante la generazione di un *file* eseguibile (.*exe*) che non necessita di ulteriori *software* preinstallati – sia a quella mediante dispositivi *mobile* o HMD – attraverso la creazione di un'*App* specifica, dipendente dal sistema su cui dovrà essere utilizzata –.

Per contro, però, tali piattaforme richiedono l'esportazione del modello BIM/H-BIM in formati compatibili – generalmente *.obj* e *.fbx* – e sono basate su codifiche e *scripting*, per cui necessitano di procedure manuali e

(segue)

*avviene cambiando di volta in volta la posizione della camera in un determinato punto precedentemente individuato, come accade nei tradizionali tour virtuali a 360° e in Google Street View.*

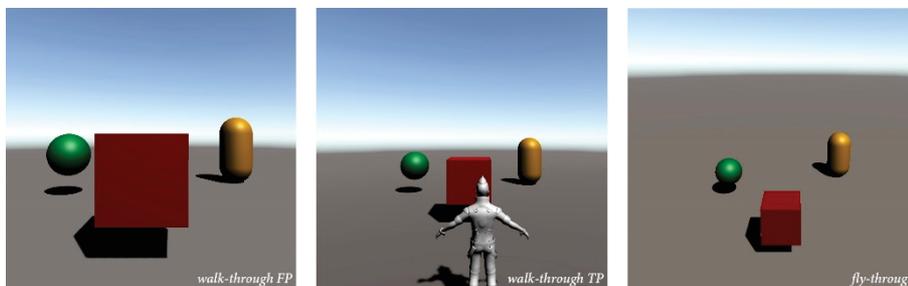
*È chiaro che sia walk-through che il fly-through offrono risultati soddisfacenti per determinate tipologie di navigazione. Ad esempio, per la visualizzazione dei dettagli, la camminata risponde più coerentemente rispetto al volo; viceversa, nel caso di ambientazioni d'insieme, dove è necessario capire le parti esterne o il rapporto che esse hanno con il contesto, il fly-through risulta più indicato. Ciononostante, la scelta della modalità da utilizzare non è vincolata a specifici criteri o soluzioni concettuali, ma va valutata in funzione dei risultati a cui si intende pervenire.*

---

<sup>217</sup> *Eyecad VR, Unity 3D, Unreal Engine e Godot Engine.*

Fig. 7.5 – Visualizzazione della medesima ambientazione nelle modalità di navigazione *walk-through first person*, *walk-through third person* e *fly-through*.

Elaborazione M. Pulcrano



competenze informatiche<sup>218</sup> per progettare adeguatamente lo sviluppo fruizione virtuale.

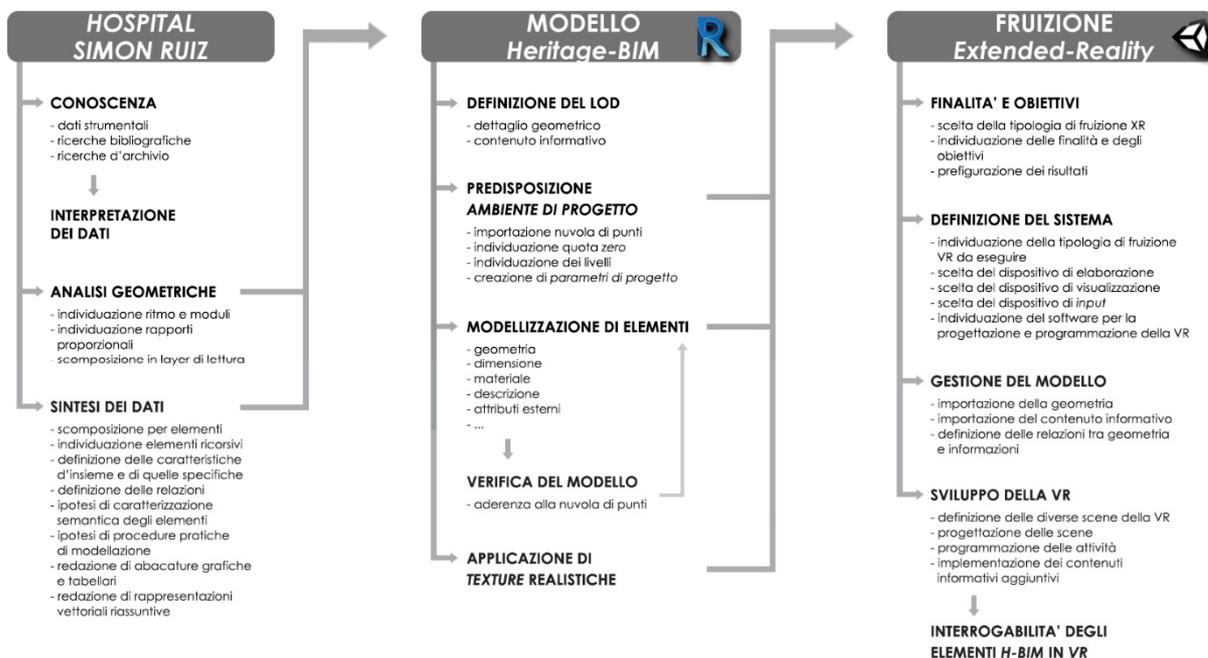
Tra i diversi *software* messi a disposizione dal mondo dei *game engines*, *Unity 3D* e *Unreal Engine* sono quelli più utilizzati (Pybus, 2019) per le modalità di impostazione della scena – con libertà di movimento<sup>219</sup> e fruizione delle informazioni –, per la resa grafica, etc. Tematiche su cui, generalmente, viene focalizzata l’attenzione nella costruzione di progetti di VR, al fine di ottenere risultati soddisfacenti che combinano gli aspetti ludici con quelli informativi e tecnici.

## 7.2 Definizione e strutturazione del progetto di fruizione *Heritage* - BIM VR per l’Hospital Simón Ruiz

L’approccio metodologico utilizzato per la messa a sistema del progetto di fruizione VR è stato scandito da diverse fasi (fig. 7.6), che a partire dall’individuazione delle finalità da perseguire, hanno portato alla definizione della struttura formale e funzionale dell’applicazione. Da un

<sup>218</sup> Nello specifico, sono necessarie almeno nozioni base nei principali linguaggi di programmazione (*Javascript*, *C#* o *C++*) al fine di gestire le eventuali modifiche e ottenere i risultati attesi.

<sup>219</sup> Sfruttando le medesime modalità viste precedentemente del *walk-through* e del *fly-through*.



lato, sono stati affrontati gli aspetti teorici legati all'organizzazione e alle modalità di esecuzione della VR, dall'altro, quelli pratico-applicativi con il ricorso a soluzioni specifiche per rendere il progetto coerente e rispondente agli obiettivi prefissati.

### 7.2.1 Finalità e obiettivi del sistema *Heritage* - BIM VR

La sperimentazione condotta in questa fase della ricerca muove dalla volontà di delineare nuovi approcci per la condivisione e la fruizione dei modelli informativi. Nello specifico, si è scelto di conformare uno strumento atto ad agevolare, secondo modalità alternative, la visualizzazione, la lettura e l'interpretazione del modello H-BIM dell'Hotel Simón Ruiz, delle informazioni ad esso associate e dei ragionamenti che ne hanno guidato la costruzione (Cfr. par. 6.1).

Fig. 7.6 – *Framework* di progetto: dal reale al reale esteso. Processo metodologico applicato all'Hotel Simón Ruiz nella costruzione del modello informativo e interattivo.

Elaborazione M. Pulcrano

Quest'ultimo aspetto, in particolare, sebbene sia il fondamento della modellazione eseguita, non è immediatamente percepibile all'interno della piattaforma BIM utilizzata, poiché, al fine di non gravare sulla visualizzazione grafica degli oggetti nell'*ambiente di progetto*, i componenti *griglie e piani di riferimento* sono stati impostati come strutture secondarie di supporto. Per tale motivo, è stato ritenuto opportuno individuare, tra i primi elementi della VR, una modalità di esplicitazione grafica adeguata a mostrare – oppure nascondere, in base alle scelte effettuate dell'utente – le regole e i rapporti geometrici che definiscono la composizione del complesso nel suo sviluppo planimetrico e negli alzati.

Nel perseguire gli obiettivi, dunque, si è palesata la necessità di personalizzare la VR, non solo all'atto della sua creazione ma anche dopo in fase di esecuzione, imponendo il ricorso ai *software di game engines* per la progettazione e lo sviluppo della stessa, oltre che l'acquisizione di nuove conoscenze, al fine di non rendere la fruizione una mera visualizzazione del modello H-BIM in visione stereoscopica. I diversi *test di prova* e le sperimentazioni eseguite con il *software*, per comprenderne le modalità e le logiche di funzionamento, hanno al contempo consentito di individuarne le potenzialità e di andare oltre i risultati attesi, ampliando il quadro degli obiettivi prefissati. La struttura complessiva della VR, infatti, non è stata definita aprioristicamente ma si è evoluta in *itinerare* durante la fase applicativa vera e propria portando alla costruzione di un sistema di fruizione più complesso di quello inizialmente prefigurato, in cui l'utente è libero di navigare all'interno della scena, scegliere gli oggetti di cui ricavare le informazioni, individuare i componenti aggiuntivi, etc. senza schemi precostituiti che possano in qualche modo limitare, o influire, sull'esecuzione della VR.

Di conseguenza, aspetti legati all'integrazione e all'interrelazione, in un unico strumento, dei diversi dati acquisiti, interpretati e/o elaborati nelle precedenti fasi della ricerca, rappresentano gli obiettivi finali che hanno condotto allo sviluppo di un'applicazione – come si dirà in seguito (Cfr. par 7.3) – *multidimensionale*, intesa come conoscenza incrementale, e *multimodale*, ovvero basata su diverse modalità di navigazione.

## 7.2.2 Individuazione delle componenti di riferimento per il sistema *Heritage - BIM VR*

Definiti gli obiettivi, preliminare nella costruzione dell'applicazione VR è stata l'individuazione del sistema da adoperare.

Come visto nel capitolo terzo e come sarà specificato in appendice, la vastità di tecnologie che oggi propone il mercato dell'*entertainment* impone di scegliere con particolare attenzione i dispositivi da utilizzare, al fine di individuare quelli che meglio si prestano a rispondere ai requisiti e agli scopi del progetto di fruizione.

È chiaro che tale decisione è funzione di molteplici aspetti tecnici e tecnologici – tipologia di esperienza che si vuole realizzare, qualità grafica nella visualizzazione delle immagini, tempi di *renderizzazione* che il sistema impone, *target* di utenti a cui è rivolta, etc. – a cui si sommano quelli legati all'economicità del sistema e alla commercializzazione dell'applicazione, da non sottovalutare soprattutto in riferimento alla diffusione del progetto. Infatti, un sistema che propone un'elevata qualità a discapito delle spese sostenute per la realizzazione e gestione dello stesso, potrebbe risultare meno applicabile rispetto ad uno che, al contrario, propone una qualità inferiore della fruizione ma può essere valutato come tecnologia *low cost*. Analogamente la scelta di legare la progettazione della VR ad uno specifico strumento di esecuzione, invece che ad un'applicazione *open*, ne limita di fatto la replicabilità su altri sistemi – o dispositivi – analoghi.

Tali aspetti riguardano i dispositivi di visualizzazione, di *tracking* e di *input*, ma non meno influente nei risultati ottenibili è l'individuazione del *software*, che riveste un ruolo fondamentale per la creazione e personalizzazione dell'esperienza di fruizione.

A valle di questi ragionamenti, è stato definito il sistema da adoperare per lo sviluppo della VR dell'Hospital Simón Ruiz (fig. 7.7). Nello specifico, è stato scelto di predisporre un'applicazione gestita da dispositivi *mobile*

Fig. 7.7 – Definizione del sistema tecnologico per la programmazione, esecuzione e gestione dell'esperienza di fruizione VR dell'Hospital Simón Ruiz.



(*smartphone* basati sul sistema operativo *Android*)<sup>220</sup> che associati ad HMD di tipo *Cardboard* consentono la visualizzazione stereoscopica e l'immersione totale delle diverse scene impostate.

La resa grafica del progetto sarà quindi dipendente dalle caratteristiche computazionali, prestazionali e grafiche dello *smartphone* utilizzato per la visualizzazione della VR, ma considerando che quelli attualmente esistenti mostrano elevate qualità, non vi è dubbio che la scelta possa portare a risultati soddisfacenti in merito. Accanto all'aspetto tecnico e tecnologico, è stato valutato anche il potenziale utilizzo dell'applicazione in relazione all'ampia diffusione degli stessi.

La sensoristica presente nello *smartphone* definisce il tipo di *head tracking* (Cfr. par. A.1) grazie al quale viene rilevato, in particolar modo, l'orientamento della visuale dell'utente con la lettura delle coordinate angolari (*yaw*, *pitch*, *roll*). Il sistema così composto, quindi, rientra nella tipologia 3DoF, poiché il tracciamento risulta mancante delle informazioni di posizione<sup>221</sup>, ma associando un *controller* per la gestione degli *input* è stato possibile arrivare a gestire i 6DoF completi. Nello specifico, il *controller*

<sup>220</sup> Ciò non toglie che il progetto di fruizione può essere esportato per altre piattaforme.

<sup>221</sup> In realtà, va precisato che in questa tipologia di sistema l'utente non è in grado di muoversi nella scena virtuale poiché non sono implementati sensori per la mappatura della posizione. Per cui, pur muovendosi nella realtà reale, in quella virtuale in pratica resta fermo e vincolato ad uno specifico punto, rappresentativo della posizione della camera virtuale che viene utilizzata per la *renderizzazione* della scena.

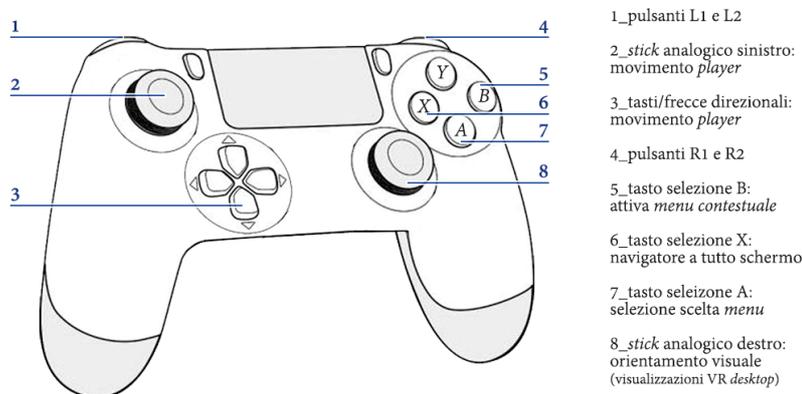


Fig. 7.8 – Personalizzazione delle funzioni dei diversi *input* del *controller* in relazione alle azioni da gestire durante l'esecuzione della fruizione VR.

Elaborazione M. Pulcrano

utilizzato presenta sia tasti – o frecce – direzionali<sup>222</sup> che *stick* analogici<sup>223</sup> e diversi pulsanti<sup>224</sup>.

Le impostazioni di *default* (direzioni e comandi) sono state personalizzate al fine di legare gli *input* e le funzionalità del dispositivo alle attività scelte per l'esecuzione della fruizione (fig. 7.8).

Infine, per la componente *software*, si è scelto di sperimentare l'uso di *Unity 3D*<sup>225</sup>, un motore grafico multiplatforma *open source*<sup>226</sup> basato su linguaggi

<sup>222</sup> Come suggerisce la parola, permette lo spostamento nelle quattro direzioni principali: in alto/avanti, in basso/indietro, destra e sinistra.

<sup>223</sup> Sui *controller* più comuni ne sono presenti due. Un primo sostituisce le funzionalità dei tasti direzionali e, quindi, gestisce il movimento dell'utente; un secondo, invece, è legato alla visuale dello stesso e, analogamente al precedente, consente di orientarla in alto, basso, destra e sinistra.

<sup>224</sup> A seconda delle attività previste dal progetto di fruizione – e, più in generale, dal gioco eseguito –, ad ogni tasto è associata una funzione specifica che consente di accedere a contenuti specifici, di visualizzare menù, di cambiare i settaggi e le impostazioni, etc. Ne sono presenti diversi, alcuni dei quali sono collocati nella parte posteriore (R1, R2, L1, L2).

<sup>225</sup> <https://unity.com/>

<sup>226</sup> Sono previste anche delle versioni *pro*, previa sottoscrizione di un abbonamento, che presentano funzioni e strumenti aggiuntivi; ma le componenti inserite nella versione *open source* sono sufficienti per la creazione di fruizioni XR complete.

## BIM TO VR: DA AUTODESK REVIT A UNITY 3D

Diversi sono i formati file che Unity 3D importa – .dae (Collada), .3ds, .dxf, etc. –, ma quelli maggiormente utilizzati sono l'.fbx (FilmBoX) e l'.obj (Object File Wavefront 3D). A differenza dell'.fbx, l'.obj è un formato open che per essere gestito in Revit necessita l'implementazione di plugin dedicati. Mentre l'.fbx – estensione proprietaria della Autodesk – è presente di default.

Ma il risultato che quest'ultimo offre non è adeguato per la procedura metodologica e le specifiche finalità della presente ricerca. Infatti, sebbene la conversione del modello H-BIM in .fbx consenta la gestione, in ambiente Unity 3D, dei diversi oggetti che lo compongono, la mancata lettura delle texture e soprattutto del contenuto informativo inserito in fase di modellazione rende l'operazione non rispondente agli scopi. Ulteriori fasi di editing dei dati, infatti, si rendono necessarie. Nello specifico, come mostrano le ricerche analizzate (Mitchell e Murphy, 2019; Wong et al., 2020), la problematica della resa grafica degli oggetti viene risolta ricorrendo ad escamotage che prevedono la manipolazione delle texture in ulteriori software di modellazione solida prima di importare il dato in Unity 3D. Di conseguenza, il framework H-BIM VR si caratterizza con ulteriori fasi di importazione/esportazione, (continua)

di programmazione *objects oriented*<sup>227</sup> (Javascript, C# e Boo). Infatti, fondamentali in Unity 3D sono proprio i *GameObjects*, ossia elementi (oggetti tridimensionali, ambientazioni, effetti, luci, etc.) a cui attribuire i diversi *component*<sup>228</sup> che ne definiscono proprietà e azioni – o comportamenti –. Queste ultime, in particolare, possono essere testate e validate mediante il *live game preview*<sup>229</sup> che mostra in anteprima lo svolgimento del progetto di fruizione, senza necessariamente ricorrere al dispositivo di visualizzazione scelto per la sua esecuzione, mostrandosi un supporto fondamentale durante la costruzione dello stesso.

### 7.2.3 Scelta della modalità di connessione tra Revit e Unity 3D

Validata l'organizzazione tecnica e tecnologica del sistema, il primo quesito operativo che si pone nel *framework* H-BIM VR è legato alle modalità di connessione tra il modello informativo e lo spazio di lavoro destinato alla creazione della VR. È stato, quindi, necessario individuare un processo di conversione del *file Revit* che fosse rispondente agli scopi e consentisse di gestire correttamente il dato in Unity 3D.

<sup>227</sup> È un tipo di sistema che raggruppa in *classi* gli oggetti che presentano proprietà simili in modo da costruire strutture omogenee. Per ogni *classe* sono definite le azioni – o *metodi* – che possono essere eseguite sugli oggetti e con gli stessi.

<sup>228</sup> Senza i *component*, il *GameObject* è un'entità vuota e non è funzionale allo svolgimento della scena, questo perché è stato concettualmente sviluppato come un contenitore in cui inserire le diverse informazioni e attività che lo caratterizzano. Possono essere progettati e programmati a partire da un *GameObject* vuoto, individuando tra i *component* quelli idonei a rispondere alle caratteristiche prefigurate, o sfruttare gli *Asset Packages*, pacchetti completi precostruiti da utilizzare come supporto per lo sviluppo e la gestione del progetto.

<sup>229</sup> Diversamente, il pannello *scene view* rappresenta lo spazio modello dove inserire i diversi *GameObjects* costituenti il progetto. Sebbene la visualizzazione sia assimilabile – sono gli unici pannelli in Unity 3D che consentono di percepire la tridimensionalità degli oggetti inseriti –, sono due ambienti concettualmente differenti poiché il *live game preview* mostra il risultato, mentre il pannello *scene view* la struttura per ottenerlo, compresi tutti quegli elementi invisibili, ma necessari per la corretta esecuzione del progetto di fruizione.

L'analisi delle diverse soluzioni operative ha spinto a sperimentare il componente aggiuntivo *Export to Unity*<sup>230</sup> per *Revit*, che, differentemente dagli altri applicativi esistenti sottoforma di *tools* e *plugin*, consente settaggi di esportazione personalizzabili, sia per il dato geometrico che per quello informativo associato al modello. In tal modo, vengono definite le modalità di gestione in ambiente *Unity 3D* degli *smart-objects* inseriti in *Revit*, mantenendone le singole identità così come sono state modellate – *by entities* –, semplificandole in un oggetto complessivo – *one single objects* – oppure classificandole in base al materiale associatogli – *by materials* – (fig. 7.9). Il modello geometrico, quindi, viene convertito in un file *.obj* corredato dal *material library file (.mtl)*, per la corretta mappatura delle *texture* in *Unity 3D*. Per i metadati, invece, individuate le informazioni da inserire nella VR, ovvero i parametri che le definiscono, viene strutturato un *file* di testo – in formato *.cs* –, che rappresenta lo *script*<sup>231</sup> di programmazione basato sul linguaggio *C# (C sharp)* relativo ai dati estrapolati dal modello H-BIM. Ogni riga di testo corrisponderà ad uno *smart-objects* specifico del quale condivide, in particolare, un codice identificativo – fondamentale per l'associazione tra la geometria e i metadati in *Unity 3D* –. Al contempo, viene creato un secondo *file .cs*, – *MouseOver* – contenente le istruzioni che definiscono le azioni che l'applicazione VR dovrà eseguire in relazione agli *input* indotti dell'utente<sup>232</sup> (fig. 7.10).

<sup>230</sup>

<https://apps.autodesk.com/RVT/it/Detail/Index?id=3759955758891315427&appLang=en&os=Win64>

<sup>231</sup> Anche questa tipologia di dato rappresenta un *component* da associare al *GameObject*.

<sup>232</sup> In pratica, la struttura dello *script* prevede la generazione di un reticolo di puntamento innanzi alla camera di visualizzazione, che consente di individuare singolarmente i componenti del modello H-BIM e ricavare, mediante il codice identificativo associato alla geometria e riscontrabile nel *software* BIM, le informazioni associate allo *smart-objects* in fase di *modellizzazione*. Queste vengono recuperate in automatico dal *file* dei parametri e visualizzate a schermo durante l'esecuzione del progetto di fruizione. Contestualmente l'oggetto apparirà di colore blu per indicare lo stato di selezione.

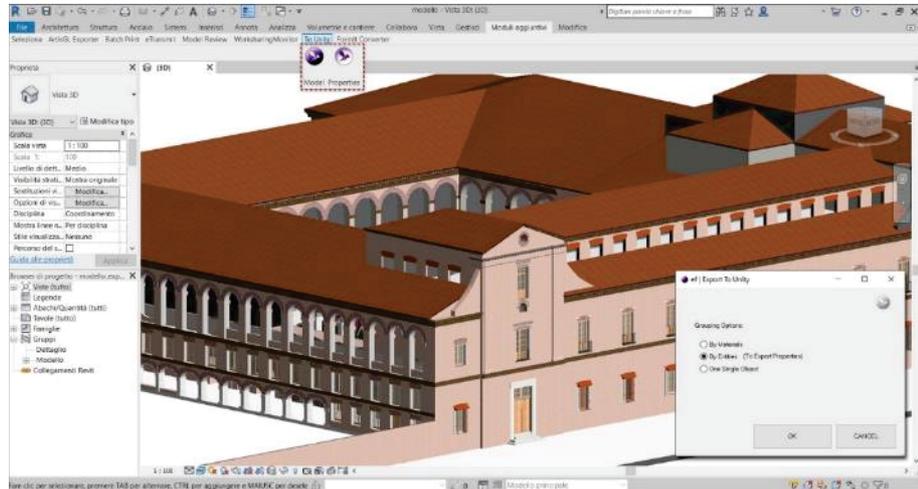
(segue)

*necessarie per giungere ai risultati attesi. Mentre per il contenuto informativo, l'associazione del database – file ODBC (Open DataBase Connectivity), Microsoft Acces o Excel – non è immediata, ma necessità della scrittura di codici di programmazione per corrispondere ai singoli oggetti le relative informazioni. La soluzione, dunque, replica il tradizionale processo operativo, differenziandosi nella sola parte di costruzione del modello tridimensionale per la quale si ricorre alla piattaforma BIM.*

*Analogamente, l'esportazione del modello BIM nel formato .obj non produce risultati molto differenti, poiché agevola, di fatto, solo la lettura delle texture in ambiente Unity 3D, mantenendo però invariata la problematica relativa alla perdita di connessione con i metadati del modello informativo. Mentre un eventuale ricorso all'IFC, tralasciando le difficoltà di definizione per gli oggetti non previsti dal protocollo, sebbene sia garanzia per la lettura del database, è ancora troppo giovane e richiede ulteriori conversioni affinché il modello H-BIM possa essere correttamente importato in Unity 3D. In pratica sono necessari appositi tool di mediazione per la sincronizzazione tra il mondo BIM e quello dei game engines (Nandavar et al., 2018).*

Fig. 7.9 – Settaggi di esportazione della geometria costituente il modello H-BIM dell'Hospital Simón Ruiz mediante il *plugin Export to Unity*.

Elaborazione M. Pulcrano



Tra i settaggi, l'esportazione *by entities* si è rivelata particolarmente interessante visti gli obiettivi della sperimentazione, poiché si è mantenuta la possibilità da un lato di manipolare i singoli elementi costituenti il modello H-BIM, dall'altro di associare i relativi metadati e visualizzarli nell'ambiente VR. Per cui, rispetto alle altre alternative prospettate, questa soluzione operativa è stata ritenuta adeguata per gli obiettivi e le finalità della ricerca.

### 7.3 Struttura dell'applicazione e definizione delle *scene* in *Unity 3D*

Il processo logico-operativo, messo in atto per la costruzione del progetto di VR dell'Hospital Simón Ruiz, ha portato alla definizione di un'applicazione *multimodale* e *multidimensionale*. La navigazione del modello H-BIM del complesso e l'interazione con i diversi *smart-objects* che lo compongono, secondo modalità alternative e del tutto diverse da quelle tradizionali, non vi è dubbio che ne rappresentano il fulcro. Ma l'integrazione dei dati provenienti dalle varie analisi condotte e la loro



Fig. 7.10 – *Script* in C# associati all'esportazione dei metadati collegati agli *smart-objects* in ambiente BIM: *file* parametri, *script* con la programmazione delle azioni (*MouseOver*) e settaggi di esportazione (individuazione dei dati e impostazione dell'unità di misura di riferimento).

Elaborazione M. Pulcrano

messa a sistema hanno permesso di conformare uno strumento di conoscenza più ampio, dove aspetti tecnici, teorici, storici, descrittivi, etc. del manufatto in oggetto si interrelazionano al fine di prefigurare strutture più complesse per la gestione e valorizzazione dello stesso e di produrre un maggiore arricchimento – percettivo e cognitivo – per l'utente che ne fruisce.

Nello specifico, sono state ipotizzate quattro *scene* che, secondo gradi incrementali di interazione e di approfondimento informativo, definiscono le modalità di esecuzione – attiva o passiva – e il grado di conoscenza ottenibile dall'esperienza di fruizione. Inoltre, esse sono relazionate alla tipologia di utente che potrebbe servirsi del sistema e al *know-how* personale. È chiaro, infatti, che le aspettative prefigurate dal fruitore saranno profondamente legate, da un lato, alle conoscenze pregresse – utente esperto o non esperto delle tematiche del settore – che indurranno ad avviare la scena a carattere prevalentemente tecnico piuttosto che divulgativo – e viceversa –, dall'altro alla predisposizione verso l'utilizzo o la sperimentazione delle nuove tecnologie. A ciò si aggiungono le differenze negli interessi e nelle esigenze, nonché l'eventuale presenza di difficoltà che impediscono la fruizione diretta del manufatto. Di conseguenza, l'impostazione complessiva della VR volge lo

sguardo al potenziale fruitore interessato alla sua esecuzione, non limitandosi ad uno specifico *target* di utenti.

Concettualmente, le *scene* sono definibili come i livelli attraverso cui si articola e si sviluppa l'applicazione, ovvero rappresentano le diverse ambientazioni che costituiscono – per questa specifica ricerca – la VR dell'Hospital Simón Ruiz. Le modalità di esecuzione variano in funzione dei contenuti inseriti, mentre il grado di interazione è dipendente dalle strutture narrative settate per la specifica *scena*. Il tutto si sviluppa secondo un preciso *range*, dove al *livello zero* corrisponde una fruizione semplificata, immersiva ma per nulla interattiva e senza la presenza di contenuti aggiuntivi oltre quelli visualizzati – visualizzazione di immagini sferiche –. Nel livello massimo – navigazione del modello H-BIM –, invece, immersione, interattività e informazione sono i concetti che ne rappresentano l'essenza. A mutare, quindi, non sono solo le attività che l'utente può compiere e le modalità di esecuzione della fruizione VR, ma anche la tipologia di oggetto con cui egli si relaziona, che spazia da rappresentazioni fotografiche, a modelli tridimensionali sottoforma di nuvole di punti e oggetti solidi.

È chiaro che, ad ogni passaggio di livello successivo – in analogia con quanto avviene nella costruzione vera e propria dei giochi e dei quadri che li costituiscono –, corrisponde un grado di complessità maggiore al precedente non solo per tipologia e quantità di contenuti presenti, ma anche per modalità di interazione con gli stessi e, più in generale, per le operazioni di programmazione vere e proprie.

Va segnalato che l'esecuzione dell'applicazione e l'avvio della fruizione è relazionato ad una *scena* iniziale, che costituisce di fatto il *menu* principale e permette di comprendere la costruzione dell'*App* e degli elementi che la compongono, ma, soprattutto, funge da interrelazione tra gli stessi. In tal modo, ampia libertà viene data al fruitore nell'individuare la scena in cui inserirsi e, al contempo, cambiarla in modo dinamico laddove i suoi interessi siano traslati verso la sperimentazione di un'altra ambientazione.

	<i>tipologia di conoscenza</i>	<i>tipologia di contenuto</i>	<i>tipologia di navigazione</i>	<i>grado di interazione</i>	<i>hotspot informativo</i>
<i>Scena 360°</i>	<i>base</i>	<i>2D</i>	<i>vincolata</i>	<i>basso</i>	<i>NO</i>
<i>Scena Point Cloud</i>	<i>intermedia</i>	<i>3D</i>	<i>libera</i>	<i>medio</i>	<i>NO</i>
<i>Scena Modello</i>	<i>intermedia</i>	<i>3D</i>	<i>libera</i>	<i>alto</i>	<i>SI</i>
<i>Scena H-BIM</i>	<i>alta</i> <i>(tecnico-scientifica)</i>	<i>3D</i>	<i>libera</i>	<i>alto</i>	<i>SI</i>

Fig. 7.11 – Sintesi comparativa delle caratteristiche delle quattro *scene* ipotizzate per l'App VR.

Elaborazione M. Pulcrano

In definitiva, quindi, l'App VR dell'Hotel Simón Ruiz è stata strutturata con cinque livelli (fig. 7.11) – di cui si dirà dettagliatamente in seguito – costituenti (i) il menu iniziale dove una breve descrizione introduce le diverse ambientazioni, (ii) la visualizzazione stereoscopica di immagini sferiche (*Scena 360°*), (iii) la navigazione della nuvola di punti (*Scena Point Cloud*), (iv) la navigazione del modello geometrico con l'aggiunta di informazioni mediante *hotspot* dedicati (*Scena Modello*) e (v) la navigazione del modello H-BIM con l'acquisizione delle informazioni relative ai singoli *smart-objects*, oltre che l'implementazione mediante *hotspot* informativi (*Scena H-BIM*). Per ogni *scena*, si è scelto di circoscrivere l'attività di programmazione ad una specifica area del complesso al fine di dedicare la giusta attenzione nell'ottenere i risultati attesi e nella validazione del processo operativo. Ciononostante, laddove se ne palesi la necessità, la metodologia applicata potrà essere riproposta per un'area più estesa, fino a comprendere l'intero complesso.

### 7.3.1 Menu iniziale

Il *menu* rappresenta (fig. 7.12) la *scena* iniziale che l'utente visualizza all'avvio dell'App ed è stato pensato come elemento di supporto per guidarlo e orientarlo nella scelta delle ambientazioni da sperimentare. I

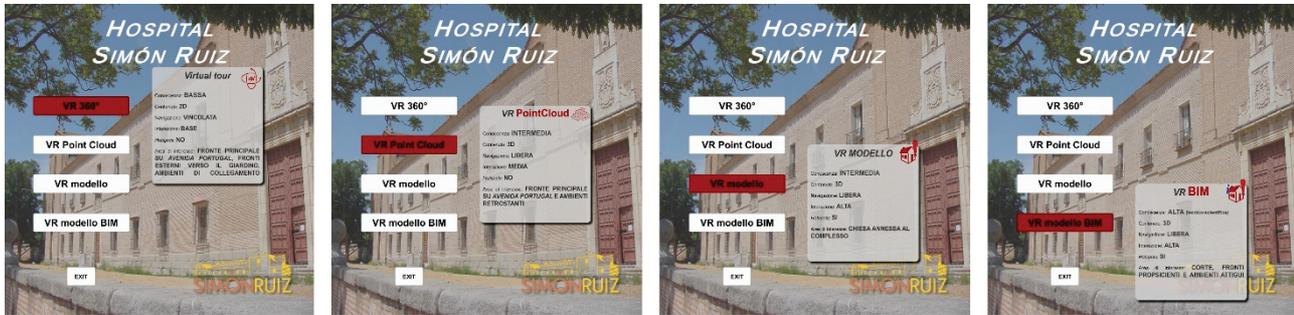


Fig. 7.12 – Selezione dei tasti del *Menu iniziale* e visualizzazione delle descrizioni grafiche e testuali associate ai diversi *UI Button*.

Elaborazione M. Pulcrano

componenti che lo costituiscono sono *GameObjects* legati alla *User Interface*<sup>233</sup> e rendono la *scena* completamente diversa dalle altre inserite nell'*App*, poiché caratterizzata esclusivamente da elementi di tipo bidimensionale (testi, immagini e pulsanti).

La progettazione e programmazione del *menu* sebbene a prima vista appaia un'operazione semplice e scontata, nella pratica applicativa va condotta con attenzione per non generare confusione nell'utente che lo visualizza e per consentire la corretta connessione tra le diverse *scene* inserite.

Nella sua costruzione, il *menu* dell'*App* dell'Hospital Simón Ruiz è stato suddiviso in elementi principali e secondari: i primi gestiscono l'attività prettamente funzionale dell'esecuzione della *scena* e sono rappresentati dagli *UI Button*<sup>234</sup> e dagli *script* di programmazione, mentre i secondi sono di corredo e definiscono la veste grafica della stessa (immagini e testo).

<sup>233</sup> Come si vedrà nel paragrafo A3, le *User Interface* rappresentano tutti quegli elementi che consentono di interagire con il sistema, semplificando la comunicazione e il rapporto uomo-macchina. Nell'ambiente specifico di *Unity 3D*, essi rappresentano sia il modo di gestire gli *input* dell'utente che gli *output* forniti in risposta, mediante gli elementi grafici bidimensionali di cui si compone. Questi per poter essere inseriti e visualizzati nella *scena* necessitano di una struttura di supporto – *canvas* –, che, di fatto, rappresenta il contenitore a cui saranno collegate le diverse *UI*, e dell'*Event System*, un *GameObject* specifico il cui ruolo è gestire in automatico tutti gli *input*.

<sup>234</sup> Rappresenta un pulsante *standard* da utilizzare per attivare un determinato evento – generalmente è utilizzato per avviare o confermare un'azione – in seguito al *click* dell'utente. Infatti, il *metodo* associatagli è l'*OnClick ()* personalizzabile con funzioni specifiche nel pannello *inspector*.

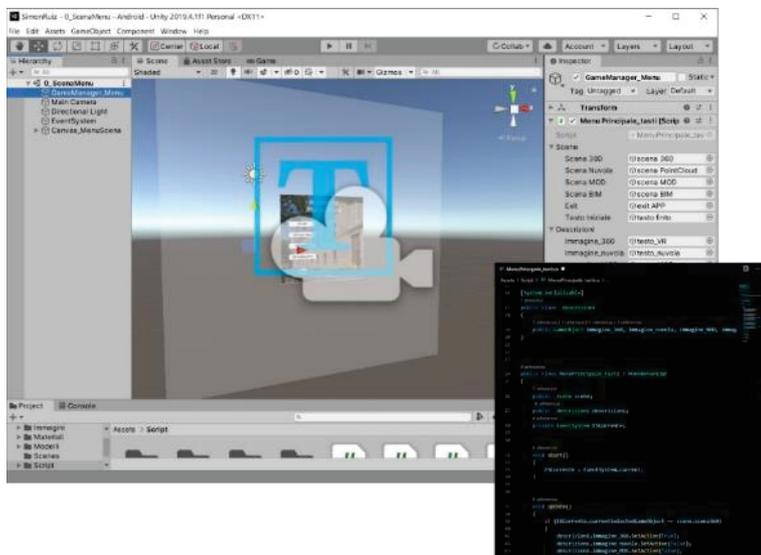


Fig. 7.13 – Associazione dello *script* per l'esecuzione delle funzioni della *Scena Menu* (caricamento delle diverse *scene* o uscita dall'*App*) al *GameManager*.

Elaborazione M. Pulcrano

Preliminare è stata la creazione di un *GameManager*<sup>235</sup>, ovvero un *GameObjects* vuoto utilizzato come contenitore a cui associare i diversi *components* destinati allo svolgimento della *scena*. In particolare, ad esso è stato collegato il codice in *C#* che consente di selezionare la *scena* da fruire e iniziare il percorso di visita (fig. 7.13). In pratica, in base agli *input* dell'utente, mediante il movimento dello *stick* analogico sinistro del *controller*, esso attiva/disattiva la selezione dei singoli *UI Button* inseriti e, contestualmente, permette la visualizzazione della descrizione associatagli. Questa rappresenta una sintesi testuale e con simboli grafici di ciò che l'utente fruirà, sia in termini di contenuto (con l'indicazione dell'eventuale presenza di *hotspot* informativi) che di tipologia dello stesso (immagini fotografiche, nuvola di punti e modello tridimensionale). La conferma

<sup>235</sup> Concettualmente, nella logica di sviluppo di applicazioni con *Unity 3D*, esso rappresenta l'entità in cui vengono collocate le informazioni, le azioni e gli elementi cardine dell'*App*, rappresentando di fatto il cuore della stessa. Ad esso, quindi, vengono associati diversi *component* utili alla gestione complessiva di tutto il progetto nel *software* di *game engine*.

della selezione dello specifico *UI Button* – premendo il tasto di selezione *A* del *controller* – darà avvio alla *scena* correlata. La sequenza di azioni è stata imposta definendo nello *script* alcuni elementi fondamentali come i *namespaces* e le *classi* di riferimento, le *variabili*, i *metodi* e le azioni specifiche da eseguire<sup>236</sup>.

Nella programmazione delle azioni è stata anche individuata la modalità di navigazione dei tasti del *menu*, ovvero come eseguire l'accesso ai diversi *UI Button*, affinché non si generasse confusione nel passare da uno all'altro. Questa operazione è stata eseguita esplicitando, nelle proprietà dei singoli *UI Button* – visualizzate nel pannello *inspector* –, la sequenza di selezione *On Up*, *On Down*, *On Left* e *On Right*<sup>237</sup> (fig. 7.14).

Corredano il *menu* l'inserimento dell'immagine di fondo, il logo del complesso e tutti quegli elementi che non sono necessari alla corretta esecuzione dello stesso, ma che concorrono a completare la grafica della *scena*, che, infine, sarà *renderizzata* mediante la camera di visualizzazione inserita al suo interno.

---

<sup>236</sup> I primi – *namespaces* – sono dei raggruppamenti di *classi* a cui si fa riferimento nella definizione dello *script* e nell'esecuzione delle diverse funzioni. Alcuni sono presenti di *default* all'interno dei codici associati a *Unity 3D* (*System.Collections*, *System.Collections.Generic* e *UnityEngine*), altri devono essere inseriti manualmente per poter essere utilizzati. Nel caso specifico del *menu*, sono stati richiamati il *namespace* per le *UI* e l'*Event System* (*UnityEngine.UI* e *UnityEngine.EventSystems*), e quello relativo alla gestione del cambio *scena* (*UnityEngine.SceneManagement*).

Le *classi*, come già detto, sono dei gruppi di oggetti con proprietà simili, le cui caratteristiche sono definite attraverso le *variabili* (numero intero, valore booleano, stringa e numeri con decimali), che assumono valori differenti in funzione delle specificità di ciascun oggetto e ne influenzano i comportamenti – o *metodi* –. Questi ultimi sono descritti nello *script* come un blocco di codice che esegue delle azioni specifiche. Nello *script* del *menu* le *variabili* sono rappresentate dagli *UI Button* e dagli elementi descrittivi della *scena*, mentre i *metodi* sono le funzioni necessarie per attivarli/disattivarli e caricare la *scena* associata mediante l'azione *SceneManager.LoadScene()*.

<sup>237</sup> La sequenza di navigazione è visualizzabile anche graficamente nel pannello *scene view* con delle frecce gialle che, collegando i diversi *UI Button*, e ne indicano il verso.

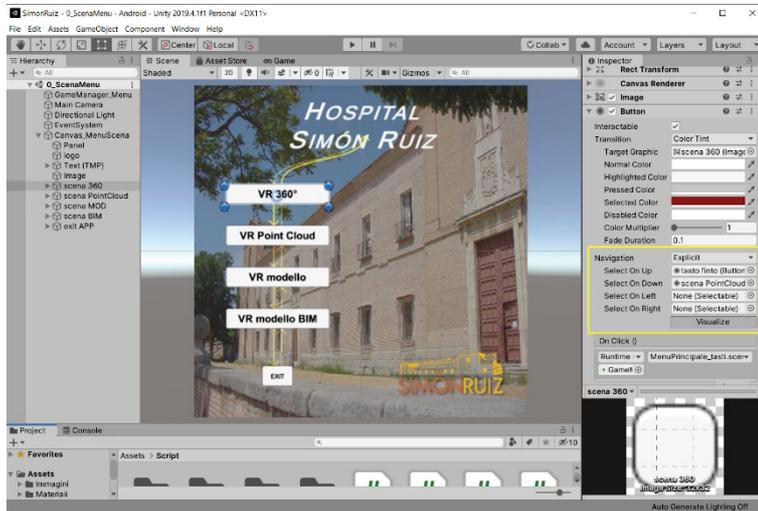


Fig. 7.14 – *Menu iniziale* dell'App dell'Hotel Simón Ruiz con la messa in evidenza nelle modalità di navigazione tra i diversi UI *Button*. Visualizzazione grafica sulla *canvas* nel pannello *scene view* e associazione della sequenza di selezione nel pannello *inspector* (riquadro giallo).

Elaborazione M. Pulcrano

La procedura eseguita per la strutturazione del *menu* iniziale è stata in parte replicata nei *menu* contestuali delle diverse *scene* dell'App. Questi, però, si discostano per le finalità per le quali sono stati progettati e per i *GameObjects* che li caratterizzano. Il primo aspetto è dipendente dalla possibilità di variare alcuni dei settaggi di visualizzazione, come l'altezza del punto di vista – adeguando in tal modo la fruizione al *target* di utenti che la utilizza – o procede con l'attivazione/disattivazione di determinati contenuti aggiuntivi. Il secondo, invece, è strettamente legato alla conformazione dello stesso e investe aspetti inerenti la tipologia di pulsante inseriti (*Button*, *Toggle* o *Slider*)<sup>238</sup> e la definizione della sequenza di navigazione degli stessi. Pur differenziandosi per essere specifici delle *scene* a cui sono correlati, i *menu* contestuali permettono tutti di tornare a quella iniziale per, eventualmente, cambiare la *scena* che si sta fruendo o uscire dall'App.

<sup>238</sup> I primi – *Button* –, come precedentemente visto, sono pulsanti standard a cui è associato il metodo *On Click ()*. I secondi – *Toggle* – sono pulsanti di tipo *on/off* e, infatti, richiamano un *metodo* che prevede un booleano come risultato – *On Value Changed ()* –. Infine, i terzi – *Slider* – è un cursore con un *range* predefinito di valori in cui può variare e il *metodo* è rappresentato dalla funzione *On Value Changed (Single)*.

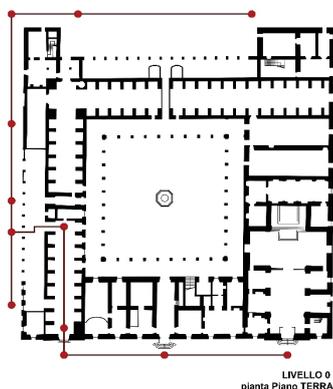


Fig. 7.15 – Schematizzazione del percorso di fruizione individuato per la *Scena 360°* dell’*App*, con indicazione dei diversi punti di vista – 12 totali – in cui l’utente potrà osservare i fronti esterni del complesso.

Elaborazione M. Pulcrano

Infine, diversamente dal *menu* iniziale che viene visualizzato con l’avvio dell’*App*, quelli contestuali vanno attivati da *controller* attraverso lo specifico tasto *B* di selezione.

### 7.3.2 *Scena 360°*

Come anticipato nell’introduzione al paragrafo, la *Scena 360°* rappresenta il *livello zero* dell’*App*, dove l’utente è immerso in una fruizione che, di fatto, limita l’interattività alla struttura e alle modalità di esecuzione della stessa. Analogamente, anche la conoscenza che ne deriva è legata esclusivamente a ciò che viene visualizzato. Nella riproposizione digitale del manufatto che caratterizza la *scena*, modelli solidi e nuvole di punti sono stati sostituiti con immagini fotografiche che descrivono l’Hospital Simón Ruiz in un determinato momento – rappresentativo dell’istante in cui è avvenuta la ripresa – e lo mostrano nella sua consistenza reale, contrassegnata dai segni del tempo e senza filtri che ne alterino la percezione.

La fruizione è stata, quindi, affidata alla visualizzazione stereoscopica di sequenze di immagini sferiche in proiezione equirettangolare – come nei tradizionali *virtual tour 360°* –, che consentono di percepire la tridimensionalità dell’oggetto pur essendo, nella realtà, collocati in una rappresentazione bidimensionale. Le procedure per ottenere questo tipo di dato, come è ben noto, sono molteplici e investono aspetti legati al tipo di camera – mono e/o multi-obiettivo –, agli strumenti di supporto utilizzati, alle modalità di acquisizione ed elaborazione del dato, etc. E nell’approccio alla metodologia da replicare vanno valutati i diversi fattori che possono incidere negativamente sui risultati ottenibili per la qualità dell’immagine risultante, intesa sia come risoluzione che come dato finale ottenuto dall’assemblaggio dei diversi *frame* nei *software* di *stitching*.

Nel caso specifico dell’Hospital Simón Ruiz, però, le acquisizioni *range-based* delle due campagne di rilievo effettuate (Cfr. par. 5.1) hanno permesso di ottenere non solo le nuvole di punti del complesso, ma anche immagini sferiche relative alle diverse *scan position*. Sebbene la qualità

grafica che mostrano risulti carente in alcuni punti<sup>239</sup>, riflessioni inerenti le finalità della specifica *scena*, ipotizzata come un primo approccio all'*App* e non come fulcro della stessa, hanno reso tale prodotto rispondente alla costruzione del *virtual tour*. È stato quindi deciso di avvalersi delle immagini estrapolate dal rilievo *range-based*, esportandole dal *software Faro SCENE*. Nella progettazione della *Scena 360°*, l'area di sperimentazione è stata limitata ai soli fronti esterni del complesso e, in particolare, è stato scelto di rendere fruibili il fronte principale su *Avenida Portugal* e i fronti interni che guardano al giardino – Sud-Ovest e Nord-Ovest –. Ma, nell'esperienza di fruizione, al fine di ottenere un percorso continuo (fig. 7.15) che dal fronte esterno conduca alla scoperta di quelli interni, nell'estrapolazione delle immagini sferiche sono state incluse anche quelle rappresentative di ambienti di collegamento, per un totale di 12 immagini.

Le dimensioni che queste presentano variano in funzione delle impostazioni settate in fase di acquisizione, ma è stato osservato che la proporzione che sussiste tra la larghezza e l'altezza, non rispetta il rapporto 2:1 necessario per la corretta visualizzazione dell'immagine. Infatti, inserendole in un apposito visualizzatore, esse appaiono come *pizzicate* nella parte inferiore ed eccessivamente deformate. Ciò dipende dal campo di acquisizione dello strumento utilizzato durante i rilievi *range-based*, che limita a 300° la porzione di ripresa sul piano verticale; in tal modo, viene escluso il treppiedi di supporto e, di conseguenza, rese proporzionalmente incomplete le immagini sferiche. Per rimuovere il difetto e ottenere delle rappresentazioni corrette, sono state eseguite operazioni di *editing* nel *software Pano2VR*<sup>240</sup>(fig. 7.16). In pratica, nella parte inferiore, è stata applicata un'ulteriore fascia recante il logo rappresentativo dell'Hospital Simón Ruiz per completare le dimensioni delle immagini equirettangolari in relazione alla proporzione 2:1 (fig. 7.17).

---

<sup>239</sup> Ciò ovviamente dipende sia dalla risoluzione della camera integrata alla strumentazione utilizzata che alle condizioni di illuminazione presenti in sito.

<sup>240</sup> <https://ggnome.com/pano2vr/>

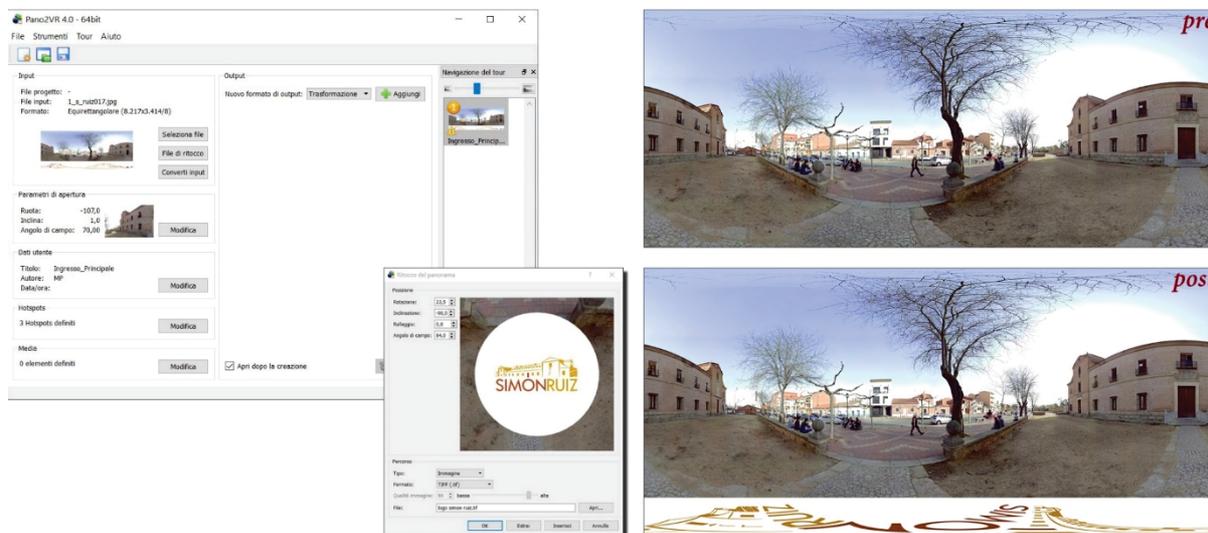


Fig. 7.16 – *Editing* delle foto sferiche in proiezione equirettangolare nel software *Pano2VR*: immagine *pre* e *post* elaborazione.

Elaborazione M. Pulcrano

Appurato che la modifica effettuata abbia prodotto i risultati attesi, la fase successiva della sperimentazione ha visto la strutturazione della *scena* in *Unity 3D*. In generale, affinché l'utente visualizzi correttamente l'ambiente rappresentato dall'immagine sferica, senza aberrazioni né deformazioni, è necessario che sia virtualmente collocato nel suo centro. Di conseguenza, nella progettazione del *virtual tour* devono essere create condizioni analoghe per la camera virtuale che simula la vista dell'osservatore. Dunque, importate le immagini sferiche editate nell'*Asset*<sup>241</sup> di *Unity 3D*, la sequenza operativa del processo ha previsto come prima fase la creazione di un *GameObject* sfera, nel cui centro è stata allocata la camera di visualizzazione, e l'applicazione del materiale che lo caratterizza, rappresentativo dell'immagine elaborata in *Pano2VR*. A tal fine, è stato

<sup>241</sup> È la cartella principale che tiene traccia di tutte le risorse inserite in progetto di *Unity 3D* dagli elementi solidi del modello, alle *texture* associate agli stessi e agli *script* di programmazione necessari per definire le operazioni da eseguire.

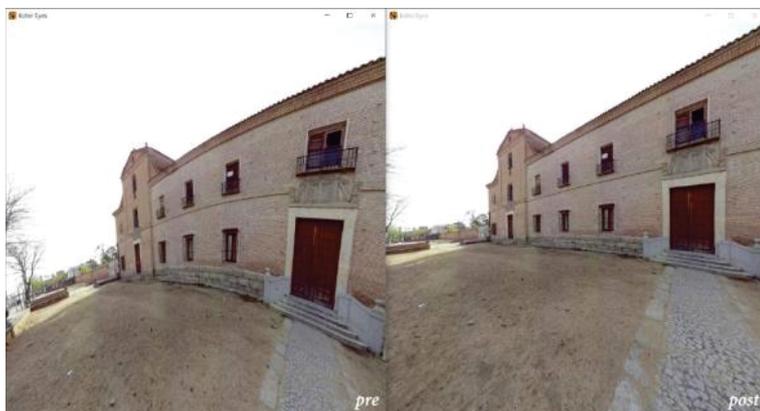


Fig. 7.17 – Immagini sferiche *pre* e *post* elaborazione inserite nel visualizzatore *Kolor Eyes* (<http://kolor-eyes.findmysoft.com/>).

Elaborazione M. Pulcrano

necessario specificare l'immagine importata come *texture* cubica<sup>242</sup> e impostare il materiale a cui viene associata come *shader*<sup>243</sup> di tipo *skybox cubemap* (fig. 7.18). Questi settaggi sono stati indispensabili per visualizzare l'immagine sferica correttamente applicata al *GameObject* sfera.

La predisposizione dei diversi oggetti – 12 in totale, corrispondenti al numero di immagini scelte – e la loro collocazione nello spazio modello del pannello *scene view*, però, non è stata sufficiente a rendere navigabile la *Scena 360°*, poiché la visualizzazione resta legata ad una specifica camera e, quindi, ad uno specifico punto di vista – o *scan position* –. La definizione

---

<sup>242</sup> Ovvero è necessario specificare che l'immagine non è una rappresentazione piana, descritta dalle componenti di posizione *uv*, bensì una insieme di sei *texture* quadrate piane che assemblate formano un cubo le cui facce sono rappresentative delle viste nelle sei direzioni – sono infatti descritte dalle componenti di direzione *uvw* –. Settando questa impostazione, *Unity 3D* rileva in automatico il *layout* della *cube map* individuando le *texture* da associare alle direzioni *up*, *down*, *left*, *right*, *forward* and *back*.

<sup>243</sup> È un modello matematico che gestisce l'attività computazionale della scheda grafica del processore utilizzato per l'elaborazione ed esecuzione del progetto. In pratica, regola le impostazioni di un materiale e stabilisce come deve essere visualizzato (lucido, opaco, trasparente, etc.), come deve reagire in relazione alle luci presenti nella *scena* (riflettente, opaco, etc.), etc. Nel caso specifico del *virtual tour* dell'Hospital Simón Ruiz, per la conformazione delle componenti che lo caratterizzano, lo *shader* deve essere del tipo *skybox* perché deve avvolgere l'intera scena – in questo caso coincidente con il volume del *GameObject* sfera – come un involucro.



Fig. 7.18 – *GameObject* sfera in *Unity 3D* e associazione del *component* che definisce il materiale come *shader* di tipo *skybox cubemap*.

Elaborazione M. Pulcrano

delle modalità con cui cambiare punto di vista e, quindi, passare da una camera/sfera all'altra, ha caratterizzato la seconda fase di costruzione della *scena* rappresentando, di fatto, il cuore dello sviluppo della stessa.

Nello specifico, alcuni *script* sono stati programmati affinché le azioni eseguibili mediante *UI Button*, fossero rappresentative dei processi di attivazione/disattivazione<sup>244</sup> delle camere relative alle *scan position* scelte per definire il percorso di visita. Ad ognuna di esse, quindi, sono stati associati tre tasti che consentono di spostarsi e navigare tra le varie *scan position*, andando a quella immediatamente precedente/successiva o alla posizione *home* che definisce l'inizio del percorso – individuato nella parte centrale del fronte su *Avenida Portugal*<sup>245</sup>. Gli *UI Button* sono visualizzati mediante simboli grafici (freccette e cerchi) posti nella parte inferiore centrale dell'inquadratura e sono relazionati sia ad oggetti tridimensionali – forme coniche attivabili dal *menu* contestuale specifico per la *Scena 360°* –, sia al riferimento nel navigatore (posto in alto a sinistra, ma visualizzabile a tutto schermo con il tasto di selezione *X* del *controller*) che cambia dinamicamente in base alla posizione visualizzata (fig. 7.19). In tal modo, il fruitore può sempre orientarsi durante l'esecuzione della fruizione. Completano la *scena* gli effetti di dissolvenza inseriti per mitigare il passaggio di visualizzazione da un'immagine all'altra.

### 7.3.3 *Scena Point Cloud*

La *Scena Point Cloud* si presenta simile alla precedente per quanto concerne i contenuti visualizzati, ma se ne discosta nettamente per la tipologia degli stessi e per le modalità di fruizione. Questa, infatti, è affidata alla sola visualizzazione della nuvola di punti ottenuta dai rilievi *reality-based* e, di

<sup>244</sup> Le specifiche azioni sono state eseguite richiamando nel metodo *On Click ()* associato all'*UI Button* le funzioni *SetActive(true)* e *SetActive(false)* per attivare/disattivare gli oggetti ad esso associati, compresa la relativa camera di visualizzazione.

<sup>245</sup> Nelle posizioni limite, è chiaro che le possibilità di navigazione sono solo due, ovvero il ritorno alla posizione immediatamente precedente e alla posizione *home*.

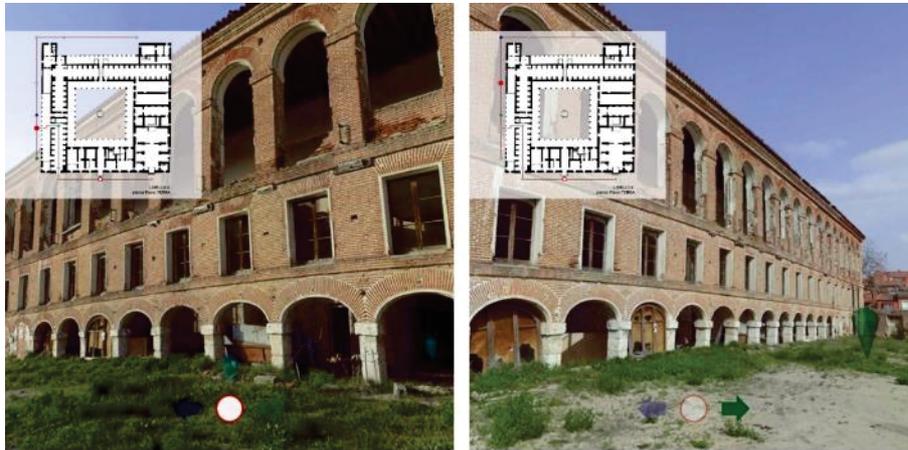


Fig. 7.19 – Visualizzazione in modalità *live game preview* di due camere – o punti di vista – rappresentativi di due *scan position* del fronte Sud-Ovest prospiciente il giardino.

Elaborazione M. Pulcrano

conseguenza, non implementa alcun contenuto informativo rispetto alla *Scena 360°*. Differentemente da essa, però, la connota con un certo grado di interattività poiché l'utente è reso libero di navigare all'interno dell'ambiente digitale senza essere vincolato a determinati punti di vista. Inoltre, la percezione della tridimensionalità del manufatto virtualizzato e della spazialità dell'ambientazione fruita avviene in una forma del tutto diversa dall'esperienza precedente.

Emergono chiari, quindi, gli aspetti che hanno riguardato la strutturazione di questa specifica *scena*, per la quale, dapprima, è stato necessario individuare le modalità di importazione del modello puntiforme in ambiente *Unity 3D* e poi, in una seconda fase, definire il movimento dell'utente al suo interno.

Per quanto concerne il primo, *Unity 3D* non supporta ancora la gestione delle nuvole di punti<sup>246</sup>, mentre i modelli poligonali generati a partire da esse sono assimilati a quelli solidi derivanti da modellazioni di tipo tradizionale. Per cui, al fine di procedere con la sperimentazione, sono stati eseguiti processi di *meshing* per ottenere superfici continue da importare

---

<sup>246</sup> A tal proposito, va precisato che *Unreal Engine*, con la *release* 4.25 (maggio 2020), ha implementato l'importazione di nuvole di punti LIDAR attraverso il *plugin LiDAR Point Clouds*.

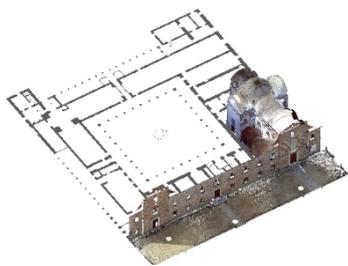


Fig. 7.20 – Aree dell’Hospital Simón Ruiz fruibili nella *Scena Point Cloud* dell’*App* VR.

Elaborazione M. Pulcrano

nel *game engine*. Il *software* scelto per gestire l’*editing* della nuvola di punti è stato *RealityCapture* e le operazioni condotte hanno visto il susseguirsi di diverse fasi operative.

Le porzioni dell’Hospital Simón Ruiz individuate per definire la *Scena Point Cloud* sono costituite dal fronte principale su *Avenida Portugal* e dagli ambienti della Chiesa (fig. 7.20); di conseguenza, i relativi gruppi in *.rpf* sono stati convertiti nel formato *.e57* per proseguire nell’applicativo scelto<sup>247</sup>. I settaggi utilizzati per la computazione delle varie fasi del processo sono stati analoghi a quelli impostati per l’elaborazione videogrammetrica vista nel capitolo quinto (Cfr. par. 5.2 e par. 5.3). Ma particolare attenzione è stata data alla *texturizzazione* del modello reiterando l’operazione di proiezione delle immagini sui diversi poligoni un numero di volte maggiore rispetto alle impostazioni previste di *default*. Ciò ha permesso di ottenere un risultato fortemente mimetico nella resa fotorealistica.

L’accuratezza morfologica, che, al contempo, connota le parti e gli elementi del modello *mesh*, è chiaramente relazionata al numero di poligoni – 17.881.113 in totale – generati sulla base della nuvola di punti *densa*. Aspetto rilevante nella corretta lettura geometrica del manufatto digitalizzato, che però ha imposto riflessioni circa la sua importazione in ambiente VR. Infatti, al fine di ottenere un dato gestibile dall’*hardware* grafico destinato al processamento e all’esecuzione dell’*App*, è stato scelto di attuare processi di semplificazione del modello, riducendo al 10% la quantità di superfici triangolari, ma garantendo, comunque, l’elevata rispondenza visiva (fig. 7.21). Infine, un’ultima fase di esportazione nel formato *.fbx* è stata necessaria per convertire il rilievo *reality-based* in un *file*<sup>248</sup> compatibile, importabile e manipolabile in ambiente *Unity 3D*.

<sup>247</sup> L’importazione nel *software RealityCapture*, in realtà, ne prevede una seconda nel formato interno *.lsp*, al fine di rendere il dato di partenza più leggero e gestibile in fase di computazione.

<sup>248</sup> Va precisato che tale *fase del framework* operativo correda il dato geometrico – formato *.fbx* – con la mappa delle *texture* in coordinate *uv* – formato *.png* –, costituita da diversi *file*,



Conclusa la prima parte relativa al tipo di dato da fruire, la sperimentazione è proseguita con la programmazione delle attività dell'utente in relazione ai movimenti consentiti e, quindi, alla possibilità di camminare all'interno della *scena*. Analogamente alla *Scena 360°* – dove alla camera virtuale corrisponde la vista dell'utente –, è stato necessario creare in ambiente *Unity 3D* un *GameObject* che ne emulasse il comportamento e rispondesse agli *input* indotti attraverso il *controller* nell'ambiente reale. A tal fine, è stato costruito un *player* associando ad un *GameObject* vuoto una camera per la visualizzazione, un *collider*, un *rigidbody* e uno *script* di programmazione in *C#* (fig. 7.22). Il *collider* e il *rigidbody* ne definiscono le proprietà fisiche e le modalità di risposta in relazione alle azioni che vengono prodotte nell'ambiente virtuale, come le collisioni con altri *GameObjects* o l'influenza della forza di gravità. Con lo *script*, invece, sono stati corrisposti gli *input* dello *stick* analogico sinistro del *controller* alla navigazione del *player* nelle direzioni destra/sinistra e avanti/indietro. Il tutto è stato gestito impostando le diverse azioni eseguibili nel *metodo Update ()* che consente di

---

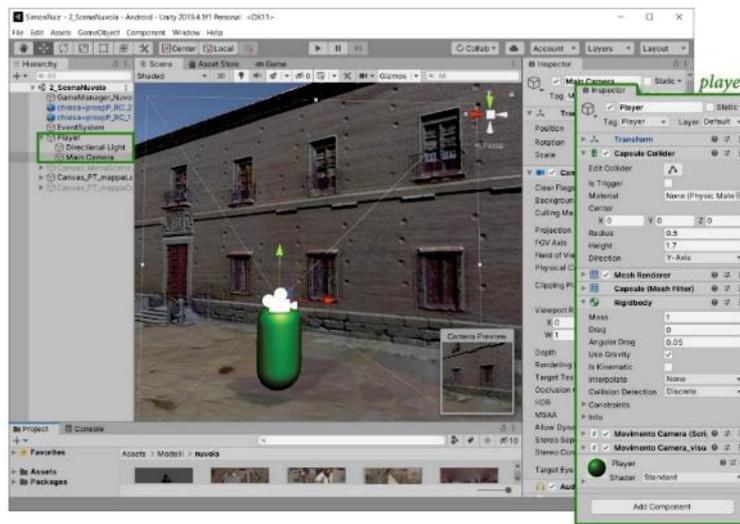
rappresentativi della reiterazione dell'operazione di proiezione immagini in *RealityCapture*. Importati in *Unity 3D*, questi saranno fusi in automatico per riassociare correttamente l'informazione di colore ai vari poligoni costituenti il modello *mesh*.

Fig. 7.21 – Costruzione del modello poligonale a partire dalla nuvola di punti *range-based*. Risultati dei processi di *meshing*, *texturizzazione* e semplificazione eseguiti nel software *RealityCapture*: visualizzazione del modello originario (immagine sinistra) e del modello decimato (immagine destra).

Elaborazione M. Pulcrano

Fig. 7.22 – Costruzione del *player* con i diversi *component* associati visualizzabili dal pannello *inspector*.

Elaborazione M. Pulcrano

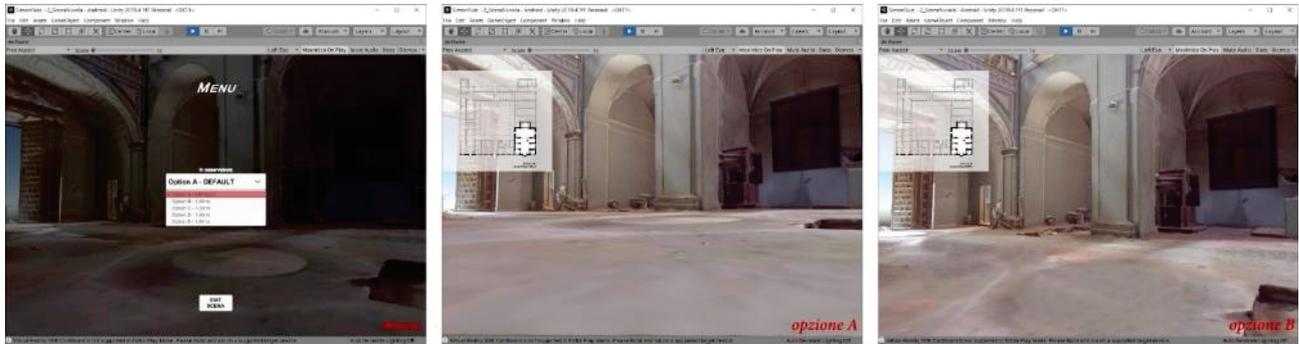


determinare, in ogni istante di esecuzione della fruizione – ripetizione ciclica di verifiche e operazioni (*game loop*) –, se l'utente utilizza lo *stick* analogico e se la direzione premuta è del tipo assiale o trasversale<sup>249</sup>. Allo specifico *input* è relazionata la risposta del sistema, rappresentata dallo spostamento del *player* in una nuova posizione – azione che sarà funzione sia della velocità impostata<sup>250</sup> che del *Time.deltaTime*<sup>251</sup> –.

<sup>249</sup> Nello specifico, la funzione condizionale *if ()* è stata utilizzata insieme alla funzione *Input.GetAxis()* per consentire al sistema di decifrare gli *input* del *controller*.

<sup>250</sup> È pensata come una variabile *float* (numero con decimali) il cui valore necessita di essere definito prima di avviare l'esecuzione della *scena*.

<sup>251</sup> Nell'approccio a sistemi di VR un aspetto rilevante sono le implicazioni derivanti dal *frame rate* (Cfr. par. A.2) che influiscono sulla velocità di *renderizzazione* della stessa. Poiché il *frame rate* è variabile, non è quindi noto a priori ed è dipendente dalle caratteristiche computazionali del sistema utilizzato per eseguire la fruizione, è sovente l'insorgere di inconvenienti legati soprattutto al movimento degli oggetti presenti nella VR. Di conseguenza, per limitare le problematiche derivanti dal *frame rate*, viene introdotto – nel caso specifico di *Unity 3D* – il *Time.deltaTime* che vincola le diverse azioni eseguibili nella VR al tempo a loro destinate e non al *frame rate*, così se dovessero manifestarsi dei rallentamenti di *renderizzazione* dovuti al quest'ultimo, l'esecuzione dell'azione non ne risulta influenzata.



Mentre le informazioni inerenti la visuale della camera, orientabile nelle direzioni destra/sinistra e in alto/in basso sono determinate in base alla sensoristica presente nel *device* utilizzato per eseguire l'*App*<sup>252</sup>.

La programmazione delle componenti del *player*, inoltre, investe anche gli aspetti legati alla possibilità di modificarne l'altezza della visuale agendo sui valori della coordinata  $z$ . Tale scelta operativa è stata gestita attraverso la creazione di uno *script* specifico, ma non direttamente collegato al *player*, bensì ad un *UI Dropdown*<sup>253</sup> accessibile dal *menu* contestuale. Qui, infatti, è possibile settare l'altezza della camera virtuale individuando tra i valori predefiniti – ipotizzati come valori medi di riferimento per un bambino, un adolescente e un adulto – quello rispondente all'altezza dell'utente che sta fruendo dell'esperienza VR. Effettuata la scelta, quindi, il sistema

Fig. 7.23 – Visualizzazione mediante il pannello *live game preview* del *menu* di *scena* e delle impostazioni relative all'altezza visuale del *player*.

Elaborazione M. Pulcrano

<sup>252</sup> Va precisato, però, che durante la fase di *testing* dell'*App* si è reso necessario implementare anche la gestione della direzione visuale attraverso *input* dati col *controller*, al fine di validare le operazioni di programmazione su *computer*. Ciò, se da un lato ha imposto la scrittura di righe di codice aggiuntive e il settaggio dello *stick* analogico destro, dall'altro ha, implicitamente, reso disponibile l'*App* alla fruizione anche per sistemi VR *desktop*.

<sup>253</sup> È un *menu* a discesa *standard* con un elenco di opzioni tra le quali è possibile scegliere; per la sua conformazione si è rivelato lo strumento adatto a impostare i settaggi relativi all'altezza della camera visuale. Per programmare correttamente il suo funzionamento sono stati specificati nel pannello *inspector* le diverse opzioni possibili e la funzione – appartenente al *metodo On Value Changed (Int32)* – da attivare in seguito alla scelta.

induce una traslazione del *player* portandolo alla coordinata  $z$  relativa ad essa (fig. 7.23).

### 7.3.4 *Scena Modello*

Un primo grado di complessità nella progettazione dell'*App* VR dell'*Hospital Simón Ruiz* è stato rilevato nella strutturazione della *Scena Modello*, i cui elementi costituenti sono il modello H-BIM – nella sola componente geometrica – e diversi *hotspots*. La scelta di limitare la tipologia di dati desumibili dal modello informativo è dipesa dalla volontà di impostare una *scena* a carattere prettamente divulgativo e non tecnico-scientifico; infatti anche i contenuti implementati in essa si muovono in tale direzione. Muta quindi – rispetto alla *Scena 360°* e alla *Scena Point Cloud* – ciò che viene fruito dall'utente, sia per la tipologia, che la quantità di informazioni ottenibili. Mentre restano invariate le modalità di navigazione dell'ambiente virtuale, che al pari della *Scena Point Cloud* ha previsto l'adozione del *player* con i diversi *component* ad asso associati, e l'accesso al *menu* contestuale. Quest'ultimo, oltre alla personalizzazione dell'altezza della camera visuale, prevede la possibilità di attivare/disattivare gli elementi decorativi delle strutture voltate che nel modello H-BIM sono stati inseriti come porzioni di nuvola di punti nelle *famiglie caricabili* (fig. 7.24).

Fig. 7.24 – Attivazione e disattivazione delle componenti decorative delle strutture voltate attraverso il *menu* contestuale della *Scena Modello*.

Elaborazione M. Pulcrano



Altra differenza che sussiste tra le *scene*, risiede nel percorso che l'utente può seguire. Nelle prime due, infatti, sebbene le aree individuate corrispondano a porzioni differenti del manufatto, la visita virtuale vede il punto di inizio all'esterno del complesso in corrispondenza di *Avenida Portugal*. Nel caso della *Scena Modello*, invece, l'area destinata alla validazione delle operazioni di programmazione e al *testing* dell'esperienza VR è stata individuata nella Chiesa, ritenuta idonea alla messa a sistema delle ipotesi di fruizione prefigurate per gli elementi che la compongono. Di conseguenza, all'avvio della *scena*, l'utente si troverà collocato al suo interno in corrispondenza dell'accesso e al di sotto del coro (fig. 7.25).

Dunque, preliminare è stata l'individuazione della sequenza operativa che, in seguito al riconoscimento degli *hotspots*, consente di accedere ai contenuti informativi. Al fine di poterli selezionare, diventa imprescindibile l'utilizzo di un sistema di puntamento. Nelle visualizzazioni *desktop*, è noto che l'operazione può essere gestita attraverso *input* codificati e basati su dispositivi semplici come il *mouse*. Nelle fruizioni VR immersive, invece, le soluzioni adoperabili prevedono di sfruttare l'*eye tracking* (Cfr. Appendice, nota 288) o un sistema appositamente programmato. Nel primo caso, è necessaria la presenza di una sensoristica dedicata e HMD specifici che riescano a tenere traccia dei movimenti oculari dell'utente; nel secondo caso, soluzioni appositamente

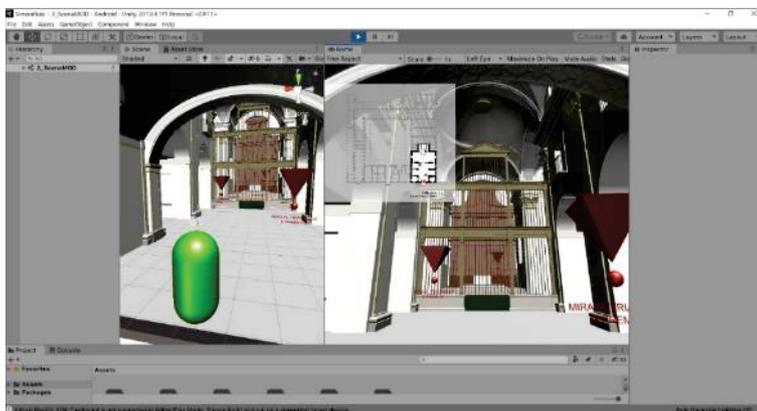


Fig. 7.25 – Punto di inizio della visita virtuale nella *Scena Modello*: visualizzazione in ambiente *Unity 3D* mediante i pannelli *scene view* e *live game preview*.

Elaborazione M. Pulcrano

studiate consentono comunque di ottenere risultati analoghi. La scelta, quindi, è fortemente dipendente dal tipo di sistema ipotizzato.

Quello progettato per l'App VR dell'Hospital Simón Ruiz, si connota per essere un sistema di tipo *low cost* per le valutazioni precedentemente descritte (Cfr. par. 7.2.1 e par. 7.2.2). Ciò ha reso inapplicabile l'*eye tracking* e spinto ad utilizzare in ambiente *Unity 3D* la tecnica del *Raycasting*. Concettualmente, questa consente di simulare la traiettoria della vista dell'utente mediante raggi invisibili che, colpendo gli oggetti presenti nella *scena*, forniscono le informazioni – o attivano le funzioni – ad essi associati. Praticamente, la soluzione individuata consta delle seguenti fasi operative: (i) creazione del raggio<sup>254</sup>, (ii) scelta dell'*input*<sup>255</sup>, (iii) esecuzione iterativa della funzione che proietta il raggio<sup>256</sup> ed (iv) esecuzione della funzione che restituisce l'*output* in seguito alla collisione<sup>257</sup>. Il tutto gestito mediante *script* di programmazione associati alla camera di visualizzazione del *player*. Funzionale alla riuscita del *Raycasting* è, quindi, la presenza di un

---

<sup>254</sup> Viene specificato l'inizio, la direzione e l'estensione con la funzione *ViewportPointToRay(new Vector3(0.5F, 0.5F, 0))* legata alla camera virtuale. Generalmente, nelle fruizioni VR immersive, l'inizio è coincidente con il centro della camera; la direzione è quella uscente dalla essa; mentre l'estensione può assumere un valore finito, se è necessario limitare il *range* di azione del raggio, o infinito.

Sebbene il raggio sia invisibile, alcuni espedienti consentono di visualizzarlo come punto o come traiettoria, associando immagini o effetti alla camera virtuale. Nel caso specifico dell'Hospital Simón Ruiz è stato scelto di visualizzare un piccolo punto nell'inquadratura – mirino – al fine di indirizzare l'utente nell'oggetto che sarà colpito dal raggio.

<sup>255</sup> In questo caso è stato individuato nel tasto di selezione R1 del *controller* l'*input* per attivare la tecnica *Raycasting*.

<sup>256</sup> *Physics.Raycast(ray, out new RaycastHit, Range)*, dove *ray* è il raggio creato e la variabile *RaycastHit* è indispensabile per ottenere informazioni inerenti la collisione. La funzione restituisce un valore *booleano* che indica se il raggio ha colpito un *GameObject* – valore *true* – oppure no – *false* –. Per tale motivo è spesso inserita all'interno della funzione condizionale *if ()*.

<sup>257</sup> Se l'*output* della funzione precedente è *true*, ovvero se il raggio ha intercettato un *GameObject*, allora l'utente visualizzerà un evento, che in questo specifico caso è legato all'attivazione/disattivazione dei contenuti associati agli *hotspots*.

*GameObjects* che possenga tra i *component* un *collider*, altrimenti la collisione non sarà rilevata e il risultato nullo.

Fatte queste premesse e verificata l'esecuzione della tecnica mediante il pannello *live game preview*, sono stati inseriti nella *Scena Modello* gli oggetti tridimensionali rappresentativi degli *hotspots*<sup>258</sup> (fig. 7.26), a cui sono stati collegati il *collider*, un materiale – per gestirne l'aspetto grafico durante la *renderizzazione* –, uno *script*<sup>259</sup> – per animarli e non renderli elementi statici – e una descrizione testuale che invita l'utente a premere il tasto di selezione *R1* del *controller*. Ad ogni *hotspot* è stato assegnato un *tag*<sup>260</sup> per indurre la tecnica *Raycasting* ad individuarli<sup>261</sup> e attivare le relative specifiche funzioni.

Formalizzato l'ambiente virtuale dal punto di vista tecnico, la fase successiva ha visto l'individuazione dei contenuti, il loro inserimento nello spazio *scene view* di *Unity 3D* e le modalità di connessione con l'esecuzione della fruizione. Va precisato che non tutti gli *hotspot* inseriti sono dedicati a fornire informazioni aggiuntive e, conseguentemente, ad aumentare i



Fig. 7.26 – Organizzazione e programmazione dei *components* – visibili nel pannello *ispector* – utilizzati per caratterizzare i diversi *hotspots* presenti nella *scena*.

Elaborazione M. Pulcrano

<sup>258</sup> Realizzati in ambiente CAD, secondo procedure di modellazione solida tradizionale, ed esportati nel formato compatibile *.fbx*.

<sup>259</sup> È stata programmata un'attività molto semplice che prevede la rotazione della forma intorno all'asse verticale della stessa.

<sup>260</sup> È una parola di riferimento – un codice testuale – per i *GameObjects*, utile per individuarli negli *scripts* e attivare azioni specifiche su e con essi. Può essere comune a più *GameObjects* o specifico per uno, come nel caso degli *hotspots* dell'*App* per i quali sono stati individuati e associati codici diversi.

<sup>261</sup> Gli oggetti che connotano gli ambienti virtuali sono molteplici e spesso presentano le medesime caratteristiche pur rispondendo ad eventi diversi. Per cui, nell'ipotesi che siano presenti altri *GameObjects* con *collider* e al fine di limitare l'azione della tecnica ad alcuni di loro, l'utilizzo dei *tag* è un utile espediente. Affinché produca i risultati attesi, però, è necessario introdurre un'ulteriore istruzione condizionale – un *if ()* annidato – per determinare il tipo di oggetto colpito. La funzione condizionale, quindi, diventa:

```
if (Physics.Raycast(ray, out new RaycastHit, Range))
    {if (new RaycastHit.collider.gameObject.tag == "")
        {
        }
    }
```

La prima determina se l'oggetto è stato colpito, mentre la seconda la tipologia di oggetto sulla base del *tag* associato.

Fig. 7.27 – Fruizione della Chiesa mediante attivazione dell'*hotspot* che trasporta l'utente alla quota del coro. Visualizzazione degli ambienti interni con e senza la presenza del cancello di separazione tra la navata e il transetto.

Elaborazione M. Pulcrano



contenuti della VR. Alcuni, infatti, sono destinati a indurre una variazione nella visuale affinché l'utente possa percepire lo spazio in un modo diverso da quello reale o secondo un'altra prospettiva. In tale ottica sono stati pensati i primi due *hotspots* che l'utente incontra e che gli consentono di guardare l'interno della Chiesa da una quota differente, il primo, e di percepire diversamente lo spazio interno, il secondo.

In particolare, il cambio di prospettiva avviene trasportando il *player* sul coro – posto in corrispondenza dell'accesso – (fig. 7.27). Qui l'utente potrà ammirare gli elementi sommitali che completano l'aula, le decorazioni presenti sulla superficie di intradosso della volta centrale, traguardare oltre la navata in direzione del transetto, etc., ma, soprattutto, avere una visione d'insieme dello spazio completamente differente rispetto alla posizione precedente. Inoltre, la mappa navigatore è stata programmata per aggiornarsi contestualmente alla variazione di quota che caratterizza l'attivazione di questo primo *hotspot*.

Per il secondo, invece, la percezione che si genera stando all'interno della Chiesa è quella che sussiste una netta separazione tra la navata e il transetto, derivante dalla presenza dell'imponente elemento di divisione voluto dal fondatore Simón Ruiz Envito. La scelta di consentire all'utente dell'*App* di fruire dello spazio – seppur in modalità virtuale – come se fosse



Fig. 7.28 – Attivazione delle funzioni accesso/spento connesse all'*hotspot* che consente di gestire la visualizzazione del cancello. Vista della navata dal transetto.

Elaborazione M. Pulcrano

continuo e unitario, ha guidato verso la scelta di rendere il secondo *hotspot* uno strumento per accendere/spegnere l'elemento di divisione (fig. 7.28). A questi *hotspots*, ipotizzati come occasione per percorrere e ammirare la Chiesa secondo modalità (probabilmente) non realizzabili con una visita reale in sito, se ne associano altri dal carattere tipicamente descrittivo che consentono di ottenere informazioni inerenti le opere presenti al suo interno. Esempio emblematico, è quello descrittivo della Pala d'altare. L'imponente struttura lignea (8.35 x 13.50 m) è poggiata sul muro di fondo dell'altare e ne completa il disegno attraverso una suddivisione in riquadri al cui interno sono raffigurati diversi personaggi ed entità religiose. Il programma iconografico è ben chiaro, ma l'aspetto che si pone subito in evidenza è che, diversamente da quanto ipotizzato, tali opere non sono realizzate con tecniche pittoriche, ma sono ottenute mediante sculture lignee. La selezione dell'*hotspot* fornisce l'accesso alla breve descrizione di ogni singolo riquadro e alla relativa immagine fotografica (fig. 7.29), la quale consente di ammirare i dettagli che lo compongono – aspetto rilevante soprattutto per le raffigurazioni poste più in alto –. La visualizzazione delle diverse informazioni è stata programmata affinché sia l'utente a scegliere l'opera di cui visualizzare le informazioni, manipolando in completa autonomia il selettore per la navigazione dei riquadri. Infine, per consentire di percepire la tridimensionalità che connota tutta la Pala



Fig. 7.29 – Descrizione di una parte delle opere costituenti la Pala d’altare mediante la selezione dei riquadri che la compongono.

Elaborazione M. Pulcrano

d’altare, la fruizione del contenuto è aumentata con la visualizzazione della nuvola di punti *image-based* (Cfr. par. 5.2)<sup>262</sup>.

### 7.3.5 Scena H-BIM

L’ultima *scena* che compone l’*App* VR è dedicata alla fruizione del modello H-BIM e dei metadati ad esso associati nel *software* di BIM *authoring*, a cui si aggiungono *hotspot* informativi volti ad esplicitare, secondo altre forme grafiche, le informazioni inerenti gli elementi costituenti il complesso dell’Hospital Simón Ruiz. Se dal punto di vista del suo sviluppo la *Scena H-BIM* può essere considerata la sintesi di tutte le soluzioni tecniche illustrate nella descrizione delle precedenti *scene*, dall’altro si discosta da esse per l’aspetto a carattere prevalente tecnico con cui si connota. Ne deriva che la sua fruizione è destinata ad un *target* di utenti specifici del settore AECO. Ciononostante, la semplicità e l’immediatezza nel ricavare i diversi contenuti inseriti la rende comunque fruibile da chiunque avesse interesse e curiosità nel comprendere, ad esempio, le caratteristiche specifiche degli elementi del complesso e le scelte di semplificazione effettuate nella costruzione del modello informativo.

<sup>262</sup> L’esecuzione della specifica fruizione è avvenuta ricorrendo ad elementi della *User Interface* a cui sono stati associati *scripts* per la visualizzazione del contenuto informativo e la manipolazione della nuvola di punti in un ambiente dedicato.

Analogamente alle *scene* che la precedono, anche per la *Scena H-BIM* è stato scelto un ambito circoscritto del complesso, individuando nella corte e nelle strutture che la delimitano la porzione adatta alla sperimentazione (fig. 7.30).

Dunque, per procedere con quest'ultima parte applicativa, operazione preliminare è stata l'esportazione del modello H-BIM e l'importazione in ambiente *Unity 3D* (Cfr. par. 7.2.3), con l'associazione degli *script* generati dal *plugin Export to Unity* al modello e la verifica delle modalità di esecuzione delle relative azioni. In particolare, la valutazione della programmazione di *default* dello *script* e della resa grafica nella visualizzazione dei parametri descrittivi degli *smart-objects*, hanno mostrato sin da subito la necessità di variare parte del codice al fine di adeguare la procedura alla specifica *scena*.

Per quanto concerne il primo aspetto, riflessioni inerenti la presenza di *hotspots* per contenuti aggiuntivi e i risultati ottenuti nella *Scena Modello*, hanno indotto a replicare la tecnica del *Reycasting*<sup>263</sup>. Fondamentale, quindi,

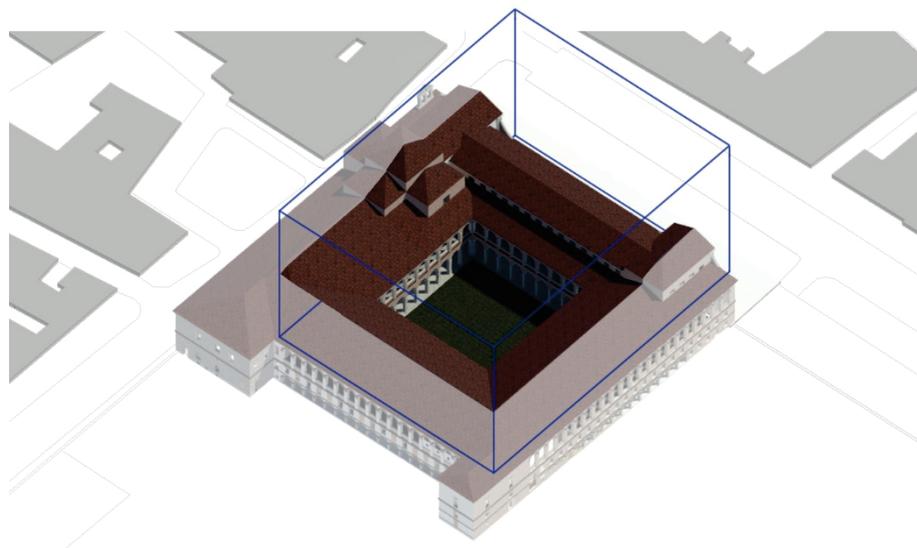


Fig. 7.30 – Area individuata per la costruzione della *Scena H-BIM*. Attraverso la *box* di visualizzazione è stata delimitata la porzione di modello da esportare, corrispondente alla corte interna del complesso.

Elaborazione M. Pulcrano

<sup>263</sup> È chiaro che nella descrizione della *Scena H-BIM* alcune soluzioni tecniche sono state volutamente sorvolate nella loro descrizione, poiché trattate nei punti precedenti. Ma è

Fig. 7.31 – Attribuzione del *tag modello* agli *smart-objects* del modello informativo e visualizzazione tramite il pannello *inspector* dei diversi *component* ad essi associati, come ad esempio, il *mesh collider* e gli *shader*.

Elaborazione M. Pulcrano

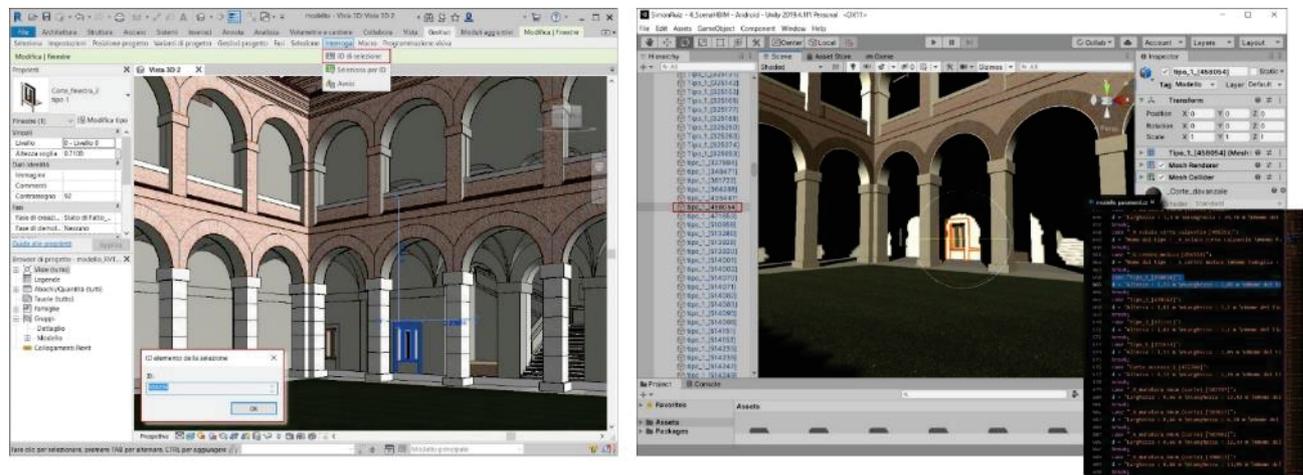


è stata l'attribuzione dei *tag* per categorizzare gli specifici *GameObjects* presenti nella *scena* e non generare confusione né all'interno del nuovo *script* né durante la sua esecuzione. Diversamente dagli *hotspots* che presentano codici univoci, tutte le componenti del modello H-BIM sono state caratterizzate con la medesima codifica *modello* (fig. 7.31). Va precisato che gli *smart-objects* hanno già di per sé un proprio codice *ID* – condiviso con il *file .cs* dei parametri –, associatogli in automatico dal *software* BIM durante la loro *modellizzazione*, per cui, la scelta di non procedere con *tag* differenti non inficia i risultati del *Raycasting*<sup>264</sup>. Lo *script*, infatti, è programmato per verificare se il raggio collide con un *GameObject* taggato *modello* e, in caso di

---

bene precisare che l'applicazione della tecnica del *Raycasting* necessita di una camera di visualizzazione per poter essere eseguita – coincidente con quella associata al *player*, senza la quale l'utente non potrebbe navigare nella *scena* –. Analogamente è indispensabile che gli oggetti con cui collidere devono possedere un *component collider*. Per i *GameObjects* costituenti il modello dell'Hospital Simón Ruiz è stato associato un *mesh collider*, ovvero una specifica categoria che determina le proprie caratteristiche formali in funzione della geometria dell'oggetto a cui è relazionata.

<sup>264</sup> A ciò va aggiunta la considerazione che, voler individuare un *tag* univoco per ogni componente del modello H-BIM, sarebbe operazione infruttuosa e dispendiosa sia in termini di tempo che di computazione per il sistema destinato all'esecuzione dell'*App*.



risposta affermativa<sup>265</sup>, individuare la riga corrispondente nel *file* dei parametri attraverso la lettura dell'*ID* (fig. 7.32). Le informazioni riportate in quest'ultima, saranno poi visualizzare nell'inquadratura della camera, aspetto che ha interessato la seconda parte di riorganizzare dei dati.

I settaggi grafici previsti di *default* dallo *script* generato dal *plugin Export to Unity*, infatti, sono stati variati al fine di rendere più chiara all'utente la lettura delle informazioni. Nello specifico, è stata cambiata la posizione del testo che, dall'angolo alto sinistro, viene traslato nella parte inferiore dell'inquadratura, apponendosi su una fascia di fondo che filtra la sovrapposizione tra i componenti del modello e il testo stesso. E, conseguentemente, anche il *font*, le dimensioni e il colore sono stati personalizzati (fig. 7.33). La modifica è stata ottenuta impostando le diverse proprietà come variabili di un ulteriore *script* – collegato al *GameManager* –; tale espediente ha reso possibile l'aggiornamento dinamico del testo in relazione ai parametri dell'elemento selezionato.

Fig. 7.32 – Corrispondenza nel codice ID dello *smart-objects* letto in ambiente *Revit*, del medesimo *GameObject* in *Unity 3D* e della relativa riga di codice nello *script* dei parametri (*file .cs*).

Elaborazione M. Pulcrano

<sup>265</sup> Contestualmente, il *GameObjects* intercettato dal *Raycasting* muta la sua *texture*: non sarà più rappresentato attraverso una resa materica realistica, ma apparirà completamente blu alla vista dell'utente. Questo espediente è stato impostato per rendere con evidenza l'oggetto di cui si stanno ottenendo le informazioni.



Fig. 7.33 – Selezione degli oggetti del modello informativo e visualizzazione dei metadati associati mediante la lettura del *file* parametri. Confronto tra la grafica prevista di *default* dal *file MouseOver* (immagine sinistra) e quella personalizzata durante la progettazione della *Scena H-BIM* (immagine destra).

Elaborazione M. Pulcrano

È chiaro che i metadati che connotano gli *smart-objects* sono molteplici e sarebbe confusionario renderli tutti visibili in una fruizione di questo tipo. Quindi, in fase di esportazione delle loro proprietà, nella generazione del *file* parametri, è stato scelto di estrapolare quelle ritenute significative ad una prima comprensione<sup>266</sup> (codice *ID*, nome dell'elemento, le dimensioni, etc.). Questo però non esclude la possibilità di modificare la loro scelta, anche in un momento successivo, poiché nella gestione della strutturazione del sistema l'utilizzo di codici identificativi e *script* di programmazione basati su essi agevola aggiornamenti semi-automatizzati. In pratica, in seguito a qualsivoglia modifica effettuata in ambiente BIM, sia la geometria del modello che il *file* parametri possono essere reimportati nello spazio di lavoro *Unity 3D* senza alterare la corretta esecuzione del progetto di fruizione VR.

Conclusa questa prima fase di programmazione della *Scena H-BIM*, che ne rappresenta di fatto la parte più saliente e interessante, è stata posta l'attenzione ai contenuti da esplicitare mediante gli *hotspots* informativi. Analogamente alla *Scena Modello*, ad ognuno di essi, oltre a corrispondere

<sup>266</sup> È evidente che un simile approccio non riesce a soddisfare appieno le esigenze di una conoscenza tecnico-specialistica; ciononostante è un valido supporto nel guidare l'utente ad ottenere le informazioni ricercate, integrando ciò che visualizza tramite l'*App* con la ricerca nei sistemi dedicati.

un *tag* specifico, sono state associate diverse informazioni differenziandole per forme e tipologia di contenuto.

Pur restando nella sfera tecnica, è stato ritenuto interessante inserire schede tematiche, disegni di dettaglio, quadri sinottici, etc. collegate ad oggetti specifici o punti particolari del modello. Realizzate sempre in ambiente BIM per non perdere coerenza dell'informazione rappresentata, sono state convertite in un file *.jpg* da inserire all'interno di *Unity 3D*. Nella predisposizione della tavola in *Revit* particolare attenzione è stata posta alle finalità rappresentative della stessa. Riflessioni in merito alle modalità di visualizzazione e alle dimensioni degli elementi inseriti, infatti, sono state necessarie per organizzare i diversi elaborati che la compongono al fine di rendere chiara la sua lettura in VR (fig. 7.34).

Accanto a questa tipologia di *hotspot*, ne sono stati inseriti altri che consentono di attivare/disattivare porzioni di nuvola di punti e la lettura dello schema compositivo sotteso alla costruzione planimetrica<sup>267</sup> del

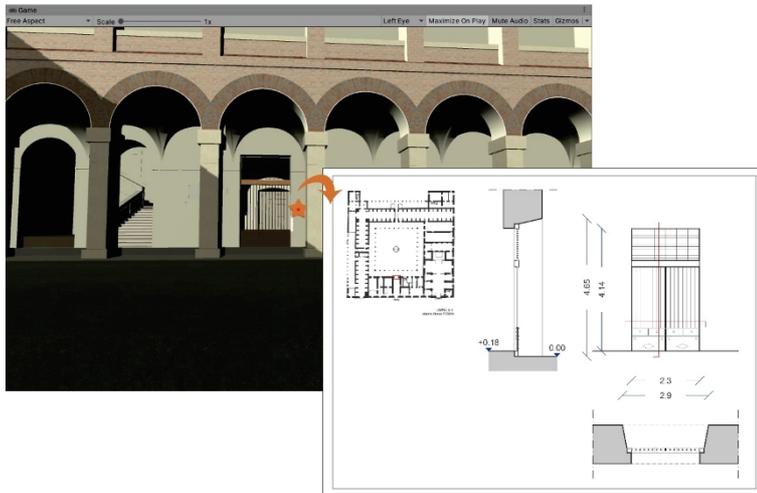


Fig. 7.34 – Visualizzazione della scheda di dettaglio mediante attivazione dell'*hotspot* dedicato.

Elaborazione M. Pulcrano

<sup>267</sup> La soluzione pratico-operativa ipotizzata vede la traslazione della camera di visualizzazione in direzione  $\xi$  di una certa quantità utile alla vista unitaria del complesso e, contestualmente, la rotazione della stessa al fine di dirigere il punto di vista del fruitore verso il basso.

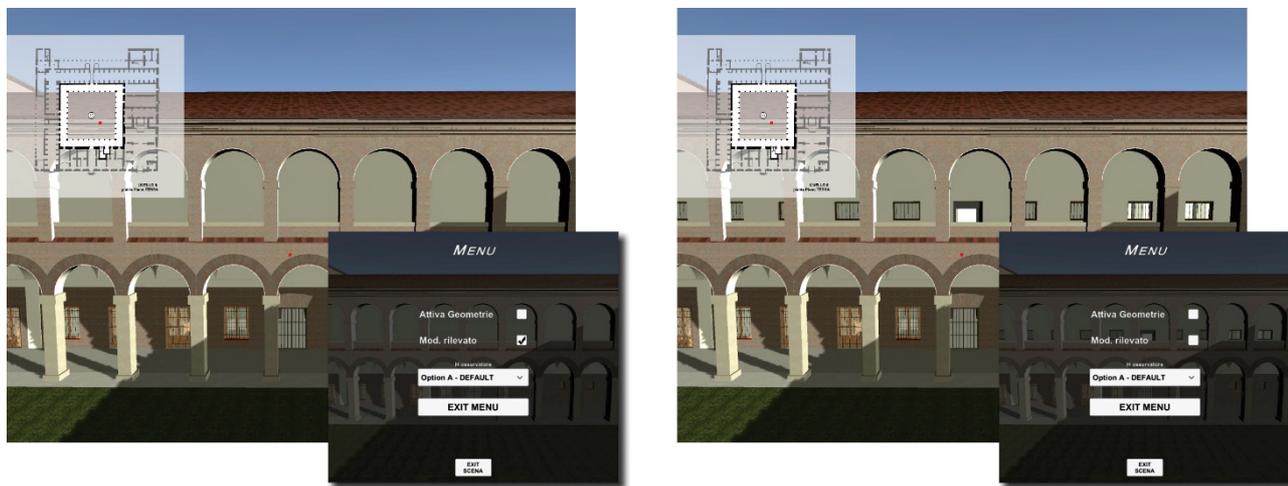


Fig. 7.35 – Visualizzazione del modello costruito in base ai soli rilievi *reality-based* (immagine sinistra) o integrato con le informazioni desunte dalle analisi storiche e documentali (immagine destra). Opzione di scelta impostata nel *menu* contestuale della *Scena H-BIM*.

Elaborazione M. Pulcrano

modello informativo. In entrambi i casi, i dati inseriti sono visualizzati in sovrapposizione al modello geometrico e la scelta di sperimentare questa soluzione volge lo sguardo ad obiettivi<sup>268</sup> che, sebbene siano distanti dalle finalità della presente ricerca, ne costituiscono un punto di interesse nel valutare le potenzialità dello strumento progettato.

Lo schema compositivo degli alzati, invece, è attivabile dal *menu* contestuale, il quale, differentemente dalle altre *scene*, è stato ampliato con opzioni aggiuntive e specifiche per la *Scena H-BIM* completandone, di fatto, il quadro informativo. Nel dettaglio, è stata programmata la possibilità, attraverso gli *UI Toggle*, di accedere alla visualizzazione degli

<sup>268</sup> Ad esempio, l'analisi e la mappatura dello stato di conservazione del manufatto. Aspetto che, come è ben noto, è tutt'ora investigato nell'applicazione della metodologia BIM al patrimonio storico-architettonico non solo per le questioni inerenti la sua *modellizzazione* ma anche per l'integrazione dei risultati derivanti da segmentazioni automatizzate della nuvola di punti. Inoltre, va precisato che non sempre le attuali piattaforme di BIM *authoring* consentono di visualizzare secondo modalità realistiche sia la nuvola di punti che il modello informativo. Il tutto, dunque, potrebbe trovare in sistemi di VR una soluzione operativa soddisfacente, soprattutto per le potenzialità derivanti dallo studio tridimensionale di un fenomeno che, di fatto, caratterizza il manufatto nella sua complessità spaziale.

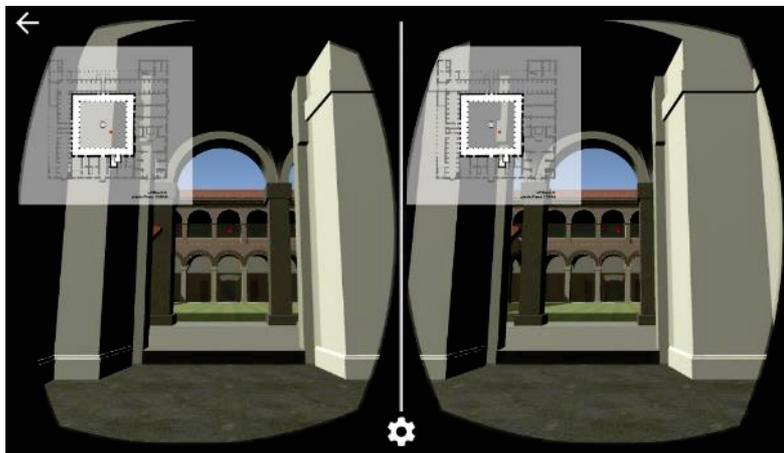


Fig. 7.36 – Visualizzazione stereoscopica ottenuta sul dispositivo *mobile* in seguito alla *built* dell'*App* e all'esecuzione del *file .apk* sullo *smartphone*.

Elaborazione M. Pulcrano

schemi geometrici e proporzionali dei prospetti della corte – sempre in sovrapposizione al modello H-BIM per cogliere gli elementi a cui fanno riferimento – e attivare/disattivare la visualizzazione del modello costruito esclusivamente sulla base della nuvola di punti<sup>269</sup> (fig. 7.35).

### 7.3.6 Generazione del *file APK*

Con la *Scena H-BIM*, l'*App* può considerarsi completa nelle finalità e negli obiettivi della presente ricerca. Ultimo *step* fondamentale è la conversione in un formato compatibile con il sistema che dovrà eseguirla.

La compilazione – *build* – del progetto impone dei componenti aggiuntivi<sup>270</sup> da implementare in *Unity 3D*, necessari per convertire

---

<sup>269</sup> La *scena* è stata impostata con la visualizzazione del modello completo, ovvero quello derivante dai rilievi *reality-based* integrato con le informazioni ricavate dalle fonti documentali e d'archivio, ma attraverso questa soluzione operativa è stato possibile rendere esplicite le parti e gli elementi del complesso ricavati dalla nuvola di punti.

<sup>270</sup> Nello specifico, *Android Software Development Kit Tools* (SDK) e *Java Development Kit* (JDK). Questi sono indispensabili per avere gli strumenti idonei per sviluppare applicazioni funzionanti sul sistema operativo *Android* basate sul linguaggio di programmazione *Java*.

secondo protocolli *Java* la struttura della VR in un'*App* funzionante sul sistema operativo *Android*. Questi sono visibili sia nella cartella degli *Asset Packages* – organizza tutte le risorse implementate in *Unity 3D* –, che nei settaggi da impostare durante la creazione del *file .apk*.

Dunque, inserite tutte le *scene* da rendere fruibili nella *build* e organizzate affinché la prima visualizzata all'avvio dell'*App* sia il *menu iniziale*. Per procedere è stata abilitata l'opzione relativa al supporto per la VR e indicato come lettore il sistema di riferimento *Cardboard*. In tal modo, il processo di compilazione rileva le caratteristiche specifiche che deve possedere l'*App* per eseguire correttamente la visione stereoscopica (fig. 7.36).





## CONCLUSIONE

### Risultati conseguiti e prospettive future di ricerca

Il rinnovato interesse per l'applicazione delle tecniche di virtualizzazione al patrimonio storico-architettonico e, in particolare, l'attenzione posta dalla comunità scientifica di settore all'integrazione delle diverse forme di fruizione *Extended-Reality* con i paradigmi della modellazione informativa, ha rappresentato lo spunto per la sperimentazione condotta con il presente lavoro.

La necessità di predisporre nuovi strumenti di comprensione e conoscenza, esplicativi non solo delle tecnologie di divulgazione, ma anche dei risultati ottenuti dalle diverse forme di investigazione attuabili nello studio dei manufatti esistenti, ha guidato lo sviluppo del processo metodologico sotteso all'idea di ricerca e del *framework* operativo rappresentativo della stessa. In tale ottica gli obiettivi legati alla costruzione di relazioni chiare e coerenti tra le informazioni acquisite, talvolta massive e fortemente settorializzate, e la volontà di rendere il tutto fruibile con modalità alternative, slegate dagli specifici strumenti utilizzati nella loro conformazione, ha comportato attente riflessioni sulle modalità di costruzione di un sistema atto alla disseminazione dei valori connotanti il manufatto. Il *continuum* informativo grafico e descrittivo è quindi visto come il presupposto che muove la ricerca nella lettura, interpretazione e

visualizzazione delle forme architettoniche, attraverso un unico processo integrato di elaborazione del dato digitale.

Dalla nuvola di punti acquisita attraverso le tecnologie *no contact* alla fruizione – in sistemi di *Virtual Reality* – del modello informativo derivante da essa, il presente lavoro di ricerca ha portato alla realizzazione di un'applicazione VR, ponendosi come esperienza di studio delle modalità di connessione delle diverse fasi che hanno caratterizzato le analisi inerenti il complesso ospedaliero Simón Ruiz di Medina del Campo (Valladolid, Spagna). La VR si configura come strumento complesso, volto da un lato ad agevolare la visualizzazione dei contenuti associati al modello *Heritage-BIM*, dall'altro a relazionare, in uno stesso sistema, le diverse tipologie di informazioni scaturite dalle fasi operative condotte. Al contempo, essa riveste anche un ruolo divulgativo poiché non riferita ai soli esperti tecnici del settore, ma anche a potenziali utenti interessati a conoscere il manufatto secondo approcci non tradizionali.

Al fine di ottenere risultati soddisfacenti e in linea con gli obiettivi prefissati, l'ampio quadro di indagine in cui si inserisce la sperimentazione ha richiesto la suddivisione delle tematiche affrontate in sotto domande di ricerca, ben delineate nei contenuti e nei limiti applicativi, ma tutte concorrenti alla definizione di un processo complessivo e completo. Per ogni sotto domanda sono state individuate le risposte ritenute più adeguate, analizzando le potenzialità e i vantaggi ottenibili in un approccio di questo tipo e, al contempo, valutando le criticità teorico-metodologiche e pratico-applicative derivanti dallo stesso. Come ampiamente sottolineato nell'esplicitazione del lavoro, infatti, le diverse questioni che si annodano nell'affrontare lo studio del patrimonio storico-architettonico costituiscono, di volta in volta, casi a sé stanti e le soluzioni metodologiche individuate non possono essere replicate senza particolari accorgimenti e senza analizzare criticamente le specificità del manufatto in questione.

Tre sono dunque gli aspetti su cui è stata focalizzata l'attenzione: (i) l'integrazione di risultati provenienti da tecniche di acquisizione differenti, (ii) la costruzione di un modello informativo H-BIM cosciente del ruolo

che riveste e del contenuto di cui è portatore e, infine, (iii) la definizione dell'esperienza di fruizione VR quale esito finale del *framework* applicato.

Il primo, sebbene non costituisca il fulcro della sperimentazione condotta, riveste comunque un ruolo fondamentale nel perseguimento degli obiettivi, poiché, di fatto, la conoscenza dello stato dei luoghi risulta propedeutica alle successive fasi di rappresentazione mediante sistemi BIM. E, in una reazione a catena, sia la nuvola di punti che il modello H-BIM divengono il presupposto per la costruzione della VR. L'obiettivo di ottenere dati morfo-geometrici e dimensionali dell'Hospital Simón Ruiz, al fine di comprenderne lo sviluppo spaziale complessivo, ha portato a sperimentare le modalità più appropriate per l'utilizzo di documentazione informativa e non realizzata ai fini del rilievo del complesso. Due quindi sono le principali questioni che si snodano in tale aspetto.

Da un lato, infatti, c'è stata la necessità di capire come utilizzare tale documentazione – una video ripresa acquisita tramite sistemi SAPR – per ottenere un rilievo tridimensionale, ovvero di una nuvola di punti. Come descritto nel lavoro, il processo attuato – applicazione di tecniche videogrammetriche – sebbene sia consolidato se relazionato alla *pipeline* fotogrammetrica di cui condivide le fasi operative, ha comportato la validazione dei risultati affinché la nuvola di punti *image-based* elaborata fosse dimensionalmente coerente con quella acquisita mediante sistemi *range-based*.

Dall'altro, l'integrazione dei dati *reality-based* ha posto interrogativi concernenti l'individuazione della metodologia da replicare per ottenere una nuvola di punti finale rappresentativa dell'intero complesso e, al contempo, in grado di consentire l'individuazione dei singoli prodotti derivanti dalle diverse acquisizioni.

Il *workflow* individuato, scaturito da un'accurata analisi delle soluzioni proposte da esperti e ricercatori del settore, ha permesso di ottemperare agli specifici obiettivi prefissati, definendo anche il grado di accuratezza morfo-geometrica della nuvola di punti videogrammetrica in riferimento a quella restituita dai rilievi *range-based*. Inoltre, operazioni di *editing* –

filtraggio, pulizia e segmentazione – sono state attuate al fine di predisporre il modello puntiforme per le successive fasi della ricerca.

Nella seconda tematica, invece, rientrano le riflessioni condotte in merito alla costruzione del modello H-BIM.

Come è ben noto, non è mai operazione scontata scegliere le procedure operative per la conformazione di un siffatto modello, viste le complessità che l'applicazione della metodologia impone in riferimento al patrimonio storico-architettonico, sia nella caratterizzazione del contenuto informativo – non sempre reperibile –, che nella realizzazione e classificazione ad *hoc* degli *smart-objects* rappresentativi del manufatto. Aspetti che sono direttamente influenzati dalle scelte di semplificazione introdotte in fase di *modellizzazione*, oltre che dal livello di dettaglio a cui si vuole tendere.

La soluzione proposta per l'Hospital Simón Ruiz è stata caratterizzata da una prima fase di lettura critica del manufatto, con analisi degli ortofotopiani estrapolati dalla nuvola di punti, che ha portato al riconoscimento delle regole compositive e formali del complesso. Rintracciate le modalità di ripetizione degli elementi nello sviluppo planimetrico e nella conformazione dei fronti, queste sono state riproposte nella costruzione del modello attraverso gli appositi strumenti previsti dalla piattaforma di BIM *authoring* utilizzata – allineamenti su assi di riferimento e replica in serie degli elementi –. Soluzioni specifiche, invece, sono state utilizzate per caratterizzare adeguatamente i diversi *smart-objects* inseriti nel modello.

È chiaro che le semplificazioni indotte dalla lettura della nuvola di punti e dal processo reiterato hanno portato all'applicazione di artifici e compromessi – legati a precisi ragionamenti logico-costruttivi – al fine di ottenere un modello digitale coerente con il LOD individuato e, soprattutto, con il manufatto reale. Al contempo, tale prassi operativa ha reso speditive le procedure di modellazione, ottimizzando tempi e risorse. Ciononostante, il costante rimando visivo alla nuvola di punti e il processo per la verifica automatizzata dell'aderenza tra modello geometrico e

modello puntiforme si sono rivelati utili supporti nell'apportare correttivi in fase di modellazione laddove la divergenza tra i due – letta in termini numerici – si è mostrata eccessiva.

Infine, nella fase più sperimentale della ricerca, l'attenzione è stata focalizzata sulle possibili connessioni – e relative modalità – tra il modello H-BIM e le fruizioni VR.

Tralasciando la definizione del sistema adoperato, che come si può ben immaginare è scaturita dall'analisi delle potenzialità e delle criticità legate ai diversi dispositivi utilizzabili, nonché dalla valutazione della progettazione/programmazione dell'esperienza in relazione allo specifico *software* di *game engine* a cui si è fatto ricorso, le diverse scelte effettuate – illustrate nel presente lavoro – sono state condotte in relazione alle finalità della ricerca. Queste sono dipendenti dalla volontà di non considerare il modello H-BIM come mera esemplificazione geometrica del manufatto, ma come portatore di conoscenza nell'ambiente VR. Ciò è stato reso possibile individuando un *workflow* che, in seguito alla scelta delle informazioni da visualizzare in VR, ne ha previsto l'esportazione in appositi formati (.cs) e la successiva ri-associazione col modello tridimensionale nel *software* di *game engine* mediante la codifica di uno *script* di programmazione dedicato.

La VR è stata, in seguito, ulteriormente implementata con l'inserimento dei dati di rilievo *reality-based*, dei moduli e rapporti geometrici individuati, delle informazioni desunte dalla ricerca bibliografica e d'archivio, etc., in modo da riallacciare in un unico strumento tutte le riflessioni e i risultati derivanti dalle diverse fasi di analisi che hanno caratterizzato lo studio dell'Hospital Simón Ruiz. In pratica, si è costituita una *App multidimensionale e multimodale* che, superando le complessità di gestione di un'elevata mole di dati eterogenei e le limitazioni di una specifica piattaforma BIM, ha semplificato il processo conoscitivo del manufatto rendendo disponibile in un unico strumento tutte informazioni scaturite dal *framework* operativo della sperimentazione.

In conclusione, i risultati ottenuti con la presente ricerca si inseriscono nell'attuale dibattito scientifico – a cui si è fatto costantemente rimando – sulle tematiche inerenti l'*usabilità* del modello BIM/H-BIM, con uno specifico punto di vista e un'ipotesi metodologica-applicativa. Diverse sono le esperienze mostrate dagli studi presi come riferimento, ma nell'affrontare il presente lavoro si è scelto di focalizzare l'attenzione sulla fruibilità del modello informativo, individuandone un possibile approccio. Nonostante i risultati conseguiti, è chiaro che le sperimentazioni in tale settore possono considerarsi tutt'altro che concluse, poiché cruciale resta ancora la definizione delle modalità di connessione tra l'ambiente BIM e quello VR. La soluzione proposta, infatti, sebbene risponda alle finalità prefissate e appaia in linea con le attuali ricerche in merito, presenta limitazioni inerenti lo scambio bidirezionale del dato – dal BIM alla VR e viceversa – e l'utilizzo del formato di interscambio IFC – aspetti attualmente non gestibili dagli strumenti utilizzati, i quali però si rendono necessari per ottenere i risultati attesi –.

Il primo è chiaramente dipendente dagli strumenti progettati dalle *software house*, che per quanto abbiano implementato *tools* e *plugins* per il trasferimento di dati dal BIM alla VR, non sono ancora pronti per gestire il flusso inverso. Il secondo, invece, si lega fortemente al primo ma concerne le modalità di gestione che le piattaforme BIM e quelle di *game engine* introducono per la semplificazione geometrica e informativa degli *smart-objects*. Quest'ultimo aspetto, in particolare, rimanda ai formati compatibili tra i vari applicativi e alle trasformazioni a cui sono destinati gli oggetti tridimensionali. Ad oggi, l'industria del *gaming* ricorre generalmente all'.*obj* e all'.*fbx* – formati di importazione ed *editing* – che traducono correttamente l'aspetto geometrico senza perdita di dati – fondamentale nella strutturazione di fruizioni VR –, ma mancano le relazioni con le informazioni relative ai metadati associati. Sarebbe invece auspicabile l'uso dell'IFC, che, sebbene utilizzi modalità differenti per la sintesi geometrica rispetto all'.*obj* e all'.*fbx*, è il formato dedicato alla corretta trasmissibilità del modello BIM.

Va precisato che l'ambito applicativo a cui si fa riferimento è ancora molto giovane per fornire metodologie consolidate e, nonostante appaiano chiari e promettenti gli esiti generali a cui finora si è pervenuti – con le ricerche di settore che si stanno muovendo in questa direzione –, necessita di ulteriori approfondimenti. Ciò risulta ancora più vero soprattutto se si relazionano gli obiettivi di trasmissibilità del modello, alle tematiche dell'interoperabilità – tra *software* e specialisti del settore AECO – e dell'*open* BIM, nonché alle modalità di interrelazione con sistemi non prettamente tecnici in grado di ampliare il campo applicativo della metodologia BIM anche ad ambiti differenti.

Per cui, appare evidente la necessità di procedere e continuare ad investigare su tale tematica, al fine di giungere ad un processo che sia effettivamente continuo e in grado di agevolare in pieno non solo le attività pratiche inerenti il manufatto, ma anche quelle fruttive convogliandole in un unico strumento decisionale e, al contempo, divulgativo.



## APPENDICE

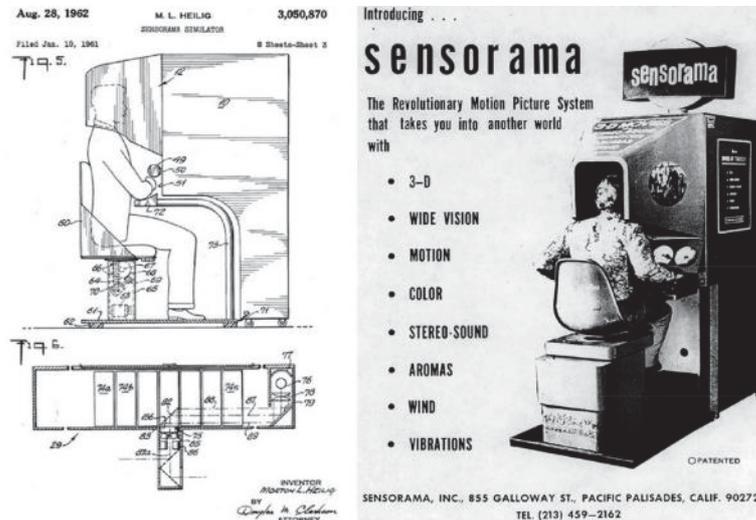
### Strumenti di visione e dispositivi di supporto per le fruizioni *Extended-Reality*

Molti sono gli strumenti e dispositivi che nel corso degli ultimi settant'anni sono stati ideati al fine di gestire lo sviluppo, ma soprattutto l'esecuzione delle fruizioni XR. Si tratta di sistemi progettati per rispondere agli obiettivi delle ricerche condotte e propongono diversi gradi di *immersività*, *interattività* e stimolazione sensoriale, ma spesso sono limitati dalle tecnologie utilizzate, ancora acerbe per consentire delle esperienze complete. Alcuni, infatti, risultano pioneristici rispetto all'epoca in cui sono stati pensati e costruiti.

Tra i primi dispositivi, il *Sensorama* di Morton Heiling (fig. A.1) fu realizzato nel 1962 al fine di creare un'esperienza *multisensoriale* e *immersiva*. *Display* a colore che proietta immagini stereoscopiche (per la visualizzazione tridimensionale della scena), ventole per simulare l'azione del vento, emettitori di odori per stimolare l'olfatto, sistema audio per l'udito, manubrio per il tatto, sedia mobile con riproduzione di vibrazioni e cinque cortometraggi diversi sono gli elementi che costituivano il *Sensorama*. Ogni stimolazione sensoriale si attivava in un preciso momento e l'esperienza risultava coinvolgente e altamente realistica per l'epoca, pur mancando di interazione con la scena o con lo strumento – fruizione *passiva* –.

Fig. A.1 – Dispositivo di fruizione *Sensorama* di Morton Heiling.

Fonte: Basso, 2017



Nel 1968, Ivan Sutherland (fig. A.2) ideò e costruì un sistema di fruizione *immersiva*, noto in seguito come *Sword of Damocles* per dimensioni, peso e modalità di utilizzo. È considerato come uno dei primi esempi di HMD<sup>271</sup>, anche se la grafica e realismo che proponeva erano semplificati con oggetti *wireframe*. Il nome attribuitogli è legato soprattutto al sistema di *tracking*: un braccio meccanico collegato al soffitto e al visore, infatti, consentiva di registrare i movimenti dell'utente e aggiornare la prospettiva della scena visualizzata.

<sup>271</sup> In realtà, lo stesso Sutherland progettò qualche anno prima il *The Ultimate Display* (1965), di cui il sistema *Sword of Damocles* ne rappresenta la diretta evoluzione. Ma va precisato che già nel 1961 due ingegneri della *Philco* inventarono un dispositivo da indossare per la visione stereoscopica (*Headsight*): in pratica un vero e proprio HMD. Progettato per la videosorveglianza aziendale, l'*Headsight* mostrava in *real time* le immagini riprese dalle camere allocate nelle vicinanze e, grazie al sistema di *tracking* magnetico, permetteva una ripresa completa a 360° in quanto la camera aggiornava la visuale in base ai movimenti effettuati della testa della persona che lo indossava. Non si tratta, dunque, di un dispositivo VR, poiché mostra immagini reali, ma la sua creazione diviene fondamentale per le fruizioni virtuali e pone le basi per i successivi sviluppi tecnologici.

Il *Videoplace* di Myron Krueger (fig. A.3) è, invece, identificato come precursore dei *CAVE environment* e come prototipo di interazione di gruppo. Realizzato nel 1975, era composto da due stanze con videocamere e schermi di proiezione, per mappare e visualizzare su questi ultimi gli elementi costituenti la scena sottoforma di ombre manipolabili e caratterizzabili per colore e dimensione. Ciò consentiva l'interazione tra gli utenti e con gli oggetti presenti sia nella stessa stanza che nell'altra.

All'aspetto interattivo della fruizione guarda il *Power Glove*<sup>272</sup> (1989). Le finalità del progetto, legate ad un'ampia commercializzazione nel settore del *gaming*, portarono alla realizzazione di un prodotto diverso dal suo precursore – *DataGlove* della VPL di Jaron Lanier (1985) –, che sebbene fosse semplificato nella struttura e nei materiali, consentiva di manipolare oggetti virtuali e simulare sensazioni tattili. In particolare, un doppio sistema determinava, da un lato, la mappatura dei movimenti delle dita, dall'altro, la posizione spaziale della mano. Una piccola *consolle* con tasti di selezione e direzione, posta sull'avambraccio, ne completava *design* e funzionalità.

A questi dispositivi, come è ben noto, nel corso degli anni ne sono seguiti tanti altri, accompagnati anche da sviluppi *software* per la costruzione delle diverse forme di fruizione XR. Ciò, se da un lato mostra come il settore abbia avuto forti impulsi nel promuovere sistemi sempre più performanti e in linea con lo sviluppo tecnologico, dall'altro mette in evidenza come l'attenzione non è rivolta alla mera visualizzazione dell'oggetto rappresentato. Un insieme di fattori, infatti, entrano in gioco affinché possano essere garantiti tutti gli aspetti rilevanti e connotanti le diverse esperienze XR. I dispositivi ideati, talvolta sono destinati a specifici progetti di comunicazione, altre volte, invece, sono adattabili alle diverse tipologie di fruizione.

<sup>272</sup> Il progetto è opera di Jaron Lanier, Tom Zimmermann e Steve Bryson, che furono incaricati dalla *Mattel* di sviluppare la periferica di gioco per la *Nintendo Entertainment System*.



Fig. A.2 – *Sword of Damocles* progettato da Ivan Sutherland nel 1968.

Fonte: Carmigniani e Furht, 2011

Fig. A.3 – Schema di funzionamento del sistema *Videoplace* di Myron Krueger.

Fonte: Alqahtani et al., 2017

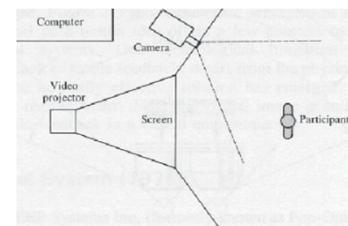


Fig. A.4 (pagina seguente) – Schematizzazione degli attuali dispositivi che compongono i sistemi di fruizione XR

Elaborazione M. Pulcrano

Di conseguenza, gli attuali strumenti per l'AR, l'AV e la VR presentano una doppia classificazione, da un lato prettamente tecnologica, dall'altro esplicativa delle modalità di relazione con il sistema di fruizione ideato. Nel primo caso, si distinguono sistemi di *tracking*, dispositivi di visualizzazione, sistemi di *input* e *motion controller*, a loro volta, ulteriormente differenziati in base ai risultati che consentono di ottenere. Nel secondo caso, invece, sono definiti dispositivi di *input* – sistemi di *tracking*, *input* e *motion controller* –, se utilizzati per acquisire informazioni in *real time* sulle attività dell'utente (azioni e movimenti), e di *output* – dispositivi di visualizzazione e *feedback* –, se, invece, gli consentono di visualizzare le modifiche che il sistema apporta<sup>273</sup> (fig. A.4).

## A.1 Sistemi di *tracking*

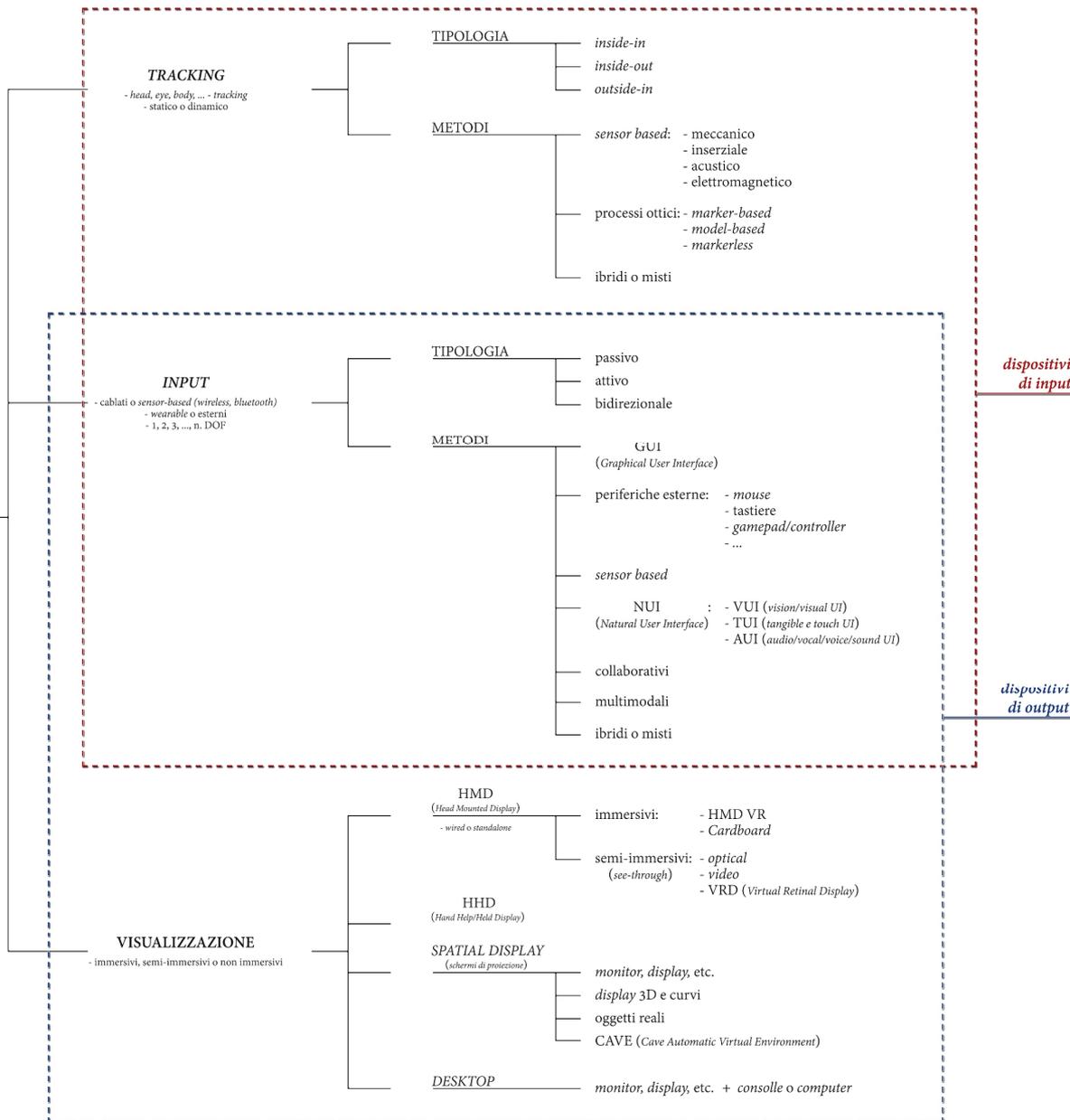
Il *tracking* è utilizzato per stabilire con elevata precisione la posizione e l'orientamento dell'utente – della testa in particolare (*head tracking*), ma può interessare anche altre parti fino a includere l'intera figura (*body tracking*)<sup>274</sup> – in un determinato istante mentre fruisce del sistema XR, degli oggetti presenti nella scena (reale o virtuale) e degli strumenti di *input* utilizzati. È pressoché analoga, ovvero utilizza gli stessi principi e le stesse tecnologie, ma nel caso dell'utente e dei dispositivi di *input* è una mappatura di tipo *dinamico* poiché la posizione non è fissa, ma muta ad ogni interazione che l'utente ha con la scena. Per cui, essendo variabile, va continuamente rilevata in *real time* al fine di garantire stimoli sensoriali corretti

---

<sup>273</sup> Alcuni dispositivi, come le interfacce *aptiche*, possono assolvere sia funzioni di *input* che *output*.

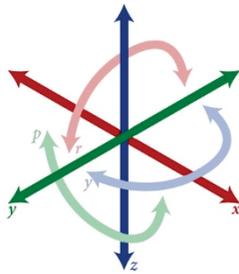
<sup>274</sup> Testa, mano e dita, occhi, piedi sono le parti del corpo che, generalmente, sono interessate dal *tracking*, poiché sono quelle che maggiormente influenzano l'esperienza di fruizione. Ciononostante, laddove se ne rilevi la necessità, è possibile applicare i sistemi di mappatura a qualsiasi parte del corpo umano.

DISPOSITIVI PER LE FRUIZIONI XR



dispositivi di input

dispositivi di output



#### coordinate spaziali

- x = avanti/indietro
- y = destra/sinistra
- z = su/giù

#### coordinate angolari

- r = roll
- p = pitch
- y = yaw

Fig. A.5 – Coordinate spaziali e angolari che definiscono la mappatura completa – posizione e orientamento – della visuale dell'utente.

Elaborazione M. Pulcrano

nell'esecuzione del progetto di fruizione, oltre che rendere navigabile lo spazio digitale con l'aggiornamento costante delle immagini proiettate sul dispositivo di visualizzazione in base alla visuale dell'utente.

Individuati i parametri – espressi in coordinate spaziali  $(x, y, z)$  e in coordinate angolari (*yaw*, *pitch*, *roll*) (fig. A.5) – il sistema aggiorna automaticamente la prospettiva della scena affinché l'utente abbia l'illusione di essere in un mondo reale – sebbene costruito digitalmente, nel caso della VR – e/o che gli oggetti visualizzati gli appartengano – anche se si tratta di riproduzioni virtuali, nel caso della AR –. Più accurato sarà il *tracking*, maggiore sarà la sensazione di *presenza* e la percezione di non riuscire a distinguere gli elementi reali da quelli fittizi. Inoltre, una buona mappatura degli spostamenti limiterà il *motion sickness*, un disturbo psico-fisico che si genera quando l'utente percepisce incongruenze tra il movimento reale che esegue e quello virtuale che visualizza tramite visore<sup>275</sup>.

Come è ben noto, il problema della mappatura è molto più rilevante nelle fruizioni AR piuttosto che in quelle VR, poiché, sorvolando sulle problematiche derivanti dal *motion sickness* che potrebbero essere limitate con opportuni accorgimenti e correzioni<sup>276</sup>, con l'errato *tracking* in AR viene a mancare il corretto *overlay* tra reale e digitale, con conseguenze rilevanti sull'illusione che i due mondi coesistano.

<sup>275</sup> È associato prevalentemente alle fruizioni VR, per l'alta *immersività* che implicano, e dipende dalle caratteristiche delle tecnologie utilizzate che non riescono ancora a replicare la velocità e i repentini cambiamenti di posizione e orientamento dovuti al moto umano. Oltre al visore utilizzato, altri fattori che potrebbero incidere sull'insorgenza del *motion sickness* sono legati, ad esempio, al tipo di dispositivo di *input* utilizzato per gestire i movimenti (*controller*, *gamepad*, etc.), alla latenza – tempo che intercorre tra il movimento reale e la sua registrazione dal sistema di *tracking* –, ma anche a caratteristiche fisiche dell'utente – in particolare la distanza interpupillare e i movimenti eseguiti dagli occhi per il cambio orientamento della visuale –.

<sup>276</sup> Mantenere sempre attivo l'*head tracking*, valori di *refresh rate* e *frame rate* elevati, movimenti reali effettuati a velocità controllata e costante, replica della posizione utente (seduto o in piedi, fermo o in movimento, etc.), evitare cambi repentini di luminosità all'interno della scena virtuale, etc., sono degli *escamotage* per evitare l'insorgenza del *motion sickness*.

Il *tracking* viene eseguito per mezzo di sorgenti di segnale, ricevitori e unità di elaborazione; le diverse parti che compongono l'intero sistema definiscono univocamente la posizione e la rotazione dell'utente e/o dell'oggetto mappato, riportando le informazioni secondo il riferimento impostato – globale o relativo –. Quando consentono di determinare tutti i valori delle coordinate spaziali – traslazioni lungo una direzione (avanti/indietro, su/giù, sinistra/destra) – e angolari – rotazioni intorno ad un asse fisso –, il sistema si definisce 6 DoF (*Degree of Freedom*), ovvero è un sistema che presenta 6 gradi di libertà poiché non è né vincolato né soggetto a forze o moti esterni.

I sistemi di *tracking* sono classificati in base al tipo di sensore e al metodo di mappatura che utilizzano.

### A.1.1 Tipologia di sensori

Nella classificazione tipologica viene considerata la collocazione, ovvero se il sensore è posto sul corpo dell'utente – *inside-in* –, sul visore utilizzato<sup>277</sup> – *inside-out* – oppure all'interno della stanza (posizione nota) in cui viene eseguita la fruizione – *outside-in* – (fig. A.6). Questi ultimi (fig. A.13), in particolare, sebbene garantiscano una precisione maggiore, richiedono almeno una coppia di dispositivi fissi (ricevitori) per calcolare posizione e orientamento tramite triangolazione<sup>278</sup>. Sono generalmente associati a visori (sorgenti) – *Oculus Rift*, *HTC vive* (prime versioni) e *PlayStation VR* – dotati di *marker* sul lato posteriore al fine di individuare l'utente anche se si volta di spalle al ricevitore. Il sistema necessita della visualizzazione continua della sorgente e, infatti, è fortemente influenzato dagli oggetti presenti nell'ambiente poiché potrebbero occultarla con effetti negativi sulla ricezione del segnale.

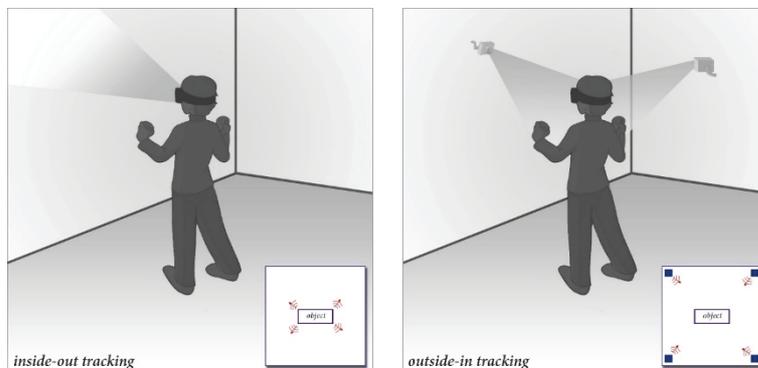
---

<sup>277</sup> Esempi di visori *inside-out* sono l'*Oculus Quest 2*, l'*Oculus Rift S* e l'*HTC Vive Cosmos*.

<sup>278</sup> In questi sistemi precisione e numero di ricevitori sono direttamente proporzionali, per cui per migliorare la stima del *tracking* è necessario aumentare la quantità di ricevitori collocati nella scena.

Fig. A.6 – Differenze tra le tipologie di mappatura *inside-out* e *outside-in*.

Elaborazione M. Pulcrano



Analogamente se l'utente, muovendosi, risultasse al di fuori del campo visivo del sensore, la mappatura diverrebbe nulla. Ciononostante, garantisce buoni risultati anche in ambienti grandi e all'esterno, a differenza dei sistemi *inside-out* che, per le caratteristiche che presentano, negli stessi ambienti potrebbero portare a mappature meno accurate. In questi ultimi, piccole camere integrate ai visori scansionano costantemente l'ambiente – che funge da sorgente – per scorgere le variazioni nelle immagini catturate e, di conseguenza, ricostruire i movimenti dell'utente. Va precisato che la portabilità che caratterizza il sistema *inside-out*, lo rende più versatile rispetto ai sensori *outside-in*.

Infine, nei sensori *inside-in* sorgente e ricevitore coincidono e sono collocati direttamente sul corpo dell'utente – sono infatti definiti anche come sensori indossabili –. Sono studiati per carpire i più piccoli movimenti del corpo dell'utente e, in alcuni casi, sono ideati per zone localizzate e funzioni specifiche, come il *cyberglove*, un tipo di *hand tracking* per la registrazione dei movimenti della mano. È chiaro che, in generale, l'esperienza risulta influenzata dal tipo di sensore utilizzato, poiché dimensioni e cablaggi potrebbero limitare i movimenti dell'utente.

### A.1.2 Metodi di mappatura

I metodi di mappatura, invece, rappresentano il tipo di segnale che sorgenti e ricevitori elaborano per determinare i DoF. Di conseguenza, in base al tipo di *tracking*, possono essere distinti in tre categorie a seconda se il segnale avviene mediante utilizzo di sensori – meccanici, inerziali, acustici, elettromagnetici –, attraverso processi ottici – *marker-based*, *model-based*, *markerless* – oppure mediante un’integrazione dei precedenti – *tracking* ibrido o misto – (Zhou et al., 2008).

Nella prima tipologia – mappatura su sensori – il *tracking* si basa sulla misurazione dell’intensità e/o dell’intervallo di tempo impiegato dal sensore per emettere/ricevere il segnale.

Nello specifico, il *tracking* meccanico è realizzato mediante connessione diretta tra un punto di riferimento noto – generalmente una centralina di elaborazione – e l’utente. La sensoristica presente sul braccio meccanico di collegamento invia alla centralina le misurazioni delle variazioni di posizione e orientamento, con una frequenza di aggiornamento elevata al fine di garantire che i movimenti digitali siano coerenti con quelli reali. Questo sistema di *tracking*, come si può ben immaginare, comporta delle limitazioni nei movimenti, dovuti alla struttura meccanica di mappatura, e la necessità di essere ricalibrato in riferimento alle caratteristiche specifiche di ogni utente che ne fruisce, ma l’accuratezza e la precisione che garantisce consente prestazioni elevate.

Il *tracking* inerziale utilizza giroscopi, accelerometri e inclinometri. Il sistema è composto da sensori di piccole dimensioni e non subisce interferenze da altri dispositivi, ma risulta poco accurato per piccoli spostamenti tanto da comportare problemi di deriva dovuti ad accumuli di errori nelle misurazioni e imprecisioni nella mappatura.

Il *tracking* acustico utilizza onde sonore ultrasoniche e necessita di almeno un sensore e tre sorgenti – o viceversa – per calcolare la posizione spaziale dell’utente. La misurazione può avvenire in funzione del tempo intercorso tra l’emissione e la ricezione dall’onda – sistemi *time of flight* – o dello

sfasamento, ovvero della differenza della lunghezza dell'onda emessa e di quella ricevuta – sistemi *phase coherence* –. Tali sistemi subiscono sia interferenze acustiche sia influenze indotte dalla presenza di oggetti nella scena e dalla densità del materiale in cui si propagano (in questo caso l'aria), con conseguenze che si riflettono sull'accuratezza della misurazione.

Analogamente, nel *tracking* elettromagnetico viene generata corrente all'interno di cavi disposti a spirale al fine di creare un campo elettromagnetico. Differentemente dal *tracking* acustico non risente di problemi di occlusione, ma è fortemente influenzato dalle onde radio, dalla presenza di superfici metalliche e di dispositivi elettronici. Inoltre, l'accuratezza della mappatura diminuisce se aumenta la distanza tra sorgente e ricevitore.

Nel *tracking* ottico, invece, la mappatura dell'utente è funzione della luce e delle caratteristiche riflettenti dei materiali; viene desunta sfruttando la luminosità dell'ambiente (sistemi *passivi*), o inserendo sorgenti luminose come LED, infrarossi, etc. (sistemi *attivi*), e applicando metodologie della *computer vision*. In pratica, camere CCD (*Charged Coupled Device*) o CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), usate come ricevitori, catturano immagini, le analizzano e rilevano posizione e orientamento di oggetti di riferimento presenti nella scena (emettitori o *marker*) o discontinuità nelle caratteristiche della stessa. Di conseguenza, con processi automatizzati basati sugli algoritmi della *computer vision*, si ricavano i movimenti dell'utente. Tale sistema di *tracking*, sebbene esegua rapidamente le operazioni computazionali e non presenti limitazioni spaziali di ripresa, è dipendente dalla visibilità degli oggetti di riferimento e dall'intensità luminosa dell'ambiente. Ciononostante, è il sistema maggiormente utilizzato sia nelle fruizioni AR che VR.

Oltre alla classificazione in *inside-out* e *outside-in* vista precedentemente<sup>279</sup>, i sistemi di *tracking* ottico si differenziano in base al riconoscimento di immagini dedicate<sup>280</sup> – sistemi *marker based* – (fig. A.7), alla lettura delle differenze rispetto ad un modello noto – *model-based* – o all’individuazione di discontinuità direttamente nella scena reale – sistemi *markerless* –.

Nel primo caso, i *marker* sono *attivi* se emettono luce propria (mediante luci LED ad esempio), *passivi* se, invece, la riflettono (*pattern*, codici visuali, punti, etc.; possono essere anche retroriflettenti al fine di agevolarne l’individuazione). È il sistema di *tracking* maggiormente utilizzato poiché non richiede elevate capacità computazionali e il riconoscimento si basa su algoritmi semplificati in quanto l’immagine del *marker* è già nota all’*App* presente nel dispositivo di visualizzazione. Il ricorso ad un’immagine strutturata ad *hoc* presenta caratteristiche prestazionali più elevate, poiché fattori esterni relativi alle caratteristiche dell’oggetto reale – nel caso di *tracking model-based* o *markerless* – o all’illuminazione della scena possono influenzare il riconoscimento ottico con conseguenze negative sull’esperienza di fruizione.

<sup>279</sup> Per il solo *tracking* ottico il sistema viene definito *outside looking in* (OLI) se i *marker* sono collocati sul corpo dell’utente, *inside looking out* (ILO) – ricorrente nei progetti AV e VR – se, invece, i *marker* sono collocati nell’ambiente (generalmente sul soffitto) e la camera coincide, di fatto, col visore utilizzato.

<sup>280</sup> Ne sono un esempio le immagini utilizzate da *ARToolKit*, una libreria *software* scritta in C/C++ per la creazione di applicazioni in AR. Sviluppata nel 1999 da Hirokazu Kato del *Nara Institute of Science and Technology*, sfrutta la *computer vision* per mappare in *real time* posizione e orientamento della camera integrata ai dispositivi *mobile*, tramite tracciamenti video di immagini stampate che fungono da *marker* (fig. A.7). L’*App* di *ARToolKit*, in pratica, a seguito della visualizzazione e riconoscimento del *marker*, mappa la camera reale, ne colloca una virtuale e permette di visualizzare i contenuti di riferimento eseguendo le istruzioni associate, che possono riguardare, ad esempio, la visualizzazione di un oggetto 3D. A spostamenti del *marker* reale, corrispondono aggiornamenti automatici della visualizzazione dell’oggetto digitale. Per la riuscita del sistema di *tracking* e dell’*App*, le immagini usate come *marker* devono possedere delle caratteristiche specifiche: forma quadrata, bordi esterni ben definiti e continui, immagine interna in contrasto con il colore di fondo e asimmetrica. Quest’ultimo aspetto, in particolare, risulta fondamentale per non generare ambiguità nella lettura del *marker* (Demidova, 2016).

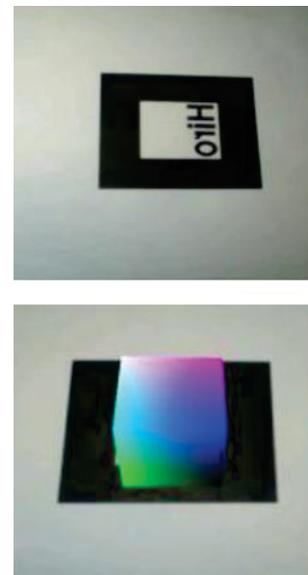


Fig. A.7 – Mappatura ottica di tipo *marker based* effettuata mediante la costruzione dell’immagine di riferimento (in alto) in *ARToolKit*. In basso l’informazione associata al *marker*.

Fonte: Demidova, 2016

Nel secondo caso, un modello 2D o 3D viene caricato all'interno del sistema e la mappatura avviene individuando le corrispondenze con la scena reale. Questo metodo, quindi, richiede una conoscenza preliminare dello spazio in cui verrà eseguita la fruizione e, nello specifico, il *tracking model-based* viene effettuato attraverso processi automatizzati di individuazione di linee e bordi.

Nel terzo caso, invece, vengono considerati riferimenti le variazioni morfo-geometriche, colorimetriche, materiche, etc. dell'ambiente in cui avviene la fruizione che, non essendo note apriori, sono rilevate contestualmente con tecniche SLAM (Cfr. par. 1.1.1) e SfM (Cfr. par. 1.1.2) sfruttando le acquisizioni di immagini e video effettuate dalla camera. Sebbene garantisca risultati soddisfacenti, il *tracking markerless* comporta oneri computazionali elevati per il processo che necessita di essere gestito in *real time*.

È chiaro che i diversi dispositivi e metodi di *tracking* non rispondono egualmente al perseguimento di obiettivi quali rapidità, limitata invasività dei dispositivi, accuratezza ed elevata frequenza nelle misurazioni, gestione delle interferenze, etc. Inoltre, mappature dinamiche/statiche e fruizione in ambienti interni/esterni influenzano non solo il posizionamento di sorgenti e ricevitori, ma ne limitano la portata, riflettendosi negativamente sulla precisione. Per tali motivi, spesso vengono integrati in sistemi ibridi o misti, al fine di massimizzarne le potenzialità e, quindi, limitarne le criticità.

Per gli ambienti esterni, in particolare, dimensioni dell'area di riferimento e impossibilità di installare dispositivi fissi hanno portato a soluzioni che associano, ai sistemi di mappatura pocanzi descritti, i sistemi di *tracking location based*. Ciò avviene in particolar modo per il *tracking* ottico in progetti di fruizione AR, poiché si sfruttano in pieno le caratteristiche presenti nei dispositivi *mobile* (*smartphone* e *tablet* di ultima generazione) che, oltre ad avere camere performanti per risoluzione e qualità, hanno già di *default* inseriti sensori di localizzazione (*Global Positioning System*, GPS) e orientamento (giroscopio e bussola digitale).

## A.2 Dispositivi di visualizzazione

In base agli obiettivi per i quali viene costruito il progetto di comunicazione e, quindi, a seconda del tipo di fruizione che si vuole ottenere (AR, AV, VR), ma soprattutto dell'*immersività* che si vuole rendere, va individuato lo strumento di visualizzazione più adatto. Nel corso degli anni, infatti, molti dispositivi sono stati ideati; alcuni si accomunano per forma e dimensioni, ma sono profondamente diversi nelle modalità con cui viene eseguita la fruizione, altri, invece, sono stati progettati per rispondere ad obiettivi specifici, per cui presentano caratteristiche formali e funzionali studiate ad *hoc*.

In generale, però, i dispositivi finora sviluppati possono essere classificati in tre categorie principali: *hand mounted display*, *hand held display* e *spatial displays*.

A queste si aggiunge una quarta dedicata alle applicazioni XR *desktop*, ovvero a tutte quelle forme di fruizione che riguardano la visualizzazione della scena attraverso *monitor* collegati a *computer* o *console* di elaborazione esterna. In particolare, nelle esperienze VR la fruizione è generalmente di tipo monoscopico e la navigazione dell'ambientazione avviene mediante dispositivi di *input* o camere per il *tracking* ottico che traspongono il fruitore nella scena virtuale mediante un *avatar* digitale che ne simula i movimenti. Mentre nelle esperienze AR, le camere associate al *monitor* restituiscono un'immagine complessiva data dalla fusione della scansione dell'ambiente reale con i contenuti digitali ottenibili attraverso procedure *marker based*.

### A.2.1 Head Mounted Display (HMD)

Sono dispositivi *hands free* e *near-eye* che l'utente indossa (occhiali, caschi, cuffie, auricolari, etc. sono tutti sinonimi utilizzati per indicare gli HMD), con *display* ottici monoscopici – un'unica lente disposta in corrispondenza di un occhio – o stereoscopici – due lenti per replicare la visione binoculare umana, percepire la tridimensionalità della scena rappresentata e aumentare il campo visivo – che consentono di osservare i contenuti della

fruizione XR mediante proiezione o visualizzazione. Possono occludere completamente la vista dell'utente, immergendolo in un mondo ricostruito, o far trasparire riferimenti della realtà reale, per esperienze *semi-immersive* ottenute mediante i visori *see-through*.

Inoltre, sono ulteriormente differenziati in HMD *wired*<sup>281</sup>, se necessitano di collegamenti fisici mediante cablaggi con unità esterne, e *standalone*, se invece sono dotati di un proprio processore e, quindi, oltre alla funzione di visualizzazione devono gestire anche quella di elaborazione. Tale aspetto può influire sulle modalità di esecuzione della fruizione XR, nonché sulla qualità grafica della scena rappresentata. Infatti, se da un lato con i visori *wired* si raggiungono ottime prestazioni grafiche, con rese altamente realistiche delle scene visualizzate, poiché il carico computazione è destinato ad un'unità di elaborazione esterna, dall'altro la presenza di cavi di collegamento potrebbe influenzare la fruizione della scena per le limitazioni imposte dagli stessi. Viceversa, con i visori *standalone* si ottiene una notevole libertà dei movimenti, ma non sempre è garantita la resa grafica. Va precisato, però, che diversi fattori incidono sulla stessa e che i visori *standalone* di ultima generazione offrono buoni risultati in merito.

Infine, nella scelta dell'HMD vanno considerati i parametri che ne definiscono le caratteristiche di visione, che variano in funzione dello stesso e, poiché devono adattarsi non solo al tipo di fruizione XR a cui sono destinati ma anche agli utenti, vanno analizzati con attenzione per non incidere negativamente sull'esperienza. Questi includono sia aspetti strettamente dipendenti il dispositivo utilizzato – FoV (*Field of View*) (fig. A.8), risoluzione, *refresh rate* e *frame rate* –, sia le specificità ottiche dell'utente che lo indossa – IPD (distanza interpupillare) e messa a fuoco –.

---

<sup>281</sup> Sono utilizzati prevalentemente nelle fruizioni VR e, in particolare, nell'ambito del *gaming* proprio per le elevate qualità di *renderizzazione* che offrono.

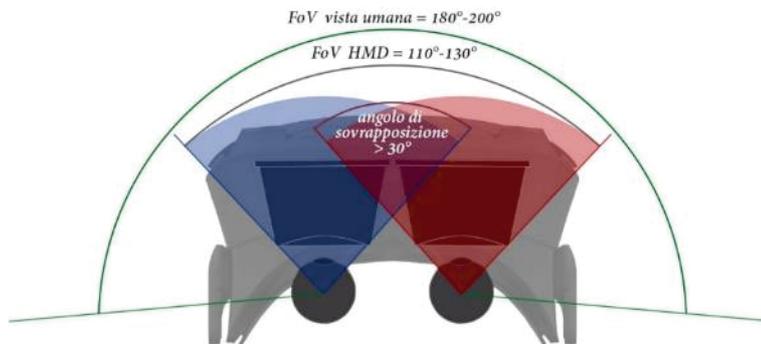


Fig. A.8 – Ampiezza del campo visivo e area di sovrapposizione (espressa in gradi) dei visori HMD in relazione alla vista umana.

Elaborazione M. Pulcrano

Nell'ambito della AR – ma parallelamente anche della AV –, è chiaro che i visori *see-through*<sup>282</sup>, per le caratteristiche che presentano, sono quelli che meglio si prestano a consentire la fruizione dei contenuti costruiti in digitale e, al contempo, rendere comunque percepibile l'ambiente circostante. Mera visualizzazione dei contenuti digitali o rielaborazione della scena sono le caratteristiche che differenziano i visori *optical see-through* dai visori *video see-through* (Azuma, 1997), le cui componenti sono, invece, pressoché analoghe e consistono in una centralina di elaborazione, un sistema di *tracking* basato su sensori e un dispositivo di visualizzazione, a cui si aggiungono, nel caso dei visori *video see-through*, due microcamere per l'acquisizione della scena reale (fig. A.9).

I visori *optical see-through*, o dispositivi olografici, sovrappongono informazioni alla realtà mostrando su lenti trasparenti grafici, testi, immagini, etc.. Sebbene l'utente abbia percezione dell'ambiente in cui è collocato, non sempre la fruizione risulta soddisfacente: resa grafica dei

<sup>282</sup> *Microsoft Hololens*, ad esempio, rappresenta uno dei dispositivi HMD *standalone* maggiormente utilizzato per le visualizzazioni AR e VR. Presenta due schermi trasparenti, un sistema audio in grado di isolare l'utente dall'ambiente in cui è collocato, una IMU con accelerometro, giroscopio e magnetometro, e un sofisticato sistema di scansione in *real time* per la mappatura precisa degli oggetti reali al fine di ottenere sovrapposizioni coerenti con quelli digitali.

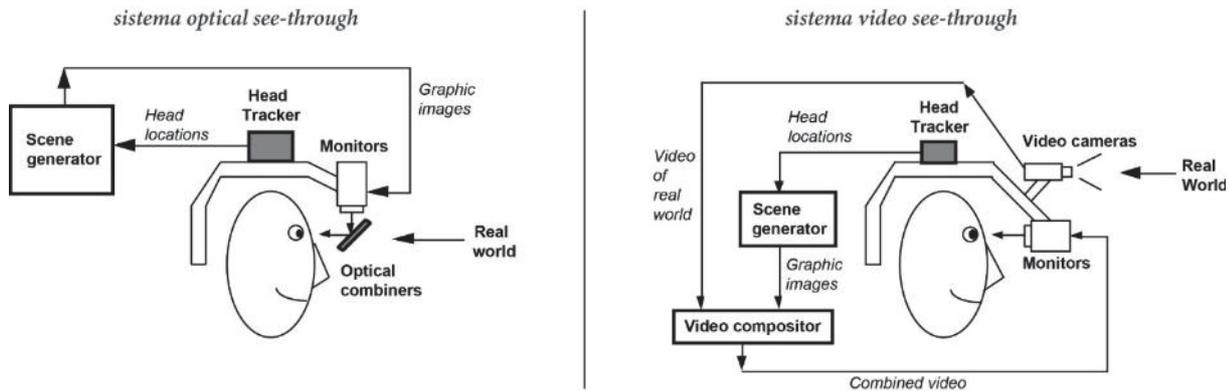


Fig. A.9 – Schema concettuale della composizione e del funzionamento dei sistemi *optical* e *video see-through*.

Fonte: Azuma, 1997

contenuti e ritardi nella loro visualizzazione (*lag*)<sup>283</sup>, infatti, lasciano percepire la realtà reale e quella digitale come elementi separati e sconnessi, piuttosto che integrati. A ciò va aggiunto il campo visuale delle lenti, ridotto rispetto a quello reale e la luminosità dell'ambiente, che se eccessiva potrebbe compromettere la fruizione delle informazioni. Ciononostante, tale tecnologia è ampiamente sfruttata nei settori *aerospaziale* e *automotive* con gli *Head-Up Display* (HUD), vetri trasparenti e schermi interattivi interposti tra il pilota e il parabrezza del velivolo o dell'auto, che integrano i sistemi di guida assistita fornendo diverse indicazioni (stato del sistema, rilevamento di pericoli, etc.) (fig. A.10). Non si tratta, quindi, di veri e propri HMD, poiché non vengono indossati dall'utente e sono collocati in una posizione fissa, ma rientrano nella classificazione *optical see-through* per il principio di funzionamento su cui si fondano. Analogamente, gli *smart glasses*<sup>284</sup> (fig. A.11), dei veri e propri occhiali da indossare – nelle

<sup>283</sup> Il *lag* non è altro che l'intervallo di tempo che intercorre tra il *tracking* dell'HMD, con l'acquisizione della scena reale, e la proiezione dei contenuti aggiuntivi sulle lenti dello stesso.

<sup>284</sup> Tra i più noti, i *Google Glass* consentono una visione monoscopica, con un unico dispositivo di proiezione sulla lente destra, mentre gli *Epson Moverio* o gli *Smart Eye Glass* di *Sony* sono strutturati con doppio schermo.

versioni più contenute –, sfruttano le potenzialità della tecnologia *see-through* mediante micro-schermi e proiettori. Microfoni o *touchpad* per gestire la visualizzazione dei contenuti, sensori di *tracking* (accelerometro, giroscopio, magnetometro, GPS) e ricevitori *wi-fi/Bluetooth* per il collegamento con altri dispositivi<sup>285</sup> completano il sistema *smart glass*.

Nei visori *video see-through*, invece, in seguito alla ripresa dell'ambiente reale in cui avviene la fruizione, i dati vengono elaborati e fusi con i contenuti da implementare, per poi essere proiettati sulle lenti dell'HMD, che, diversamente dagli *optical see-through*, non sono trasparenti. Il sistema, in pratica, fornisce all'utente un'immagine codificata e strutturata, la cui qualità grafica sarà differente da come si percepisce la realtà, poiché limitata dalle caratteristiche di risoluzione sia delle camere di acquisizione che dal *display* su cui viene proiettata. Da ciò deriva un onere computazionale più complesso per l'*hardware* grafico, poiché non solo deve *renderizzare* gli oggetti virtuali, ma rielaborare anche la realtà. Sussistono, quindi, delle differenze rispetto ai visori *optical see-through* negli elementi fisici che compongono i due dispositivi, nelle modalità con cui avviene la visualizzazione dei contenuti aumentati e nelle diverse sensazioni percettive che possono suscitare nell'utente. Inoltre, i visori *video see-through* sono generalmente associati agli HMD per le fruizioni VR, poiché attuano delle fruizioni di tipo *immersivo* ocludendo la vista dell'utente, ma diversamente da questi, che presentano un'ambientazione completamente costruita in digitale, rendono comunque possibile percepire la realtà reale, seppur attraverso una sua rielaborazione.

Accanto ai dispositivi di visualizzazione *see-through*, per le fruizioni AR, è stato sviluppato un ulteriore sistema – *Virtual Retinal Display* (VRD) – che prevede la visualizzazione di immagini digitali proiettate direttamente sulla

<sup>285</sup> Va precisato però che l'utilizzo degli *smart glasses* non può essere inteso come AR se limitato alla visualizzazione e gestione dei contenuti presenti nello *smartphone* associato (messaggistica, navigazione *internet*, *social network*, etc.), poiché, analogamente a quanto accade per il *QR-code*, non si instaura alcun tipo di relazione spaziale con la realtà sulla quale vengono sovrappresi.



Fig. A.10 – Esempio di HUD installato sul parabrezza di un velivolo.

Fonte: Melzer et al., 2009

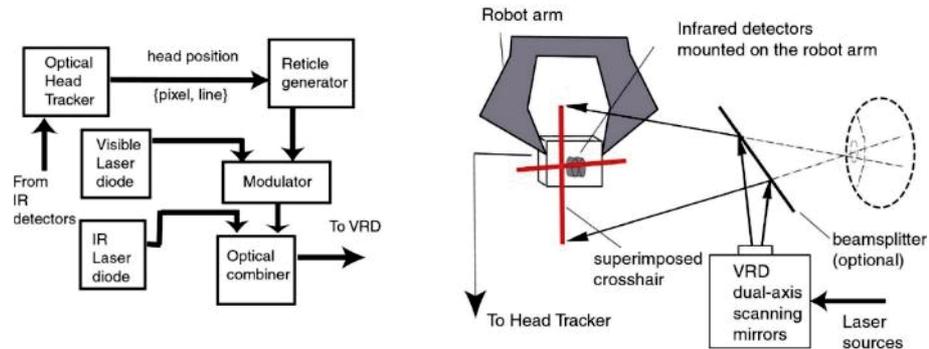
Fig. A.11 – *Smart glass* realizzati da Google.

Fonte:  
<https://www.google.com/glass/start/>



Fig. A.12 – *Virtual Retinal Display*: componenti del sistema e schema di funzionamento.

Fonte: Chinthammit at al., 2002



retina dell'occhio senza lenti o altri strumenti che fungano da filtro (fig. A.12). Sorgenti luminose, dispositivi ottici per modulare la luce e *controller* formano, quindi, il sistema VRD, che nel complesso presenta dimensioni contenute, a differenza degli altri dispositivi di visione. In particolare, una coppia di specchi rotanti consente di trasformare la sorgente luminosa nell'immagine *raster*, mentre uno di forma sferica la collima e la converge verso la retina discretizzandola in un punto luminoso (*pixel*) (Chinthammit at al., 2002). Ciononostante, l'utente visualizza un'immagine completa, sovrapposta al reale, chiara e nitida per l'elevata risoluzione e i forti contrasti di cui è caratterizzata.

Gli HMD utilizzati nelle fruizioni VR (figg. A.13), invece, sebbene apparentemente simili ai precedenti, possiedono caratteristiche specifiche per indurre nell'utente la sensazione di *immersività* e consentire il corretto svolgimento della scena. In primo luogo, è necessario che l'HMD sia occlusivo al fine di isolare totalmente l'utente dal contesto in cui è inserito. Inoltre, deve essere strutturato per fornire una visione binoculare e simulare la tridimensionalità: ciò comporta un maggior carico computazionale per l'*hardware grafico* poiché l'immagine proiettata sulle lenti deve essere duplicata e visualizzata da due punti di vista leggermente

differenti<sup>286</sup>. La doppia *renderizzazione*, inoltre, interessa un numero maggiore di oggetti – la scena è completamente costruita in digitale, diversamente da quanto accade nelle fruizioni AR *video see-through* – e per limitare le conseguenze dovute a ritardi nei *refresh rate* e *frame rate* sono richieste prestazioni elevate e geometrie non troppo complesse<sup>287</sup>. Altri fattori che incidono sui tempi di *renderizzazione*, influenzando sulla fluidità dell'esecuzione in VR, sono legati alla qualità delle immagini – devono apparire altamente fotorealistiche al fine di indurre nell'osservatore l'illusione che l'ambiente osservato sia reale – e alla gestione del *real time* – processo di *renderizzazione* reiterato all'infinito –. Quest'ultimo aspetto, in particolare, è relazionato al *refresh rate* e *frame rate* e, se eseguito correttamente, consente di avere un flusso continuo di immagini ad una velocità tale da consentire la corretta gestione del movimento dell'utente senza indurre fenomeni di *motion sickness*.

Dunque, il carico grafico da gestire per un HMD VR è nettamente superiore a quello per la AR, comportando, di fatto, la creazione di dispositivi performanti con prestazioni elevate. Va precisato però che, ad oggi, ancora non si è ancora giunti ad un grado sviluppo tale da consentire risultati ottimali poiché non solo la gestione dell'immagine entra in gioco.



Fig. A.13 – Composizione del sistema di fruizione VR HTC Vive: visore HMD, controller e sensore di tracciamento per la mappatura *outside-in*.

Fonte:

<https://www.vive.com/us/>

<sup>286</sup> A tal fine, come è ampiamente noto, gli HMD VR riprendono i principi fondanti la stereoscopia e sfruttano le capacità di elaborazione automatizzata della mente umana per restituire un'unica immagine tridimensionale. Ma gli HMD VR non sono i soli dispositivi ad essere utilizzati per questo scopo. Ad esempio, gli occhiali anaglifici, comunemente utilizzati nelle sale cinematografiche per consentire la visualizzazione di *film* e proiezioni in 3D, presentano lenti di colore complementare (una blu ed una rossa) per generare l'illusione della tridimensionalità. In genale, gli altri sistemi di visualizzazione stereo 3D si distinguono in *passivi*, se ricorrono a filtri (di colore o polarizzati) applicati alle immagini da visualizzare e riproposti invertiti nelle lenti – come gli occhiali anaglifici, pocanzi descritti, o le lenti polarizzate –, e *attivi*, se invece utilizzano degli otturatori e un sistema di elaborazione – vengono proiettate in sequenza alternata e repentina le immagini destinate all'occhio destro con occlusione dell'occhio sinistro e viceversa –.

<sup>287</sup> Un solido modellato attraverso superfici poligonali, ad esempio, richiede tempi più lunghi di *renderizzazione* rispetto allo stesso solido (parità di forma e dimensioni) costruito con modellazioni tradizionali per estrusioni, in quanto la *mesh* è generalmente costituita da un numero maggiore di elementi da assoggettare alla computazione grafica.



Fig. A.14 – *Cardboard* di *Google*: dispositivi di supporto per visualizzazione stereoscopica attraverso *smartphone*.

Fonte:

<https://arvr.google.com/cardboard/>

Come visto anche per i dispositivi AR, infatti, altri aspetti da considerare sono ad esempio il *tracking* dell'HMD oltre che dei dispositivi di *input* e controllo necessari nella VR al fine di garantire l'interattività con la scena virtuale.

Un approccio alternativo agli HMD VR è dato dai visori che fungono da supporto per dispositivi *mobile* (generalmente uno *smartphone*). Questi in pratica, sono dei veri e propri contenitori dotati di lenti che emulano il funzionamento dell'HMD, ma gravano sullo *smartphone* per la *renderizzazione* e l'esecuzione della scena VR. Di conseguenza, i parametri di FoV, risoluzione, *refresh rate* e *frame rate* sono relazionati al dispositivo *mobile* e, come accade per l'HMD, le caratteristiche prestazionali possono influire sugli stessi. Mentre l'IPD e la distanza dallo schermo, dipendenti dalle proprietà fisiche del visore perché legate alla posizione delle lenti, non sempre possono essere regolate.

L'ampia e repentina diffusione di tali dispositivi – la cui ideazione si deve a *Google* con il *Cardboard* (2014)<sup>288</sup> (fig. A.14) – è dovuta a diversi fattori che riguardano in particolar modo la semplicità di utilizzo e la possibilità di costruire un progetto di VR senza limitazioni derivanti dall'utilizzo di un HMD specifico, con enormi vantaggi per la replicabilità del progetto di fruizione su dispositivi anche molto diversi tra loro. A ciò si aggiunge lo sviluppo tecnologico che ha interessato il settore degli *smartphone*, che nell'ultimo ventennio ha portato a strumenti altamente performanti, dotati di una sensoristica che ben si presta all'esecuzione delle diverse forme di fruizione XR.

---

<sup>288</sup> L'anno seguente (2015) una seconda versione consente, attraverso un tasto magnetico, di interagire seppur limitatamente con la scena visualizzata, mentre è del 2016 la versione *Daydream View* che presenta caratteristiche fruibili maggiori, vista l'integrazione dedicata con *smartphone* più performanti, e una piattaforma dedicata. L'immissione sul mercato dei dispositivi *Google* ha lanciato un nuovo modo di considerare le fruizioni VR, tanto da indurre lo sviluppo di diversi HMD basati sulla stessa logica di visualizzazione, che si differiscono non solo per materiali, forma ed ergonomia del dispositivo, ma anche per il tipo di lenti che montano (aspetto cruciale per limitare i fastidi derivanti dalla riflessione tra schermo dello *smartphone* e lenti dell'HMD).

È chiaro che l'esperienza e le sensazioni percepite durante l'esecuzione della scena VR, se paragonate tra loro, portano a considerazioni maggiormente favorevoli per HMD come *Oculus* e *HTC Vive*, piuttosto che per quelli strutturati sul sistema *Cardboard*. Ma allo stesso modo, va sottolineato che l'elevata presenza di *smartphone* congiunta all'economicità del sistema, consente di avere un dispositivo VR alla portata di tutti.

- **Fattori determinanti la visualizzazione delle immagini con i dispositivi HMD**

Come anticipato, la fruizione mediante dispositivi HMD è fortemente influenzata da diversi fattori – intrinseci ed estrinseci del visore –, con conseguenze talvolta negative sull'esecuzione della stessa, oltre che sulla visualizzazione dei contenuti.

Il FoV e la risoluzione delle lenti sono legati alla struttura dell'HMD, mentre *refresh rate* e *frame rate* dipendono dalle proprietà di elaborazione dello stesso o dell'unità esterna interessata ad eseguire il tipo di fruizione. La IPD e le differenze nella messa a fuoco dell'immagine, invece, sono variabili non gestibili aprioristicamente, poiché dipendenti dall'utente che indossa l'HMD. Per cui necessitano di essere calibrate di volta in volta in funzione delle specifiche caratteristiche oculari.

In estrema sintesi, il FoV rappresenta l'ampiezza del campo visivo – o larghezza angolare –, ovvero l'estensione areale (espressa in gradi) di quanto viene osservato dall'occhio umano, da una camera fotografica o, in questo caso, proiettato da un *display*. Gli attuali HMD non consentono di replicare appieno il FoV dell'occhio umano (circa 180° - 200° in orizzontale, con 120° di sovrapposizione binoculare, e circa 130° in verticale), ma limitano la loro estensione a circa 110° - 130°, influenzando sulla percezione di *immersività* che viene avvertita, poiché, di fatto, risulta inferiore a quella umana (fig. A.8). Affinché l'informazione sulla visuale consentita dall'HMD sia corretta, il FoV va correlato alla sovrapposizione stereoscopica che il dispositivo consente. Questa è specifica per ogni HMD e, in generale, è necessario che non sia inferiore ai 30° altrimenti

viene a mancare la visione stereoscopica e la percezione di tridimensionalità della scena visualizzata.

La risoluzione delle lenti dell'HMD incide, invece, sulla qualità grafica (nitidezza e definizione) delle immagini visualizzate e, di conseguenza, sull'esito della fruizione. Nello specifico, una bassa risoluzione può comportare lo *screen door effect* (SDE) – altrimenti detto effetto zanzariera – in seguito al quale si ha la percezione di visualizzare la griglia di *pixel* che definisce l'immagine e la perdita di definizione negli oggetti più piccoli. Poiché la distanza tra i *pixel* è inversamente proporzionale alla risoluzione, maggiore sarà la risoluzione delle lenti dell'HMD, più compatti saranno i *pixel* e, di conseguenza, minore sarà l'effetto SDE – e viceversa –. L'SDE è correlato anche al tipo di contenuto che viene proiettato dallo schermo – immagini di colore chiaro e uniforme tendono a far emergere maggiormente la griglia di *pixel* rispetto a un'immagine scura o multicolore – e alla sensibilità ottica dell'utente – a parità di contenuti e con lo stesso dispositivo di visualizzazione, infatti, possono essere rilevati SDE differenti –.

Il *refresh rate* o frequenza di aggiornamento, rappresenta il numero di volte, rapportato al secondo, che un'immagine (anche la stessa) viene *renderizzata* sul *display* dell'HMD. Differentemente il *frame rate* indica il numero di immagini visualizzate al secondo. Entrambi, quindi, dipendono dalla velocità di *renderizzazione* – numero di *frame* generati al secondo (fps) – e sono influenzati dalle prestazioni *hardware* e *software* del processore associato all'HMD. Valori alti di *refresh rate* e *frame rate* danno fluidità alla scena – la sequenza di immagini viene percepita come video –, limitando l'insorgenza del *motion sickness*.

La IPD rappresenta la distanza che intercorre tra i centri delle pupille dei due occhi. È espressa in millimetri, varia da persona a persona (età, sesso ed etnia) ed è dinamica poiché è relazionata alla lontananza dell'oggetto che si sta guardando. Dalla quantità di variabili da cui dipende, dunque, ne consegue che tale distanza può assumere valori differenti, sebbene rientrati in *range* prestabiliti. Di conseguenza, è necessario che la IPD

dell'HMD – intesa come distanza tra il centro delle lenti – sia regolabile e (pressoché) coincidente con quella dell'utente.

Analogamente accade per la messa a fuoco dell'immagine che, come è noto, dipende da due fattori principali la vergenza e l'accomodazione. La prima indica il movimento simultaneo degli occhi nell'indirizzare l'asse visivo verso un punto dell'oggetto: in base alla distanza di quest'ultimo, gli occhi convergono verso l'interno (oggetto vicino) o divergono verso l'esterno (oggetto distante). L'accomodazione, invece, rappresenta la diversa contrazione del cristallino per la reale messa a fuoco dell'oggetto alle varie distanze. Poiché il FoV degli HMD è inferiore a quello dell'occhio umano, quando si visualizza la scena attraverso le lenti, si generano conflitti tra vergenza e accomodazione. Questi sono dovuti, appunto, dalla necessità di mettere a fuoco oggetti in posizioni diverse (vergenza variabile), mantenendo una distanza fissa dello schermo (accomodazione costante), generalmente inferiore a quella naturale per l'occhio umano.

Al fine di limitare gli effetti negativi derivanti da una visualizzazione non del tutto corretta, gli HMD sono dotati di strumenti fisici (tasti e rotelle di scorrimento) che consentono di gestire sia la distanza delle lenti, per simulare la IPD dell'utente, che dello schermo (avanti e indietro) per favorire la corretta messa a fuoco delle immagini proiettate. La regolazione manuale dell'HMD può essere sostituita da processi automatizzati di *eye tracking*<sup>289</sup> laddove i dispositivi siano predisposti a supportarli. Oltre a individuare le caratteristiche di visione dell'utente che sta fruendo del sistema, l'*eye tracking* consente un coordinamento migliore dell'interattività

---

<sup>289</sup> Capta, in pratica, i movimenti oculari e definisce su quale punto dello spazio virtuale e/o su quale oggetto si sofferma lo sguardo dell'utente, attraverso analisi monoculari e binoculari. L'*eye tracking* presenta diversi campi applicativi, metodologie perfezionate nel corso degli anni e strumentazioni sempre meno invasive; ciononostante, è ancora un ambito di sperimentazione aperto. Attualmente, si distingue in *passivo* e *attivo* in funzione se la mappatura viene restituita mediante elaborazione delle risposte ottiche alle sollecitazioni prodotte da sorgenti luminose (Kreder et al., 2017).

della scena e una *renderizzazione* finalizzata a restituire un’alta qualità alla sola porzione di *display* che l’utente sta guardando – *foveated rendering*<sup>290</sup> –, con conseguente ottimizzazione del processo computazionale.

### A.2.2 *Hand Help/Held Display (HHD)*

Rientrano nella classificazione HHD tutti dispositivi *mobile* di visualizzazione da tenere in mano – *display* portatili –, come *smartphone*, palmari e *tablet*. Per loro natura, sono destinati alla sola AR poiché l’applicazione alle altre forme di fruizione XR comporterebbe di fatto la mancanza di *immersività* e *interattività* che le connota. Ma l’associazione con componenti specifici, come HMD di tipo *Cardboard*, consente di utilizzarli anche per le visualizzazioni VR.

Le fruizioni AR mediante dispositivi HHD sono basate sulla tipologia *video see-through* e un sistema di *tracking* ibrido dato dall’integrazione di processi ottici (con prevalenza dei sistemi *marker based*) con i sensori di localizzazione presenti nel dispositivo *mobile*.

Sebbene le prestazioni non siano equiparabili per grafica, campo visuale e gestione del sistema agli HMD o agli *Spatial Displays* – l’utente è limitato nei movimenti poiché legati alla manipolazione del *device* –, l’ampia diffusione degli HHD, congiuntamente alle caratteristiche sempre più performanti degli stessi, ha portato allo sviluppo e all’applicazione di numerosi progetti AR. Infatti, il progresso tecnologico avvenuto negli ultimi vent’anni, li ha interessati sia dal punto di vista computazionale che

---

<sup>290</sup> La *renderizzazione* dinamica si basa sul fenomeno per il quale l’occhio umano visualizza immagini di alta qualità solo in corrispondenza del centro del campo visivo (fovea), lasciando le porzioni periferiche poco definite. La replica delle modalità di funzionamento della vista consente di ottimizzare e velocizzare la *renderizzazione* della scena e può essere ottenuta mediante processi computazionali, con i quali il sistema individua l’area da rendere a qualità maggiore, o con *display* foveali. Questi ultimi, in particolare, sono costituiti da un doppio schermo, uno per visualizzare le immagini da assoggettare alla visione periferica, l’altro, di dimensioni più contenute e mobile, per la visualizzazione delle immagini ad una qualità maggiore. È chiaro che, dal punto di vista dell’onere computazionale, i *display* foveali incidono meno sull’intero sistema.

per gli strumenti presenti di *default*, con fotocamere ad altissime risoluzioni e sensori vari (posizione, orientamento e inerziali) che agevolano l'acquisizione e la visualizzazione dei contenuti AR. A ciò vanno aggiunti aspetti quali la semplicità, la versatilità e la trasportabilità del sistema, oltre che l'interesse da parte di un numero sempre crescente di utenti verso applicazioni legate non solo alla sfera ludica e dell'*entertainment*, ma anche a quella culturale, educativa e informativa.

### A.2.3 *Spatial Display*

Nella categoria degli *Spatial Displays* sono racchiusi i dispositivi fisici di proiezione che, insieme a camere, schermi, *marker*, sensoristica di tracciamento, etc., consentono l'esecuzione di progetti XR senza necessariamente ricorrere ad HMD e HHD per la visualizzazione della scena aumentata e/o virtuale. Sebbene comportino la predisposizione di ambienti dedicati in cui integrare l'intero sistema, la semplicità di utilizzo degli *Spatial Displays*, l'ampio campo visivo che consentono di ottenere – totale in alcuni casi – e la possibilità di creare fruizioni di gruppo o attività collaborative in cui gli utenti condividono la medesima esperienza, ha favorito lo sviluppo di diverse applicazioni in settori come quello museale, formativo, artistico, medico, industriale, etc. È chiaro che, la proiezione vera e propria dell'immagine – un unico proiettore per immagini 2D, due o più per simulazioni 3D –, oltre che la sua gestione, è fortemente influenzata dalla superficie su cui avviene (schemi piatti o curvi, geometrie regolari o irregolari, oggetti statici o dinamici, presenza di luce naturale o artificiale, etc.).

Nella AR (Cortes et al., 2018), gli *Spatial Displays* sfruttano approcci analoghi alle visualizzazioni *optical* e *video see-through*, implementati dalla *direct augmentation*, una terza tipologia che non prevede schermi di proiezione ma la visualizzazione delle immagini digitali direttamente sugli oggetti reali. In quest'ultimo caso, in particolare, la mappatura avviene attraverso sistemi di controllo ottico affinché vi sia l'esatta corrispondenza

anche in condizioni di dinamicità dell'oggetto reale. È chiaro che le caratteristiche intrinseche dell'oggetto su cui avviene la proiezione, in particolar modo per la riflettanza del materiale e il colore delle superfici, possono influire sulla qualità della stessa.

Nelle applicazioni *see-through*, invece, il sistema è fisso e si basa su schermi, nel caso delle proiezioni *video*, o sull'ambiente, per le proiezioni *optical*, adattando l'immagine agli oggetti reali presenti nello stesso. Analogamente ai sistemi *direct augmentation*, anche in quest'ultima tipologia di fruizione è necessaria la conoscenza preventiva dell'oggetto su cui eseguire la proiezione, mediante ricostruzioni tridimensionali, al fine di calibrare correttamente la sovrapposizione dei contenuti digitali.

Nella VR, invece, la definizione *Spatial Displays* identifica nello specifico il CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*) (fig. A.15), un'ambiente costituito completamente da schermi di proiezione in cui l'utente viene isolato dal contesto in cui si trova.

Differentemente dalle tecnologie viste finora, il CAVE introduce la possibilità di non limitare il campo visuale ai 110° - 130° previsti dai tradizionali HMD e di condividere l'esperienza con altri utenti. Ma la

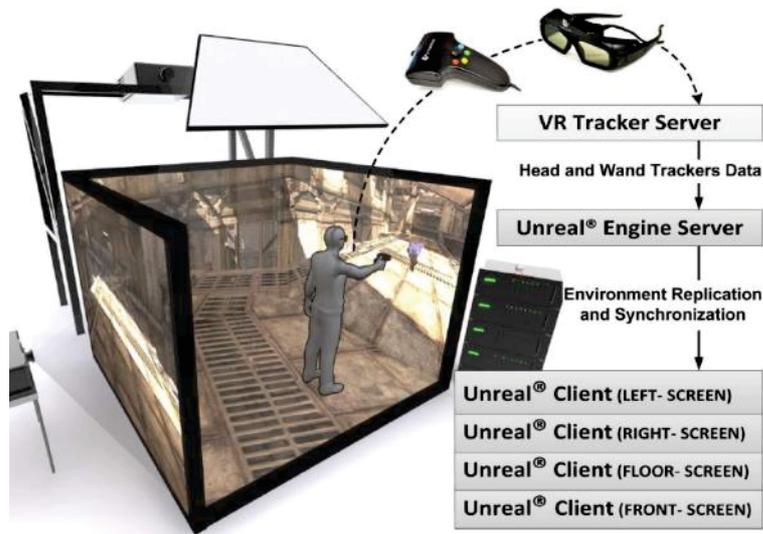


Fig. A.15 – Progettazione di un sistema di fruizione CAVE.

Fonte: Lugin et al., 2013

necessità di calibrare il contenuto della proiezione in funzione delle diverse visuali in *real time* è un'operazione complessa, sia per la sensoristica di *tracking*<sup>291</sup> da utilizzare, che per il processo computazionale per il carico informativo che deve gestire.

Tale aspetto, congiunto alle implicazioni tecniche e formali del sistema – eccessive dimensioni, fragilità degli schermi di proiezione, configurazioni *software* e *hardware* specifiche, etc. –, oltre che quelle economiche per la sua realizzazione, rendono il sistema CAVE meno applicato rispetto agli altri dispositivi di visualizzazione VR.

### A.3 Sistemi di *input*

La gestione dell'interazione con il progetto di fruizione e con i contenuti ad esso associati – *human-computer/machine interaction* (HCI, HMI)<sup>292</sup> – è mediata all'uso di dispositivi di *input* e, più in generale, dalle *user interfaces*. Queste, lette le trasformazioni indotte dall'utente (navigazione nella scena, selezione e manipolazione di oggetti, gestione dei menù, etc.), le comunicano alla componente di elaborazione che provvede, a sua volta, ad aggiornare in *real time* la scena in esecuzione attraverso la correzione

---

<sup>291</sup> Spesso, infatti, le variazioni della scena virtuale sono legate ad un unico utente di riferimento, che, mappato dai dispositivi di *tracking*, ne consente l'aggiornamento in relazione alla sua visuale.

<sup>292</sup> Le prime forme di HCI/HMI basavano su comandi alfanumerici da tastiera – *Command Line Interface* (CLI) – e sintassi di programmazione, la gestione degli *input* impartiti ai primi calcolatori elettronici degli anni '70. Ma la necessità di ottenere delle soluzioni *user friendly* portò, in meno di un decennio, alla definizione di nuovi sistemi basati su rappresentazioni grafiche – *Graphical User Interface* (GUI) – che, attraverso la manipolazione visiva e l'uso di *mouse* o puntatori, permettevano una più facile e immediata interazione col *computer*, poiché non era più necessario possedere conoscenze informatiche. *Windows, Icons, Menus e Pointer* (WIMP) sono le componenti principali di un sistema GUI, che insieme al concetto di *direct manipulation* (DM) consentono all'utente di inviare *input* al sistema e visualizzare l'*output* grafico-visivo direttamente sullo schermo.

degli *output* visivi, uditivi e tattili. La coerenza tra azione e risposta rende l'ambiente digitale realistico e congruente con quello reale e, dunque, particolare attenzione va posta nella scelta dell'*input* da implementare nel sistema. Molteplici, infatti, sono gli strumenti che regolano l'interattività della fruizione, con funzioni specifiche in alcuni casi, mentre in altri, la flessibilità nella personalizzazione del *device* consente di adattarli a diverse esigenze. Ma non c'è solo l'aspetto tecnologico a cui guardare; caratteristiche fisiche del dispositivo – conformazione, ergonomia, materiali, semplicità nell'uso, etc. – e implicazioni legate al tipo di fruizione XR da impostare – ad esempio nelle applicazioni *hands free* – impongono di individuare le modalità e gli strumenti più idonei alla gestione dell'interazione che si vuole ottenere. È noto che, al fine di conseguire risultati soddisfacenti e creare esperienze *multisensoriali* e *multimodali*, è necessaria la combinazione delle diverse *user interfaces*, distinguibili per tipologia di dispositivo utilizzato e tipologia di *input/output* che utilizzano. Una prima definizione, quindi, concerne la determinazione dell'azione indotta e/o rilevata, ovvero se è attivata dall'utente sul sistema – *input attivo* – o, viceversa, se ne rappresenta la risposta di quest'ultimo – *input passivo* –. Esistono però alcuni dispositivi che, al contempo, possono fornire *feedback* all'utente – *input bidirezionali* – e rendere la fruizione ancora più coinvolgente innescando delle sensazioni di ritorno tattili, visive e uditive. Tale caratteristica è tipica delle tecnologie *aptiche* (*Haptic Interface*, HI), un complesso sistema di sensori – ricevitori e attuatori – che, oltre a mappare la gestualità della mano<sup>293</sup> e a consentire il controllo degli oggetti virtuali, esercitano sull'utente forze indotte che simulano caratteristiche o fenomeni reali come, ad esempio, ruvidità, attrito, durezza, temperatura,

---

<sup>293</sup> In generale, questo sistema di *input/output* può interessare le diverse parti del corpo fino all'interazione *full-body* mediante le *whole body motion haptic interface* (WBMHI). La complessità di un siffatto dispositivo, sia nelle caratteristiche fisiche che nell'aspetto configurazionale del sistema, però, ne impone ancora un uso limitato all'industria cinematografica – dove è ampiamente utilizzato – e all'ambito sportivo, mentre negli altri settori (medico, industriale, gaming, etc.) si predilige l'uso di tecnologie *aptiche* più semplici che interessano prevalentemente la mappatura degli arti.

vibrazione, etc. Sono, quindi, dispositivi atti alla determinazione cinestetica e tattile della fruizione, alcuni dei quali (guanti, esoscheletri e tute) prevedono anche che l'utente li indossi – dispositivi *wearable* –.

Accanto a ciò, analogamente a quanto avviene per gli HMD, le *user interfaces* sono relazionate alla modalità di connessione con l'intero sistema di fruizione, le quali possono prevedere la presenza di cablaggi o di sensori *wireless* e *bluetooth*.

Infine, si distinguono i diversi dispositivi in funzione dei DoF. Le prime applicazioni XR, infatti, facevano uso di *input* bidimensionali, ovvero *mouse*, tastiere, puntatori, *display touch*, etc. – tutt'ora integrati nelle diverse forme di fruizione, soprattutto quelle della tipologia *desktop* – che limitavano il *tracking* delle azioni dell'utente a soli 2 DoF (su/giù, destra/sinistra). Ad oggi, invece, grazie anche agli sviluppi del settore del *gaming*, diverse tecnologie sono state ideate al fine di implementare i DoF e pervenire a mappature complete.

La seconda classificazione, invece, è relativa alla tipologia di *input/output* – o metodo – che viene analizzato e trasmesso al sistema.

Le sperimentazioni tecnologiche che nell'ultimo ventennio hanno interessato il settore dell'HCI/HMI, hanno portato i diversi ricercatori ad interrogarsi sulle caratteristiche connotanti le *user interfaces*. In particolare, i temi dell'accessibilità e dell'usabilità dei diversi dispositivi hanno rivestito un ruolo primario nella progettazione degli stessi. La consapevolezza che la realizzazione di una tecnologia *user friendly*, basata sulla gestualità dell'essere umano e pensata come riduttore di complessità, ne avrebbe ampliato il campo di applicazione, ha portato quindi alla definizione delle *Natural User Interfaces* (NUI), dispositivi che supportano l'interattività con il sistema macchina con modalità altamente intuitive, tanto da far apparire il loro utilizzo come azioni naturali per l'utente. È noto che, i risultati ottenibili attraverso le NUI sono strettamente legati alla sensoristica presente nell'interfaccia e alla previsione dei possibili *input* derivanti dell'utente – sia come metodi di riconoscimento che implementazione del

*database* associato –, oltre che alla tipologia di utente e al contesto in cui vengono utilizzate.

Poiché l'interazione uomo-macchina può interessare l'utente con stimoli sensoriali diversificati, le NUI vengono ulteriormente suddivise in tre macro-categorie a seconda che interessano la vista – *vision/visual user interface* (VUI) –, il tatto – *tangible* e *touch user interface* (TUI) – e l'udito – *audio/vocal/voice/sound user interface* (AUI) – (Bachmann et al., 2018).

Nelle prime – VUI –, l'obiettivo del sistema è determinare gli *input* mediante l'analisi dello sguardo dell'utente e dei gesti che compie. A tal fine, è necessario ricorrere a camere per discernere il tipo di movimento effettuato (volontario/involontario, statico/dinamico) e calibrare, di conseguenza, gli *output*. In pratica, sfruttando gli stessi principi e la sensoristica dell'*optical* ed *eye tracking*, vengono analizzati mediante algoritmi di riconoscimento sia il corpo umano, suddividendolo in parti in base alla conformazione naturale – superiore (testa, braccia e mani) e inferiore (gambe e piedi) –, sia gli occhi nello specifico (direzione e movimenti involontari). Poiché la gestualità dell'uomo è strettamente correlata anche alle emozioni che prova durante la fruizione, particolare attenzione è posta all'individuazione dei movimenti involontari.

Alle *tangible user interfaces*, invece, è legato il concetto di manipolazione, ovvero la possibilità di utilizzare un oggetto reale per determinare le modalità di interazione con l'ambiente virtuale e i contenuti digitali che l'utente sta visualizzando. Le diverse periferiche di *input* utilizzate di *default* nelle fruizioni XR (*mouse*, tastiere, *controller*, *gamepad*, etc.), sebbene siano ampiamente consolidate nell'utilizzo e rispondano adeguatamente alla definizione delle TUI, in realtà non ne soddisfano in pieno il presupposto concettuale. Ad oggi, infatti, l'acronimo TUI viene utilizzato per riferirsi a qualsiasi oggetto reale (cubi, bacchette, penne, martelli, etc.), anche non prettamente ideato per rispondere allo specifico scopo di gestire l'interazione manuale. Affinché ciò sia possibile, è necessaria una corretta corrispondenza tra l'oggetto reale e l'oggetto – o azione – virtuale, integrando nel sistema di fruizione il metodo di *tracking* più adeguato. Se l'oggetto reale è caratterizzato da superfici interattive – *multi-touch screen* –

si è in presenza di una particolare forma di TUI che, a differenza delle precedenti, consente la manipolazione diretta degli oggetti digitali mediante il tocco, ovvero spostando mani e dita sulla superficie. I *multi-touch screen* sono ampiamente integrati negli attuali dispositivi digitali (*smartphone*, *smartwatch*, pc, pannelli espositivi, etc.) e, spesso, oltre a fornire gli *input* al sistema, consentono di visualizzare gli *output* dello stesso, conformandosi come dispositivi bidirezionali.

Nelle AUI l'interazione avviene impartendo comandi vocali al sistema. Sebbene ormai sia di uso quotidiano – gli assistenti vocali come *Siri* (*Apple*), *Google Assistant*, *Alexa* (*Amazon*), *Cortana* (*Microsoft*), etc., basano il loro funzionamento proprio sulle AUI –, tale tecnologia è la meno implementata nelle fruizioni XR per le ovvie difficoltà operative che comporta. Il riconoscimento vocale, infatti, è fortemente influenzato oltre che dai suoni di fondo come rumori e vento, anche dalla fonetica che caratterizza il linguaggio verbale, dalla velocità con cui vengono pronunciate le parole e dall'idioma dell'utente.

Infine, nella combinazione di metodi e strumenti, l'integrazione delle diverse *user interfaces* porta alla definizione di sistemi *collaborativi*, *multimodali* e *ibridi*. Questi si differenziano tra loro per le finalità, gli obiettivi e i risultati che consentono di ottenere, portando, rispettivamente, alla condivisione dell'esperienza di fruizione tra diversi utenti, anche in remoto – interfacce *collaborative* –, all'integrazione di più metodi come ad esempio le TUI con le AUI – interfacce *multimodali* – e a sfruttate appieno le potenzialità di ogni sistema utilizzato – interfacce *ibride* –.



## GLOSSARIO

**Allineamento grezzo:** processo di elaborazione che consente di sovrapporre due modelli tridimensionali mediante trasformazioni geometriche manuali (traslazioni, rotazioni, ridimensionamento di scala), individuazione di *features* (punti, linee e piani) e trasformazioni geometriche automatizzate.

**Allineamento raffinato:** processo di elaborazione automatizzato che consente di sovrapporre due modelli tridimensionali mediante analisi delle caratteristiche geometriche che questi presentano.

**AR (Augmented Reality):** metodologia di fruizione che prevede la sovrapposizione di contenuti digitali ad ambienti reali.

**AV (Augmented Virtuality):** sistema di fruizione XR che integra la realtà virtuale con contenuti o azioni reali.

**BIM (Building Information Modeling):** metodologia basata sulla costruzione di modelli digitali informativi per la gestione e il coordinamento delle attività legate all'intero ciclo di vita di un manufatto architettonico.

**DoF (Degree of Freedom):** gradi di libertà di un corpo determinati attraverso la definizione delle coordinate spaziali ( $x, y, z$ ) e angolari (*yaw, pitch, roll*).

**Confronto 3D:** metodo per la valutazione del grado di discostamento tra gli elementi che costituiscono modelli tridimensionali. Il processo può essere applicato tra nuvole di punti (confronto *cloud to cloud*) con la valutazione della divergenza tra i punti costituenti i modelli, tra nuvole di punti e *mesh* (confronto *cloud to mesh*), dove la valutazione è fatta in relazione al discostamento tra i punti e le superfici triangolari dei modelli poligonali, e, infine, tra due *mesh* (confronto *mesh to mesh*).

**Fotogrammetria digitale:** processo di elaborazione – automatizzato e semi-automatizzato – che consente di ottenere nuvole di punti a partire da immagini fotografiche.

**FoV (Field of View):** campo visivo o larghezza angolare, ovvero rappresenta la porzione areale di ciò che viene osservato dall'essere umano o proiettato su un dispositivo di visualizzazione.

**Frame rate:** numero di immagini visualizzate in un secondo su dispositivi di visione.

**H-BIM (Heritage/Historic - Building Information Modeling):** applicazione della metodologia BIM al patrimonio storico-architettonico.

**HHD (Hand/Help Display):** dispositivo di visualizzazione *mobile* non indossabile (*smartphone* e *tablet*)

**HMD (Head Mounted Display):** dispositivo di visualizzazione indossato dall'utente generalmente chiamato *visore*.

**HMD standalone:** dispositivo di visualizzazione che non necessita di collegamenti con sistemi esterni – assenza di cablaggi – poiché provvisti di una propria unità di elaborazione.

**HMD wired:** dispositivo di visualizzazione connessi a unità computazionali esterne mediante cablaggi.

**ICP (Iterative Closest Point):** algoritmo per eseguire processi di allineamento raffinati.

**ICT (Information and Communications Technology):** metodologie e tecnologie per la trasmissione, ricezione ed elaborazione di dati digitali.

**IFC (Industry Foundation Classes):** formato *open* per la condivisione di modelli BIM secondo *standard* e protocolli internazionali condivisi.

**Image-based:** metodologie e strumenti che consentono di acquisire informazioni morfo-geometriche e colorimetriche della realtà sfruttando tecnologie basate su sensori passivi e processi di fotogrammetria digitale.

**Immersività:** percezione di essere collocati in una realtà reale nonostante si stia fruendo di una realtà simulata, ricostruita o di pura fantasia, ovvero una realtà virtuale.

**Interattività:** possibilità di influenzare l'esecuzione del progetto di fruizione attraverso dispositivi che consentono l'interazione con il sistema, con l'ambiente virtuale e con gli oggetti che lo compongono.

**Inside-in:** sistema di *tracking* con sensoristica posta sul corpo dell'utente.

**Inside-out:** sistema di *tracking* con sensoristica posta sul dispositivo di visualizzazione utilizzato per la fruizione.

**IPD (Interpupillary distance):** distanza interpupillare, ovvero lo spazio che intercorre tra i centri delle pupille dei due occhi.

**LOA (Level of Accuracy):** livello di accuratezza del modello BIM rispetto ad un rilievo *reality-based*, ovvero definisce il grado di discostamento tra i due modelli 3D.

**LOD (Level of Development o Level of Model Detail):** livello di sviluppo, ovvero rappresenta la quantità e qualità minima di informazioni da rispettare nella caratterizzazione e *modellizzazione* dei componenti di un modello BIM.

**LOD (Level of Detail):** grado di semplificazione grafica necessaria per gestire la computazione di forme complesse e articolate.

**LOG (Level of Geometry):** livello di caratterizzazione geometrica degli *smart-objects* costituenti il modello BIM.

**LOI (Level of Model Information):** quantità e qualità del contenuto informativo associato agli *smart-objects* costituenti il modello BIM.

**LOIN (Level of Information Need):** livello di *modellizzazione* necessario da rispettare nella costruzione di un modello BIM; è dato dall'integrazione del LOG (*Level of Geometry*), del LOI (*Level of Model Information*) e del LOC (*Level of Documentation*).

**LOQ (Level of Quality):** indicizzazione della tipologia di fonte (diretta, indiretta e primaria) su cui si basa la costruzione del modello BIM.

**LOR (Level of Reliability):** livello di rispondenza geometrica e ontologica degli *smart-objects* costituenti il modello BIM alle componenti reali del manufatto architettonico rappresentato.

**Marker:** elemento o punto di riferimento noto utilizzato come supporto nelle elaborazioni *image-based*; analogamente, il *target* è utilizzato nelle acquisizioni *range-based* per unire più *scan position*.

**Meshing:** processo di costruzione di modelli poligonali a partire da nuvole di punti.

**Motion sickness:** disturbo psico-fisico che si genera durante le fruizioni XR quando l'utente percepisce incongruenze tra il movimento reale e quello virtuale.

**MR (Mixed Reality):** forma di fruizione mista che ibrida l'ambiente reale con quello virtuale contaminando il primo con elementi del secondo – v. AV (*Augmented Reality*) – o viceversa – v. AV (*Augmented Reality*) –.

**Multisensoriale:** coinvolgimento di più sensi durante l'esecuzione di un'attività.

**MVS (Multi-View Stereo):** algoritmo della *computer vision* che attraverso il processo di *dense matching* consente di intensificare il numero di punti omologhi individuati dall'SfM.

**NUI (Natural User Interfaces):** dispositivi di interazione progettati per essere utilizzati in modo naturale dall'utente.

**Nuvola di punti:** modello tridimensionale digitale della realtà ottenuto attraverso acquisizioni *range-based* e/o processi *image-based*; è costituito da punti caratterizzati da coordinate spaziali  $(x, y, z)$ , informazioni di colore e, in base alla strumentazione utilizzata, indice di riflettanza e andamento delle normali.

**Outside-in:** sistema di *tracking* con sensoristica posta nell'ambiente in cui avviene la fruizione.

**Point to point:** metodo di confronto 2D tra modelli tridimensionali basato sulla verifica dei valori delle coordinate di punti specifici.

**Presenza:** processo mentale di trasposizione in un determinato luogo e tempo.

**Range-based:** metodologie e strumenti che consentono di acquisire informazioni morfometriche e colorimetriche della realtà sfruttando tecnologie basate su sensori attivi.

**Reality-Based:** processi e tecnologie che ripropongono la realtà così come si presenta, documentandone lo stato di fatto attraverso modelli virtuali tridimensionali, ottenuti, ad esempio, con il *reverse engineering*, come nel caso dei rilievi *image-based* e *range-based*, o con operazioni di modellazione parametrica, procedurale, algoritmica, etc.

**Refresh rate:** frequenza di aggiornamento, è rapportata al secondo e rappresenta il numero di volte di *renderizzazione* di un'immagine.

**Renderizzazione:** restituzione di un modello 3D attraverso un'immagine 2D costruita mediante tecniche di *visual* e *grafic design*.

**SfM (Structure for Motion):** algoritmo che consente di individuare i punti omologhi tra due *frames*, calibrando e orientando in ambiente digitale la camera utilizzata per le acquisizioni fotografiche. Talvolta l'acronimo viene utilizzato anche per riferirsi ai *software* di fotogrammetria digitale automatizzata.

**Sistema di tracking:** insieme di dispositivi e sensori vari per la mappatura di ambienti, oggetti e persone; nelle fruizioni XR, in particolare, il sistema di *tracking* è utilizzato per la definizione della posizione e dell'orientamento della visuale dell'utente.

**Smart-object:** oggetti tridimensionali costituenti il modello BIM e rappresentativi delle componenti edilizie di un manufatto architettonico.

**Spatial Display:** dispositivi di visualizzazione basati sulla proiezione di immagini.

**Target:** v. *marker*.

**Telepresenza:** percezione contemporanea di ambienti reali e virtuali; si genera in fruizioni *semi-immersive* dove si ha contezza del dispositivo che media la fruizione dell'ambiente virtuale.

**Texturizzazione:** processo di proiezione di immagini (*texture*) sulla superficie di un modello tridimensionale per caratterizzarlo con le informazioni di colore.

**User interfaces:** sistemi per la gestione delle interazioni uomo-macchina.

**Videogrammetria:** metodologia di rilievo *reality-based* che consente di restituire una nuvola di punti a partire da una videoripresa; replica il processo di elaborazione fotogrammetrico integrando fasi di estrapolazione dei *frames* da assoggettare alla computazione.

**Visori see-through:** dispositivi di visualizzazione per fruizioni AR semi-immersive; in base al sistema definito e alle modalità di proiezione si dividono in *optical* e *video see-through*.

**VR (Virtual Reality):** tipologia di fruizione XR che prevede la visualizzazione e manipolazione di ambienti e oggetti totalmente costruiti in digitale.

**VRD (Virtual Retinal Display):** sistema di visualizzazione che prevede la proiezione dell'immagine direttamente sulla retina dell'occhio senza lenti o altri strumenti di filtro.

**XR (Extended-Reality):** insieme delle combinazioni e/o contaminazioni di ambienti, strutture e contenuti reali con quelli digitali.



**BIBLIOGRAFIA****BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO AL TESTO****Acquisizioni *reality-based***

AMORUSO G., MANTI A., 2016. *Un BIM per l'identità dei paesaggi urbani storici. Applicazioni integrate di rilievo per il patrimonio architettonico della Certosa di Bologna*, in *DisegnareCon*, vol. 9, n. 16, ISSN 1828-5961, pp. 17.1-17.7.

BESL P. J., MCKAY N. D., 1992. *A method for registration of 3d shapes*, in *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, edizioni IEEE, ISSN 1939-3539, vol. 14, n. 2, pp. 239–256.

BUONAMICI F., CARFAGNI M., FURFERI R., GOVERNI L., LAPINI A., VOLTE Y., 2018. *Reverse engineering modeling methods and tools: a survey*, in *Computer-Aided Design and Applications*, ISSN 1686-4360, vol. 15, n. 3, pp. 443-464.

CAMPI M., DI LUGGO A., MONACO S., SICONOLFI M., PALOMBA D., 2018. *Indoor and outdoor mobile mapping systems for Architectural surveys*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2, pp. 201-208.

CARDACI A., VERSACI A., 2012. *Documentare per conservare: l'uso delle nuove tecnologie per la conoscenza, la salvaguardia e la comunicazione del patrimonio culturale armeno*, in *DisegnareCon*, numero speciale DOCO 2012, ISSN 1828-5961, pp. 265-272.

## BIBLIOGRAFIA

- CHEN Y., TANG J., JIANG C., ZHU L., LEHTOMAKI M., KAARTINEN H., KAIJALUOTO R., WANG Y., HYYPPA J., HYYPPA H., ZHOU H., PEI L., CHEN R., 2018. *The Accuracy Comparison of Three Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Based Indoor Mapping Technologies*, in Sensors, edizioni MDPI, vol. 18, n. 3228, pp. 1-24.
- CHIKOFFSKY E. J., CROSS II J. H., 1990. *Reverse Engineering and Design Recovery: a Taxonomy*, in Software, edizioni IEEE, ISSN 1937-4194, vol. 7, n. 1, pp. 13-17.
- DE LUCA L., 2011. *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Dario Flacco Editore, ISBN 978-8-857-90070-4.
- DI LUGGO A., CAMPI M., REPOLA L., CERA V., SCANDURRA S., PULCRANO M., FALCONE M., 2019(a). *Evaluation of Historical Heritage documentation: reality based survey and derivative models*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W17, pp. 115-122.
- DI LUGGO A., PALOMBA D., SCANDURRA S., PULCRANO M., 2019(b). *Metodologie E-BIM per la digitalizzazione del patrimonio architettonico esistente*, in BIM VIEWS, esperienze e scenari, edizioni CUA - Coop. Univ. Athena, ISBN 978-8-8944-2451-5.
- DI SALVO F., LO BRUTTO M., MELI P., ORLANDO P., VILLA B., 2011. *Rilevamento e modellazione 3D del teatro antico di Palazzo Acreide. Problematiche nell'elaborazione e gestione dei dati laser-scanning*, in 15° Conferenza Nazionale ASITA, pp. 929-938.
- DOCCI M., MAESTRI D., 2009. *Manuale di rilievo architettonico ed urbano*, edizioni Laterza, ISBN 978-8-8420-9068-7.
- EL-HAKIM S. F., BERARDIN J. A., PICARD M., GODIN G., 2004. *Detailed 3D reconstruction of large-scale Heritage Sites with integrated techniques*, in Computer Graphics and Applications, edizioni IEEE, ISSN 0272-1716, vol. 24, n. 3, pp. 21-29.
- 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 digital photogrammetry terrestrial methodologies. Test site: an Architectural surface*, in Bretar F., Pierrot-Deseilligny M., Vosselman G. (a cura di), Proceedings of the workshop Laser scanning '09 : ISPRS vol. 38 prt 3/W8, 1-2 September 2009, Paris, France, pp. 43-48.
- GAIANI M., REMONDINO F., APOLLONIO F. I., BALLABENI A., 2016. *An advanced pre-processing pipeline to improve automated photogrammetric reconstructions of architectural scenes*, in Remote Sensing, vol. 8, n. 178.
- GOTTARDI C., GUERRA F., 2018. *Spherical images for Cultural Heritage: survey and documentation with the Nikon KM360*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2, pp. 385-390.

- GRUSSENMEYER P., LANDES T., VOEGTLE V., RINGLE K., 2008. *Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of Cultural Heritage Buildings*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVII/B5, pp. 213-218.
- HOLDENER D., NEBUKER S., BLASER S., 2017. *Design and implementation of a novel portable 360° stereo camera system with low-cost action cameras*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W8, pp. 105-110.
- HUANG J., WANG Z., GAO J., HUANG Y., TOWERS D. P., 2017. *High-Precision registration of Point Clouds Based on Sphere Feature Constraints*, in Sensors, vol. 17, n. 72.
- LANDES T., GRUSSENMEYER P., VOEGTLE V., 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, pp. 435-440.
- MASIERO A., FISSORE F., GUARNIERI A., PIRAGNOLO M., VETTORE A., 2017. *Comparison of low cost photogrammetric survey with TLS and Leica Pegasus Backpack 3D models*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W8, pp. 147-153.
- NICOTRA L., 2002. *La modellazione geometrica nel Reverse Engineering*, in Il Progettista industriale, Tecniche nuove, vol. 6, giugno 2002, vol. 7, luglio 2002.
- ONIGA V. E., BREABAN A. I., STATESCU F., 2018. *Determining the optimum number of Ground Control Points for obtaining high precision results based on UAS images*, in Proceedings, edizioni MPDI, ISSN 2504-3900, vol. 2(7), n. 352.
- PARIS L., 2010. *Quantità e qualità nell'utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell'architettura*, in X Congresso International Expresión Gráfica aplicada a la Edificación APEGA, pp. 283-293.
- PESCI A., CAPUTO T., 2015. *Studio per la verifica della bontà di allineamento delle scansioni da rilievo laser scanning: metodologia sperimentale TLS – FASE 1*, in Rapporti Tecnici INGV, vol. 296.
- PULCRANO M., SIMONA S., MININ G., DI LUGGO A., 2019. *3D Cameras acquisitions for the documentation of Cultural Heritage*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W9, pp. 639-646.
- 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 Belardi P. (a cura di), Riflessioni, l'arte del disegno, il disegno dell'arte, 41° Convegno Internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione, Congresso UID, Gangemi Editore, ISBN 987-88-492-3762-7, pp. 961-968.

TEPPATI LOSE' L., CHIABRANDO F., SPANÒ A., 2018. *Preliminary evaluation of a commercial 360 multi-camera rig for photogrammetric purposes*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2, pp. 1113-1120.

TUCKER C., 2002. *Testing and verification of the Accuracy of 3D laser scanning data*, in ISPRS Proceedings of Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, vol. XXXIV, part 4.

VOLTOLINI F., REMONDINO F., PONTIN M., GIRARDI S., RIZZI A., GONZO L., 2006. *Integrazione di fotogrammetria e laser scanner per la documentazione di Beni Culturali*, in 10° Conferenza Nazionale ASITA, pp. 1869-1874.

### **Modelli informatizzati per la rappresentazione digitale 3D del patrimonio costruito**

AMORUSO G., MIRONENKO P., 2019. *Heritage BIM descriptive models for the representation of resilient city. The case of Amatrice's reconstruction*, in Belardi P. (a cura di), *Riflessioni, l'arte del disegno, il disegno dell'arte*, 41° Convegno Internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione, Congresso UID, Gangemi Editore, ISBN 987-88-492-3762-7, pp. 1051-1056.

APOLLONO F., GAIANI M., ZHENG S., 2012. *BIM-based modeling and data enrichment of Classical Architectural Buildings*, in SCIRES-IT SCIENTIFIC RESEARCH and Information Technology, edizioni CASPUR-CIBER, ISSN 2239-4303, vol. 2, n. 2, pp. 41-62.

BANFI F., CHOW L., REINA ORTIZ M., OUMET C., FAI S., 2018, *Building Information Modeling for Cultural Heritage: The Management of Generative Process for Complex Historical Buildings*, in Ioannides M. (a cura di), *Digital Cultural Heritage. Lecture Notes in Computer Science*, edizioni Springer Cham, ISBN 978-3-319-75825-1, vol. 10605, pp. 119-130.

BARAZZETTI L., BANFI F., BRUMANA R., GUSMEROLI G., ORENI D., PREVITALI M., RONCORONI F., SCHIANTARELLI G., 2015. *BIM from laser clouds and finite element analysis: combining structural analysis and geometric complexity*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-5/W4, pp. 345-350.

BIANCHINI C., INGLESE C., IPPOLITO A., 2016. *Il contributo della Rappresentazione nel Building Information Modeling (BIM) per la gestione del costruito / The role of BIM (Building Information Modeling) for representation and managing of built and historic artifacts*, in DisegnareCon, ISSN 1828-5961, vol. 9, n. 16, pp. 10.1-10.9.

BIANCHINI C., NICASTRO S., 2018. *La definizione del level of Reliability. Un contributo alla trasparenza dei processi di Historic-BIM*, in DN – Building Information Modeling, Data & Semantics, edizioni DEI, ISSN 2610-8755, vol. 2, pp. 45-59.

BOLPAGNI M., 2016. *The many faces of 'LOD'*, in BIM ThinkSpace.

BRUMANA R., DELLA TORRE S., PREVITALI M., BARAZZETTI L., CANTINI L., ORENI D., BANFI F., 2018. *Generative HBIM modelling to embody complexity (LOD, LOG, LOA, LOI): surveying, preservation, site intervention – the Basilica di Collemaggio (L'Aquila)*, in Applied Geomatics, Edizioni Springer, ISSN 1866-9298, vol. 10, pp. 545-567.

BRUMANA R., BANFI F., CANTINI L., PREVITALI M., DELLA TORRE S., 2019. *HBIM level of detail-geometry-accuracy and survey analysis for architectural preservation*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W11, pp. 293-299.

BRUNO N., RONCELLA R., 2019. *HBIM for Conservation: A New Proposal for Information Modeling*, in Remote Sensing, vol. 11, n. 15.

CARNEVALI L., LANFRANCHI F., RUSSO M., 2019. *Built Information Modeling for the 3D reconstruction of Modern railway Stations*, in Heritage, edizioni MDPI, ISSN 2298-2310, vol. 2, pp. 2298-2310.

CENTOFANTI M., BRUSAPORCI S., MAIEZZA P., 2016. *Tra "Historical BIM" ed "Heritage BIM: Building Information Modeling per la documentazione dei beni architettonici"*, in Parrinello S., Besana D. (a cura di), ReUSO 2016. Contributi per la documentazione, conservazione e recupero del Patrimonio Architettonico e per la tutela paesaggistica, edizioni Edifir, ISBN 978-88-797-0816-6, pp. 42-51.

CHIABRANDO F., LO TURCO M., RINAUDO R.F., 2017. *Modeling the decay in an HBIM starting from 3d point clouds. A followed approach for Cultural Heritage knowledge*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W5, pp. 605-612.

CRESTI S., 2016. *Un dubbio "scientifico": modellare o modellizzare?*, Accademia della Crusca.

CROCE V., CAROTI G., PIEMONTE A., BEVILACQUA M. G., 2019. *Geomatics for Cultural Heritage conservation: integrated survey and 3D modeling*, in International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Proceedings, edizioni IMEKO, ISBN 978-92-990084-5-4, pp. 271-276.

DILUGGO A., SCANDURRA S., PULCRANO M., SICONOLFI M., MONACO S., 2018. *Sistemi volti nei processi cloud to BIM*, in Empler T., Valenti G. M. (a cura di) 3D Modeling&BIM Nuove Frontiere, edizioni DEI, ISBN 978-88-496-1941-6, pp. 162-177.

DI LUGGO A., PALOMBA D., SCANDURRA S., PULCRANO M., 2019(b). *Metodologie E-BIM per la digitalizzazione del patrimonio architettonico esistente*, in BIM VIEWS, esperienze e scenari, edizioni CUA - Coop. Univ. Athena, ISBN 978-8-8944-2451-5.

DORE C., MURPHY M., 2017. *Current state of the art Historic Building Information Modelling*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W5, pp. 185-192.

## BIBLIOGRAFIA

EMPLER T., 2018. *Procedura di Information Modeling per rappresentare un territorio colpito dal sisma*, in Disegno, edizioni UID Unione Italiana per il Disegno, ISSN 2533-2899, vol. 2, pp. 147-156.

FAI S., RAFEIRO J., 2014. *Establishing an appropriate Level of Detail (LOD) for a Building Information Model (BIM) – West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada*, in ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. II-5, pp. 123-130.

MAIETTI F., DI GIULIO R., MEDICI M., FERRARI F., ZIRI A. E., TIRULLAZZI B., BONSMÀ P., 2019. *Documentation, Processing, and Representation of Architectural Heritage Through 3D Semantic Modeling: The INCEPTION Project*, in Bolognesi C. M., Santagati C., Impact of Industry 4.0 on Architecture and Cultural Heritage, edizioni IGI Global, ISBN 978-17-998-1236-4, pp. 202-238.

MAIETTI F., FERRARI F., 2018. *Rilievo, documentazione, modellazione semantica. Nuovi approcci metodologici per il patrimonio culturale*, in Paesaggio Urbano / Urban Design, ISSN 1120-3544, vol. 4.2018 Dicembre, pp. 89-97.

MAIEZZA P., 2019. *As-built reliability in architectural HBIM modeling*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W9, pp. 461-466.

MAROTTA A., LO TURCO M., 2014. *Modellazione 3D, ambienti BIM, modellazione solida per l'Architettura e i Design*, in ROSSI M., CASALE A. (a cura di), Uno (nessuno) centomila | prototipi in movimento. Trasformazioni dinamiche del disegno e nuove tecnologie per il design, Maggioli Editore, ISBN 978-88-916-0449-1, pp. 53-60.

MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S., 2009. *Historic building information modelling (HBIM)*, in Structural Survey, ISSN 0263-080X, vol. 27, n.4, pp. 311–327.

MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S., 2013. *Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture*, in ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 76, pp. 89–102.

GARAGNANI S., 2012. *Building Information Modeling semantico e rilievi ad alta risoluzione di siti appartenenti al Patrimonio Culturale / Semantic Building Information Modeling and high definition surveys for Cultural Heritage sites*, in DisegnareCon, numero speciale DOCO 2012, ISSN 1828-5961, pp. 297-302.

GARAGNANI S., 2016. *I Livelli di Sviluppo (LOD) nel progetto digitalizzato. La misura dell'informazione all'interno del percorso BIM*, in Ingenio.

GARAGNANI S., MANFREDINI A. M., 2013. *Parametric accuracy: Building Information Modeling process applied to the Cultural Heritage preservation*, in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-5/W1, pp. 87-92.

LÓPEZ F. J., LERONES P. M., LLAMAS J., GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO J., ZALAMA E., 2018. *A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)*, in Multimodal Technologies and Interaction, ISSN 2414-4088, vol. 2, n. 21.

ORENI D., BRUMANA R., GEORGOPOULOS A., CUCA B., 2014. *HBIM Library Objects for Conservation and Management of Built Heritage*, in International Journal of Heritage in the Digital Era, vol. 3, n. 2, pp. 321-334.

PARIS L., WAHBEH W., 2016. *Rilievo e rappresentazione delle geometrie parametriche per l'H-BIM*, in DisegnareCon, ISSN 1828-5961, vol. 9, n. 16, pp. 12.1-12.9.

PAVAN A., DANIOTTI B., RE CECCONI F., LUPICA SPAGNOLO S., MALTESE S., CHIOZZI M., PASINI D., CAFFI V., 2014. *Gestione informativa delle costruzioni, INNOVance per il processo costruttivo*, in Esposito M. A., Ciribini A., Dell'Osso G., Daniotti B., Carbonari A., Alaimo G., Energy, sustainability and building information modelling and management, Maggioli Editore, ISBN 978-88-916-0436-1, pp. 15-33.

PAVAN A., MIRARCHI C., CAVALLO D., DE GREGORIO M., 2020. *Standard BIM, il mondo dopo la ISO 19650*, in Ingenio.

POCOBELLI D. P., BOEHM J., BRYAN P., STILL J., GRAU-BOVÈ J., 2018. *BIM for heritage science: a review*, in Heritage Science, edizioni Springer Nature, ISSN 2050-7445, vol. 6.

PREVITALI M., BANFI F., 2018. *Towards the Definition of Workflows for Automation in HBIM Generation*, in Ioannides M., Fink E., Brumana R., Patias P., Doulamis A., Martins J., Wallace M. (a cura di), Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. EuroMed 2018. Lecture Notes in Computer Science, edizioni Springer Cham, ISBN 978-30-300-1762-0, vol. 11196, pp. 52-63.

PREVITALI M., BARAZZETTI L., BANFI F., RONCORONI F., 2019. *Informative content models for infrastructure load testing management: the Azzone Visconti Bridge in Lecco*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W11, pp. 995-1001.

QUATTRINI R., PIERDICCA R., MORBIDONI C., 2017. *Knowledge-based data enrichment for HBIM: exploring high-quality models using the semantic-web*, in Journal of Cultural Heritage, vol. 28, pp. 129-139.

RODRÍGUEZ-MORENO C., REINOSO-GORDO J. F., RIVAS-LÓPEZ E., GÓMEZ-BLANCO A., ARIZA-LÓPEZ E. J., ARIZA-LÓPEZ I., 2016. *From point cloud to BIM: an integrated workflow for documentation, research and modelling of architectural heritage*, in Survey Review, pp. 1-20.

SCANDURRA S., PULCRANO M., TARANTINO C., DI LUGGO A., 2017. *Modellazione H-BIM e ricostruzione delle trasformazioni del costruito storico*, in DN – Building Information Modeling, Data & Semantics, edizioni DEI, ISSN 2610-8755, vol. 1, pp. 6-18.

TOLMER C. E., CASTAING C., DIAB Y., MORAND D., 2017. *Adapting LOD definition to meet BIM uses requirements and data modeling for linear infrastructures projects: using system and requirement engineering*, in Visualization in Engineering, vol. 5.

TUCCI G., BETTI M., CONTI A., CORONGIU M., FIORINI L., MATTA C., KOVACEVIC V. C., BORRI C., HOLBERG C., 2019. *BIM for museums: an integrated approach from the building to the collections*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W11, pp. 1089-1096.

VOLK R., STENGEL J., SCHULTMANN F., 2014. *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – literature review and future needs*, in Automation in Construction, vol. 38, pp.109-127.

### Comunicazione e *visual design* per il patrimonio costruito

ALQAHTANI A. S., DAGHESTANI L. F., IBRAHIM L. F., 2017. *Environments and system types of Virtual Reality technology in STEM: a survey*, in (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, ISSN 2156-5570, vol. 8, n. 6, pp. 77-89.

AMORUSO G., MIROENKO P., PERUZZETTO A., SALVETTI F., 2019. *Design Esperienziale per il Patrimonio Culturale. Un'applicazione partecipativa per il Museo Cola Filotesio di Amatrice*, in Paesaggio Urbano, Maggioli Editore, ISSN 1120-3544, vol. 1, pp. 90-99.

ANDREWS C., SOUTHWORTH M. K., SILVA J. N. A., SILVA J. R., 2019. *Extended Reality in Medical Practice*, in Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine, edizioni Springer Nature, ISSN 1534-3189, vol. 21, n. 4, pp. 1-12.

AZUMA R. T., 1997. *A Survey of Augmented Reality*, in Presence: Teleoperators and Virtual Environments, edizioni MIT Press, ISSN 1054-7460, vol. 6, n. 4, pp. 335-385.

BACHMANN D., WEICHERT F., RINKENAUER G., 2018. *Review of Three-Dimensional Human-Computer Interaction with Focus on the Leap Motion Controller*, in Sensor, edizioni MDPI, vol. 18, n. 7, pp.1-39.

BASSO A., 2017. *Advantages, Critics and Paradoxes of Virtual Reality Applied to Digital Systems of Architectural Prefiguration, the Phenomenon of Virtual Migration*, in Proceedings Immagini?, edizioni MPDI, ISBN 978-3-03842-681-3, vol. 1(9), n. 915.

BELTRAMINI G., GAIANI M., 2017. *PALLADIOLibrary – A growing virtualization project to understand Andrea Palladio's works*, in SCIENTIFIC RESEARCH and Information Technology, Caspur Ciber Editore, ISSN 2239-4303, vol. 7, n. 2, pp. 73-84.

BOLOGNESI C., AIELLO D., 2019. *The secrets of S. Maria delle Grazie: virtual fruition of an iconic milanese architecture*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W15, pp. 185-192.

- BRUDER G., STEINICKE F., ROTHHAUS K., HINRICHS K., 2009. *Enhancing Presence in Head-mounted Display Environments by Visual Body Feedback Using Head-mounted Cameras*, in International Conference on CyberWorlds, Bradford, West Yorkshire, UK, 7-11 September 2009.
- BRUDER G., STEINICKE F., VALKOV D., HINRICHS K., 2010. *Augmented Virtual Studio for Architectural Exploration*, in Proceeding of Virtual Reality International Conference (VRIC 2010).
- CAMPI M., DI LUGGO A., PALOMBRA D., PALOMBA R., 2019. *Digital surveys and 3D reconstructions for Augmented Accessibility of Archeological Heritage*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W9, pp. 205-212.
- CARMIGNIANI J., FURHT B., 2011. *Augmented Reality: An Overview*, in Furht B. (a cura di), Handbook of Augmented Reality, edizioni Springer-Verlag New York, ISBN 978-1-4614-0064-6, pp. 3-46.
- CAUDELL T. P., MIZELL D. W., 1992. *Augmented Reality: An Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes*, in Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences, edizioni IEEE, ISBN 0-8186-2420-5, pp. 659-669.
- CHINTHAMMIT W., SEIBEL E. J., FUMESS T. A., 2002. *Unique Shared-Aperture Display with Head or Target Tracking*, in Proceedings IEEE Virtual Reality 2002, ISSN 1087-8270, pp. 235-242.
- CIPRESSO P., CHICCHI GIGLIOLI I. A., ALCANIZ RAYA M., RIVA G., 2018. *The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: a network and cluster analysis of the literature*, in Frontiers in Psychology, vol. 9, pp. 1-20.
- CLINI P., FRONTONI E., QUATTRINI R., PIERDICCA R., 2014. *Augmented Reality Experience: From High-Resolution Acquisition to Real Time Augmented Contents*, in Advances in Multimedia, Hindawi Publishing Corporation, ISSN 1687-5680, vol. 2014, pp. 1-9.
- CORTES G., MARCHAND E., BRINCIN G., LECUYER A., 2018. *MoSART: Mobile Spatial Augmented Reality for 3D Interaction With Tangible Objects*, in Frontiers in Robotics and AI, ISSN 2296-9144, vol. 5, pp. 1-13.
- DEMIDOVA L., 2016. *Augmented Reality and ARToolkit for Android: the First Steps*, in SHS Web of Conferences, EEIA Education Environment for the Information Age, edizioni EDP Science, eISSN 2261-2424, vol. 29, pp. 1-4.
- DE PAOLIS L. T., 2012. *Applicazione Interattiva di Realtà Aumentata per i Beni Culturali*, in SCIRES-IT SCientific RESearch and Information Technology, edizioni CASPUR-CIBER, ISSN 2239-4303, vol. 2, n. 1, pp. 121-132.
- DRETTAKIS G., ROUSSOU M., ASSELOT M., RECHE A., OLIVIER A., TSINGOS N., TECCHIA F., 2007. *Participatory Design and Evaluation of a Real-World Virtual Environment for Architecture and Urban Planning*, in Presence: Teleoperators & Virtual Environments, edizioni MIT, ISSN 1054-7460, vol. 16, n. 3, pp. 318-332.

## BIBLIOGRAFIA

EMPLER T., 2015. *APP design con uso della realtà aumentata per la divulgazione dei Beni Culturali / APP design using augmented reality to disseminate Cultural Heritage*, in Disegnare Idee Immagini, Gangemi Editore, ISSN 2704-7105, n. 50, pp.60-69.

EMPLER T., 2019. *Mixed Virtuality in the communication of Cultural Heritage*, in Luigini A. (a cura di), EARTH 2018 Proceeding of the 1st International and Interdisciplinary Conference on Digital Environment for Education, Art and Heritage, edizioni Springer Nature, ISBN 978-3-030-12239-3, pp. 575-586.

FAST BERGLUND A., GONG L., LI D., 2018. *Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing*, in Procedia Manufacturing, ISSN 2351-9789, vol. 25, pp. 31-38.

FEINER S., MACINTYRE B., SELIGMANN D., 1993. *Knowledge-based. Augmented Reality*, in Communications of the ACM, vol. 36, n. 7, pp. 53-62.

FIASCONARO V., GUIDUCCI S., 2011. *Realizzazione di un Prototipo di Realtà Aumentata applicato ai siti archeologici*, in Bordoni L. (a cura di), Proceedings of AI&Cultural Heritage Workshop, ISBN 978-88-8286-261-9, pp. 39-47.

FREINA L., OTT M., 2015. *A literature review on immersive virtual reality in education: state of the art and perspectives*, in Proceedings of eLearning and software for education (eLSE), edizioni “CAROL I” National Defence University Publishing House, ISSN 2066-026X, pp. 133-141.

IPPOLITI E., MOSCATI A., 2012. *Interfacce e tecnologie visual 3D per conoscere, condividere e valorizzare il patrimonio culturale*, in DisegnareCon, numero speciale DOCO 2012, ISSN 1828-5961, pp. 45-54.

KREDEL R., VATER C., KLOSTERMANN A., HOSSNER E. J., 2017. *Eye-Tracking Technology and the Dynamics of Natural Gaze Behavior in Sports: A Systematic Review of 40 Years of Research*, in Frontiers in Psychology, vol. 8, pp. 1-15.

LUGRIN J. L., CAVAZZA M., CHARLES F., LE RENARD M., FREEMAN J., LESSITER J., 2013. *Immersive FPS Games: User Experience and Performance*, in ImmersiveMe 2013 - Proceedings of the 2nd International Workshop on Immersive Media Experiences, Co-located with ACM Multimedia 2013, ISBN 978-14-5032-397-0, pp. 7-12.

MANN S., HAVENS J. C., IORIO J., YUAN Y., FURNESS T., 2018. *All Reality: Values, taxonomy, and continuum, for Virtual, Augmented, eXtended/MiXed (X), Mediated (X, Y), and Multimeditated Reality/Intelligence*, in ArXiv.

MELZER J. E., BROZOSKI F. T., LETOWSKI T.R., HARDING T.H., RASH C. E., 2009. *Guidelines for HDM design*, in Rash C. E., Russo M. B., Letowski T. R., Schmeisser E. T., *Helmet-mounted Displays: Sensation, Perception, and Cognition Issues*, edizioni US Army Aeromedical Research Laboratory, ISBN 978-06-1528-375-3, pp. 807-848.

MILGRAM P., KISHINO F., 1994. *A taxonomy of Mixed Reality visual displays*, in IEICE Transactions on Information Systems, ISSN 1745-1361, vol. E77-D, n. 12, pp. 1-15.

- MORANDI S., TREMARI M., 2019. *Virtual Past. Interactive presentation of late Roman Towers (Archaeological Museum, Milan Italy)*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W11, pp. 887-893.
- MORI S., IKEDA S., SAITO H., 2017. *A survey of diminished reality: techniques for visually concealing, eliminating, and seeing through real objects*, in IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, edizioni SPRINGER, ISSN 1882-6695, vol. 9, n. 17.
- NEGES M., ADWERNAT S., ABRAMOVICI M., 2018. *Augmented Virtuality for maintenance training simulation under various stress conditions*, in Tracht K., Roy R., Tomiyama T. (a cura di), Procedia Manufacturing, ISSN 2351-9789, vol. 19, pp. 171-178.
- QUATTRINI R., PIERDICCA R., FRONTONI E., BARCAGLIONI R., 2016. *Virtual Reconstruction of Lost Architectures: from the TLS survey to AR visualization*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B5, pp.383-390.
- RAHAMAN H., TAN K. B., 2011. *Interpreting Digital Heritage: A Conceptual Model with End-User's Perspective*, in International Journal of Architectural Computing, edizioni Multi-Science Publishing, ISSN 1478-0771, vol. 9, n. 1, pp. 99-114.
- REGENBRECHT H., LUM T., KOHLER P., OTT C., WAGNER M., WILKE W., MULLER E., 2004. *Using Augmented Virtuality for Remote Collaboration*, in Precence, vol. 13, n. 3, pp. 338-354.
- ROSSI D., MESCHINI A., FERIOZZI R., OLIVIERI A., 2018. *Cose dell'altro mondo. La realtà virtuale immersiva per il patrimonio culturale*, in Luigini A., Panciroli C. (a cura di), Ambienti digitali per l'educazione all'arte e al patrimonio, edizioni Franco Angeli, ISBN 978-8-891-7733-3, pp. 240-256.
- ROUSSOU M., 2002. *Virtual Heritage: from the reserch lab to the broad public*, in *Virtual Archeology*, in Nicolucci F. (a cura di), Proceedings of the VAST Euroconferenze, edizioni Archeopressa, ISBN 1-8417-1454-2, pp. 93-100.
- RUBIO TAMAYO J. L., 2019. *Extended Reality, interactivity and immersive 3D Environments: literature review and projections*, in Actas Icono, vol. 14, n. 1, pp. 396-415.
- STEINICKE F., ROPINSKI T., HINRICHS K., MENSMANN J., 2006. *Urban city planning in semi-immersive virtual reality system*, in GRAPP Proceedings of the First International Conference on Computer Graphics Theory and Applicarions, edizioni INSTICC, ISBN 972-8865-39-2, pp. 192-199.
- STEUER J., 1992. *Defining Virtual Reality: Dimesions Determining Telepresence*, in Journal of Communication, ISSN 1460-2466, vol. 42, n. 4, pp. 73-93.

VLAHAKIS V., KARIGIANNIS J., TSOTROS M., GOUNARIS M., ALMEIDA L., STRICKER D., GLEUE T., CHRISTOU I. T., CARLUCCI R., IOANNIDIS N., 2001. *ARCHEOGUIDE: First results of an Augmented Reality, Mobile Computing System in Cultural Heritage Sites*, in Proceedings of the 2001 conference on Virtual Reality, Archeology, and Cultural Heritage VAST01, edizioni Association for Computing Machinery, ISBN 978-1-58113-447-6, pp. 131-140.

WANG P., WU P., WANG J., CHI H. L., WANG X., 2018. *A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training*, in International Journal of Environmental Research and Public Health, edizioni MDPI, ISSN 1660-4601, vol. 15, n. 6, pp. 1-18.

ZHOU F., DUH H. B. L., BILLINGHURST M., 2008. *Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: a review of ten years of ISMAR*, in International Symposium on Mixed and Augmented Reality, edizioni IEEE, ISBN 978-1-4244-2859-5, pp. 193-202.

### **L'Hospital Simón Ruiz attraverso i rilievi *reality-based***

ALSADIK B., GERKE M., VOSSelman G., 2015. *Efficient use of video for 3D modelling of Cultural Heritage objects*, in ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. II-3/W4, pp. 1-8.

GRUEN A., 1997. *Fundamentals of videogrammetry – A review*, in Human Movement Science, vol. 16, pp. 155-187.

SINGH S. P., JAIN K., MANDLA R., 2014. *3D Scene Reconstruction from Video Camera for Virtual 3D City Modeling*, in American Journal of Engineering Research (AJER), ISSN 2320-0847, vol. 3, n. 1, pp. 140-148.

SUN Z., ZHANG Y., 2019. *Accuracy evaluation of videogrammetry using a low-cost spherical camera for narrow Architectural Heritage: an observational study with variable baselines and blur filters*, in Sensors (Basel), vol. 19, n. 3.

TORRESANI A., REMONDINO F., 2019. *Videogrammetry VS Photogrammetry for Heritage 3D Reconstruction*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W15, pp. 1157-1162.

### **Il modello H-BIM dell'Hospital Simón Ruiz**

ADAMI A., SCALA B., SPEZZONI A., 2017. *Modeling and Accuracy in a BIM environment for planned conservation: the apartment of Troia of Giulio Romano*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W3, pp. 17-23.

BOLOGNESI C. M., 2018. *Rappresentare in 3D: il rilievo per un modello HBIM*, in Empler T., Valenti G. M. (a cura di), 3D Modeling&BIM Nuove Frontiere, edizioni DEI, ISBN 978-88-496-1941-6, pp. 146-161.

BRUMANA R., ORENI D., RAIMONDI A., GEORGOPOULOS A., BREGIANNI A., 2013. *From survey to HBIM for documentation, dissemination and management of built heritage. The case study of St. Maria in Scaria d'Intelvi*, in Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), edizioni IEEE, ISBN 978-1-4799-3169-9, pp. 497-504.

DOCCI M., 2009. *Disegno e analisi grafica con elementi di Storia dell'Arte*, Editori Laterza, ISBN 978-88-421-0915-0.

DOTTO E., 20019. *Introduzione all'analisi grafica. Una nota didattica*, edizioni ZETA PRINTING.

GARAGNANI S., 2013. *Building Information Modeling and real world knowledge. A methodological approach to accurate semantic documentation for the built environment*, in Digital Heritage 2013, edizioni IEEE, ISBN 978-1-4799-3169-9, pp. 489-496.

LO TURCO M., TONIN A., 2018. *Sistemi parametrico/ adattivi per l'edilizia storica. Alcuni casi esemplari di sistemi voltati*, in Empler T., Valenti G. M. (a cura di), 3D Modeling&BIM Nuove Frontiere, edizioni DEI, ISBN 978-88-496-1941-6, pp. 242-257.

ORENI D., 2013. *From 3D Content Models to HBIM for Conservation and Managment of Built Heritage*, in Murgante B., Misra S., Carlini M., Torre C. M., Nguyen H. Q., Taniar D., Apduhan B. O., Gervasi O. (a cura di), Computational Science and Its Applications. Lecture Notes in Computer Science, edizioni Springer, ISBN 978-3-642-39648-9, vol. 7974, pp. 344-357.

ORENI D., BRUMANA R., BANFI F., BERTOLA L., BARAZZETTI L., CUCA B., PREVITALI M., RONCORONI F., 2014. *Beyond crude 3D Models: from Point Clouds to Historical Building Information Modeling via NURBS*, in Digital Heritage, Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection, EuroMed 2014, edizioni Springer Cham, ISBN 978-3-319-13694-3, vol. 8740, pp 166-175.

QUATTRINI R., CLINI P., NESPICA R., RUGGERI L., 2016. *Misura e Historical Information Building: sfide e opportunità nella rappresentazione di contenuti 3D semanticamente strutturati*, in DisegnareCon, ISSN 1828-5961, vol. 9, n. 16, pp. 14.1-14.11.

SAMPIETRO F., MASCIOPINTO M. L., CINCOTTA I. W. J., BERGONZONI G., 2018. *Computational design nel processo HBIM*, in Empler T., Valenti G. M. (a cura di), 3D Modeling&BIM Nuove Frontiere, edizioni DEI, ISBN 978-88-496-1941-6, pp. 299-313.

SCANDURRA S., 2020. *La modellazione informativa del Patrimonio Architettonico. Sperimentazioni e processi cloud-to-BIM*, Aracne editrice, ISBN 978-88-255-3701-7.

### Applicazioni di *Virtual Reality*

BANFI F., BRUMANA R., STANGA C., 2019(a). *Extended Reality and informative models for the Architectural Heritage: from scan-to-BIM process to Virtual and Augmented Reality*, in *Virtual Archaeology Review*, edizioni Universidad Politecnica de Valencia, ISSN 1989-9947, vol. 10, n. 21, pp. 17-30.

BANFI F., BRUMANA R., ALJISHI A., AL SAYEH N., SANTANA QUINTERO M., CUCA B., ORENI D., MIDALI C., 2019(b). *Generative Modeling, Virtual Reality and HBIM interaction: immersive environment for Built Heritage: case study of Shaikh Isa Bin Ali House, Bahrain*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W11, pp. 149-157.

CHIONNA F., ARGESE F., PALMIERI V., SPADA I., COLIZZI L., 2015. *Integrazione di Building Information modeling e realtà aumentata per migliorare l'indagine di edifici storici*, in *Conservation Science in Cultural Heritage (CSCH)*, ISSN 1973-9494, vol. 15, pp. 149-163.

DAVIDSON J., FOWLER J., PANTAZIS C., SANNINO M., WALKER J., SHEIKHKHOSHOKAR M., RAHIMIAN F. P., 2020. *Integration of VR with BIM to facilitate real-time creation of bill of quantities during the design phase: a proof of concept study*, in *Frontiers of Engineering Management*, edizioni Springer, ISSN 2096-0255, vol. 7, pp. 396-403.

DIAO P. H., SHIH N. J., 2019. *BIM-Based AR Maintenance System (BARMS) as an intelligent instruction platform for complex plumbing facilities*, in *Applied Sciences*, edizioni MDPI, ISSN 2076-3417, vol. 9, n. 1592.

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., *Impact of Industry 4.0 on Architecture and Cultural Heritage*, edizioni IGI Global, ISBN 978-17-998-1236-4, pp. 20-48.

HERNÁNDEZ REDONDO J. I., 2016. *El panteón de Simón Ruiz y sus dos esposas: el retablo, las sculturas orantes y la reja*, in Sánchez del Barrio A. (a cura di), *Simón Ruiz mercader, banquero y fundador*, ISBN 978-84-608-7873-5.

JIANG S., JIANG L., HAN Y., WU Z., WANG N., 2019. *OpenBIM: an Enabling Solution for Information Interoperability*, in *Applied Sciences*, edizioni MDPI, ISSN 2076-3417, vol. 9, n. 24.

MITCHELL K., MURPHY M., 2019 (preprint). *Interactive timeline visualization with Game Engines and conceptual frameworks for disseminating Historic Architecture and Archaeology*.

NANDAVAR A., PETZOLD F., NASSIF J., SCHUBERT G., 2018. *Interactive Virtual Reality tool for BIM based on IFC. Development of OpenBIM and Game Engine based layout planning tool – a novel concept to integrate BIM and VR with bi-directional data exchange*, in Fukuda T., Huang W., Janssen P., Crolla K., Alhadidi K. (a cura di), *Learning, Adapting and Prototyping*, *Proceedings of the 23rd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2018*, edizioni CAADRIA, ISBN 978-98-819-0260-3, vol. 1, pp. 453-462.

- PARRINELLO S., DELL'AMICO A., 2021. *From Survey to Parametric Models: HBIM Systems for Enrichment of Cultural Heritage Management*, in Bolognesi C., Villa D. (a cura di), *From Building Information Modeling to Mixed Reality*, edizioni SPRINGER, ISBN 978-3-030-49277-9, pp. 89-107.
- PYBUS C., 2019. *New tools for Cultural Heritage tourism: accessible virtual reality for Milan's Basilica Sant'Ambrogio*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W11, pp. 1003-1010.
- PYBUS C., GRAHAM K., DOHERTY J., ARELLANO N., FAI S., 2019. *New realities for Canada's Parliament: a workflow for preparing Heritage BIM for Game Engines and Virtual Reality*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W15, pp. 945-952.
- QUATTRINI R., BATTINI C., MAMMOLI R., 2018. *HBIM to VR. Semantic awareness and data enrichment interoperability for parametric libraries of Historical Architecture*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2, pp. 937-943.
- ROUSSOU M., 2002. *Virtual Heritage: from the research lab to the broad public*, in *Virtual Archeology*, in Nicolucci F. (a cura di), *Proceedings of the VAST Euroconferenze*, edizioni Archeopressa, ISBN 1-8417-1454-2, pp. 93-100.
- SIDANI A., DUARTE J., DINIS F., BAPTISTA J. S., MARTINS J. P., SOEIRO A., 2018. *Impact of BIM-based virtual and augmented reality interfaces on health and safety in construction projects: protocol for a systematic review*, in *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, ISSN 2184-0954, vol. 2, n. 1, pp. 67-74.
- WONG J. Y., YIP C. C., YONG S. T., CHAN A., KOK S. T., LAU T. L., ALI M. T., 2020. *BIM-VR framework for Building Information Modelling in Engineering Education*, in *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, edizioni Kassel University Press GmbH, ISSN 1865-7923, vol. 14, n. 6, pp. 15-39.
- ZAKER R., COLOMA E., 2018. *Virtual reality-integrated workflow in BIM-enabled projects collaboration and design review: a case study*, in *Visualization in Engineering*, edizioni Springer Open, vol. 6, n. 4.

## BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO PER L'HOSPITAL SIMÓN RUIZ

COSIDO COBOS O. J., CAMPI M., PULCRANO M., MARMO R., RUIZ LOPEZ O., DI LUGGO A. 2018. *Implementación de un modelo BIM para el estudio del Hospital Simón Ruiz de Medina del Campo, Valladolid*, in AR&PA 2018 – XI Biennale Iberica del Patrimonio Culturale, XI Congresso Internazionale, ISBN 978-84-09-14523-2.

MARTÍNEZ M.A., HERNÁNDEZ REDONDO J. I., SÁNCHEZ DEL BARRIO A., 2004. *Catálogo Monumental de la Provincia de Valladolid. Medina del Campo*, Diputación de Valladolid, ISBN 84-7852-245-X.

NAVARRO GARCÍA L., 1998. *El Hospital General de Simón Ruiz en Medina del Campo. Fábrica e idea*, Junta de Castilla y Leon, Consejería de Educación y Cultura, ISBN 84-7846-764-5.

PONZ A., 1772-1976. *Viage de España, tomo duodécimo*.

PULCRANO M., 2020. *Modelli digitali interconnessi per ampliare la conoscenza e migliorare la fruizione del Patrimonio Costruito*, in Arena A., Arena M., Brandolino R. G., Colistra D., Ginex G., Mediati D., Nucifora S., Raffa P., (a cura di), Connettere, un disegno per annodare e tessere, 42° Convegno Internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione, Congresso UID, FrancoAngeli open access, ISBN 978-8-83510-449-0, pp. 2604-2621.

PULIDO SERRANO J. I (a cura di), 2017. *Más que negocios Simón Ruiz un banquero español del siglo XVI entre la península ibérica e italiana*, ISBN 978-3-95487-684-6.

SÁNCHEZ DEL BARRIO A., 1991. *Estructura urbana de Medina del Campo*, Junta de Castilla y León Consejería de Cultura y Bienestar Social, ISBN 84-7846-075-6.

SÁNCHEZ DEL BARRIO A. (a cura di), 2016. *Simón Ruiz mercader, banquero y fundador*, ISBN 978-84-608-7873-5.

## ALTRI RIFERIMENTI

ALBISSINI P., 2016. *L'analisi grafica dell'architettura: dall'analogico al digitale*, in Albissini P., De Carlo L. (a cura di), *Architettura disegno modello: verso un archivio digitale dell'opera di maestri del XX secolo*, Gangemi Editore, ISBN 978-88-492-9336-4, pp. 65-76.

APOLLONIO F. I., GAIANI M., SUN Z., 2017. *A reality Integrated BIM for Architectural Heritage Conservation*, in Ippolito A., *Handbook of Research on Emerging Technologies for Architectural and Archaeological Heritage*, edizioni IGI Global, ISBN 978-15-225-0675-1, pp. 31-65.

BAGLIONI L., INGLESE C., 2015. *Il rilievo integrato come metodo di studio: il caso di San Bernardino a Urbino*, in *Disegnare Idee Immagini*, Gangemi Editore, ISSN 2704-7105, n. 51, pp.34-45.

BANFI F., 2020. *HBIM, 3D drawing and Virtual Reality for Archaeological sites and ancient ruins*, in *Virtual Archaeology Review*, edizioni Universidad Politecnica de Valencia, ISSN 1989-9947, vol. 11, n. 23, pp. 16-33.

BARAZZETTI L., BANFI F., BRUMANA R., GUSMEROLI G., PREVITALI M., SCHIANTARELLI G., 2015. *Cloud-to-BIM-to-FEM: structural simulation with accurate historic BIM from laser scanner*, in *Simulation Modeling Practice and Theory*, edizioni ELSEVIER, ISSN 1569-190X, vol. 57, pp. 71-87.

BEKELE M. K., PIERDICCA R., FRONTONI E., MALINVERNI E. S., GAIN J., 2018. *A survey of Augmented, Virtual and Mixed Reality for Cultural Heritage*, in Nicolucci F. (a cura di), *Journal on Computing and Cultural Heritage*, edizioni ACM Association for Computing Machinery, ISSN 1556-4673, vol. 11, n. 2.

BEKELE M. K., CHAMPION E., 2019. *A comparison of Immersive Realities and Interaction Methods: Cultural Learning in Virtual Heritage*, in *Frontiers in Robotics and AI*, ISSN 2296-9144, vol. 6, n. 91, pp. 1-14.

BIMBER O., RASKAR R., 2005. *Spatial Augmented Reality. Merging Real and Virtual Worlds*, edizioni Taylor & Francis Inc, ISBN 1-56881-230-2.

BONACINI E., 2014. *La realtà aumentata e le app culturali in Italia: storie da un matrimonio in mobilità*, in *Il capitale culturale. Studies on the Value of Cultural Heritage*, edizioni eum, ISSN 2039-2362, vol. IX, pp. 89-121.

BRUSAPORCI S., 2017. *The Importance of Being Honest: Issues of Transparency in Digital Visualization of Architectural Heritage*, in Ippolito A. (a cura di), *Handbook of Research on Emerging Technologies for Architectural and Archaeological Heritage*, edizioni IGI Global, ISBN 978-15-225-0675-1, pp. 66-93.

## BIBLIOGRAFIA

- CHIABRANDO F., LO TURCO M., SANTAGATI C., 2017. *Digital Invasions: from point clouds to Historical Building Object modeling (H-BOM) of a Unesco WHL Site*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W3, pp. 171-178.
- CLEMENTE M., 2012. *Comporre, scomporre l'architettura. Dall'analisi grafica al disegno di progetto*, ARACNE editrice, ISBN 978-88-548-5615-8.
- DE RUBERTIS R., 1994. *Il disegno dell'architettura*, Carocci Editore, ISBN 978-88-430-2517-6.
- D'AMELIO S., MAGGIO V., VILLA B., 2013. *3D Modelling per la documentazione archeologica: verifiche metriche*, in 17° Conferenza Nazionale ASITA, pp. 513-519.
- EASTMAN C., TEICHOLZ P., SACKS R., LISTON K., 2008. *Bim Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, John Wiley and Sons Editore, ISBN 978-0-470-54137-1.
- EMPLER T., 2017. *Gli strumenti di rappresentazione nella procedura ARBIM*, in di Luggo A., Giordano P., Florio R., Papa L. M., Rossi A., Zerlenga O., Barba S., Campi M., Cirafici A. (a cura di), Territori e frontiere della rappresentazione, 39° Convegno Internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione, Congresso UID, Gangemi Editore, ISBN 978-88-492-3507-4, pp. 1559-1568.
- EMPLER T., CALDARONE A., FUSINETTI A. (a cura di), 2020. *3D Modeling & BIM. Data Modeling & Management for AECO Industry*, edizioni DEI, ISBN 978-8-84961-932-4.
- FALLAVOLLITA F., 2009. *Le volte semplici*, in Migliari R., Geometria descrittiva. Tecniche e applicazioni, edizioni CittàStudi, ISBN 978-8-8251-7329-1, vol. II, pp. 439-447.
- FALLAVOLLITA F., 2009. *Le volte composte*, in Migliari R., Geometria descrittiva. Tecniche e applicazioni, edizioni CittàStudi, ISBN 978-8-8251-7329-1, vol. II, pp. 447-461.
- FUSIELLO A., 2018. *Visione computazionale. Tecniche di ricostruzione tridimensionale*, edizioni Franco Angeli, ISBN 978-8-8917-7193-3.
- INZERILLO L., LO TURCO M., PARRINELLO S., SANTAGATI C., VALENTI M. G., 2016. *BIM e beni architettonici: verso una metodologia operativa per la conoscenza e la gestione del patrimonio culturale*, in DisegnareCon, ISSN 1828-5961, vol. 9, n. 16, pp. 16.1-16-9.
- IPPOLITI E., MESCHINI A., MOSCATI A., ROSSI D., 2013. *Modelli informativi integrati per conoscere, valorizzare e condividere il patrimonio urbano: tra interfacce 3d e tecnologie visual 3D*, in Brusaporci S. (a cura di), Modelli complessi per il patrimonio Architettonico-Urbano, GANGEMI Editore, ISBN 978-88-492-2692-8, pp. 98-111.
- KIPPER G., RAMPOLLA J., 2012. *Augmented Reality: an emerging technologies guide to AR*, edizioni ELSEVIER, ISBN 978-1-59749-733-6.

LAISERIN J., 2002. *Comparing Pomes and Naranjas, The Laiserin Letter: Issue 15*. URL: <http://www.laiserin.com/features/issue15/feature01.php>

MAIEZZA P., TATA A., 2018. *Modelling and Visualization Issues in the Architectural Heritage BIM*, in Marcos C. (a cura di), *Graphic Imprints*, EGA 2018, edizioni Springer Cham, ISBN 978-3-319-93749-6, pp. 521-531.

MARGHETIS G., PAPAGIANNAKIS G., STEPHANIDIS C., 2019. *Realistic Natural Interaction with virtual statues in X-reality environments*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W11, pp. 801-808.

NOCERINO E., REMONDINO F., 2016. *Uso consapevole di software speditivi per ricostruzioni 3D*, in *GEOmedia*, edizioni mediaGEO, ISSN 1128-8132, vol. 5, pp. 40-43.

ORENI D., BRUMANA R., GEORGOPOULOS A., CUCA B., 2013. *HBIM for conservation and management of Built Heritage: towards a library of vaults and wooden beam floors*, in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. II-5/W1, pp. 215-221.

REMONDINO F., EL-HAKIM S., 2006. *Image-based 3D modeling: a review*, in *The Photogrammetric Record*, vol. 21, n. 115, pp. 269-291.

RUSSO M., REMONDINO F., GUIDI G., 2011. *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in *Archeologia e Calcolatori*, ISSN 1120-6861, vol. 22, pp. 169-198.

SACERDOTE F., TUCCI G., 2007. *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Editore Aline, ISBN 978-8-860-55119-1.

SCOPIGNO R., 2005. *Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale*, in Campana S., Francovich R., *Laser Scanner e GPS: Paesaggi Archeologici e Tecnologie Digitali*, Edizioni all'insegna del Giglio, pp. 41-68.

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*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2, pp. 1037-1044.

SCANDURRA S., PULCRANO M., TARANTINO C., 2018. *Dalla conoscenza la modello parametrico informatizzato*, in Campi M., di Luggo A., Picone R., Scala P. (a cura di), *Palazzo Penne a Napoli tra conoscenza, restauro e valorizzazione*, edizioni Arte'm, ISBN 978-88-569-0600-4, pp. 167-174.

SHERMAN W. R., CRAIG A. B., 2019. *Understanding Virtual Reality. Interface, Application, and Design* (second edition), edizioni Morgan Kaufmann, ISBN 978-0-12-818399-1.

VILANOVA J., 2017. *Extended Reality and abstract Objects: a pragmalinguistic approach*, in Ariso J. M. (a cura di), *Augmented Reality. Reflections on Its Contribution to Knowledge Formation*, edizioni De Gruyter, ISBN 978-3-11-049700-7, pp. 41-60.



## INDICE E FONTI DELLE ILLUSTRAZIONI

### Acquisizioni *reality-based*

Figg. 1.1 e 1.2 (pagina seguente) – Nuvola di punti *range-based* e *image-based* della Congrega di Rosario di Palazzo (Napoli).

Lavoro di ricerca dipartimentale (DIARC – Università di Napoli “Federico II”, resp. scientifico Prof. Arch. A. di Luggo) inerente la valutazione dei risultati ottenuti da processi di acquisizione *range-based* e *image-based*. Gli esiti della sperimentazione sono riportati in Pulcrano et al., 2019. p. 22

Fig. 1.3 – Nuvola di punti ottenuta da rilievi *outdoor* eseguiti con strumentazione TIMMS (*Trimble Indoor Mobile Mapping System*).

Fonte: Campi et al., 2018 p. 28

Fig. 1.4 – Esempificazione del processo di acquisizione del *dataset* fotografico per il rilievo *image-based* del fronte di un edificio: integrazione di riprese ad assi paralleli e convergenti.

Fonte: De Luca, 2011 p. 30

Fig. 1.5 – Esempio di *target*, appositamente realizzato, per supportare processi di elaborazione fotogrammetrica e di integrazione dati multisensore.

Fonte: Repola et al., 2019 p. 31

Fig. 1.6 – Le caratteristiche materiche del colonnato in marmo hanno generato molto rumore nella nuvola di punti con la duplicazione di porzioni della stessa all'interno delle strutture murarie e al di sotto del piano di calpestio.

Ricerca dipartimentale (DIARC – Università di Napoli “Federico II”, resp. scientifico Prof. Arch. A. di Luggo), inerente acquisizioni dati multisensore, della Chiesa di S. Maria degli Angeli a Pizzofalcone (Napoli). Gli esiti della sperimentazione sono in corso di pubblicazione. p. 32

- Fig. 1.7 – Schematizzazione delle metodologie di confronto applicate dalle ricerche analizzate per la valutazione e validazione dei risultati di rilievo.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 35
- Fig. 1.8 – Punti di controllo noti – *marker* apposti sulla parete – acquisiti con diverse strumentazioni *reality-based* per l'applicazione del metodo di confronto *point to point*.  
Fonte: Tucker, 2002 p. 36
- Fig. 1.9 – Confronto tra profili di nuvole di punti acquisite da tecnologie *range-based* e *image based*.  
Fonte: Pulcrano et al., 2019 p. 37
- Fig. 1.10 – Confronto tridimensionale *cloud to cloud* di nuvole di punti *range-based* ottenute da strumentazioni differenti.  
Fonte: di Luggo et al., 2019(a) p. 38
- Fig. 1.11 – Esempio di confronto *cloud to mesh* di una porzione muraria: modello poligonale, nuvola di punti e calcolo della divergenza.  
Fonte: Grussenmeyer et al., 2008 p. 39
- Fig. 1.12 – Schematizzazione delle metodologie di integrazione di dati derivanti da rilievi *reality-based*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 43
- Fig. 1.13 – Integrazione per sovrapposizione mediante punti di controllo di nuvole di punti fotogrammetriche aeree e terrestri.  
Fonte: di Luggo et al., 2019(b) p. 46
- Fig. 1.14 – Restituzione di strutture amorfe costituenti ambienti ipogei attraverso l'integrazione di dati *reality-based*. Il processo di fusione con creazione di un modello poligonale *texturizzato* finale è stato gestito nell'applicativo *RealityCapture*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 51

### **Modelli informatizzati per la rappresentazione digitale 3D del patrimonio costruito**

- Fig. 2.1 – Mappatura delle diverse forme di degrado in ambiente BIM.  
Fonte: Croce et al., 2019 p. 56
- Fig. 2.2 – Fasi sequenziali del processo *Cloud-to-BIM-to-FEM*: (a) nuvola di punti; (b) modello BIM; (c) modello elementi finiti; (d) analisi strutturale.  
Fonte: Barazzetti et al., 2015 p. 57

Fig. 2.3 – Vista comparativa del modello H-BIM con la caratterizzazione degli oggetti in relazione alle fasi di costruzione e demolizione.

Fonte: Scandurra et al., 2017 p. 58

Fig. 2.4 – Schematizzazione del *workflow* operativo che caratterizza la costruzione di un modello H-BIM: (i) acquisizione dati strumentali e non; (ii) confronto tra lo stato di fatto e le informazioni pregresse; (iii) redazione di abachi tematici con l'individuazione delle parti che compongono il manufatto e delle relazioni che li caratterizzano; (iv) *modellizzazione* degli *smart-objects* e creazione del modello H-BIM.

Fonte: contributo dal titolo *Sistemi voltati nei processi cloud to BIM*, presentato in occasione dell'evento *3DModeling&BIM*, Roma 2018, dal gruppo di ricerca di Luggo A., Scandurra S., Pulcrano M., Siconolfi M., Moncao S.. I risultati della ricerca sono inoltre riportati nel contributo di Luggo et al., 2018. p. 60

Fig. 2.5 – Sintesi dei dati strumentali, d'archivio e bibliografici con la redazione di schemi grafici e tabellari basati su codifiche per l'individuazione univoca delle componenti del sistema.

Lavoro di ricerca dipartimentale (DIARC – Università di Napoli “Federico II”, resp. scientifico Prof. Arch. A. di Luggo) inerente la costruzione di modello E-BIM per la gestione del complesso di Monte Sant'Angelo (Napoli). Gli esiti della sperimentazione sono riportati in di Luggo et al., 2019(b). p. 61

Fig. 2.6 – Costruzione geometrica di aperture mediante la definizione delle relazioni tra forme tridimensionali, piani di riferimento e parametri dimensionali.

Fonte: Fai e Rafeiro, 2014 p. 64

Fig. 2.7 – Modellazione in ambiente BIM degli elementi costituenti una colonna in ordine dorico, relazionando le diverse parti alle regole desunte dai trattati di Palladio, Scamozzi e Vignola.

Fonte: Apollonio et al., 2012 p. 65

Fig. 2.8 – Modellazione di un solido di riferimento mediante l'applicazione di processi di *visual programming* in *software* esterni ma direttamente connessi alla piattaforma di BIM *authoring*.

Fonte: di Luggo et al., 2018 p. 67

Fig. 2.9 – Processi automatizzati *Scan-to-BIM*: (a) nuvola di punti complessiva; (b) segmentazione in parti ed (c) elementi; (d) individuazione dei profili di riferimento; (e) importazione in ambiente BIM attraverso il *plugin GreenSpider*; (f) ricostruzione della forma tridimensionale.

Fonte: Garagnani e Manfredini, 2013 p. 68

Fig. 2.10 – Piattaforma INCEPTION: modalità di aggregazione dei diversi dati, geometrici e non, e costruzione del *database* informativo relativo al manufatto indagato.

Fonte: Maietti et al., 2019 p. 73

Fig. 2.11 – Le classificazioni LOD nazionali e internazionali: confronto dei requisiti grafici e informativi previsti dalla normativa italiana, americana e inglese.

Fonte: Carnevali et al., 2019 p. 77

Fig. 2.12 – Struttura formale posta alla base della definizione dei *Level of Information Need* (LOIN).  
Fonte: Pavan et al., 2020 p. 79

### Comunicazione e *visual design* per il patrimonio costruito

- Fig. 3.1 – Rappresentazione del *continuum* proposto da Paul Milgram e Fumio Kishino in relazione alla EWK, ovvero alla conoscenza che il dispositivo di visualizzazione e/o elaborazione possiede su ciò che si sta visualizzando (*what*) e sulla sua collocazione (*where*) – conoscenza nulla all'estremo sinistro, massima all'estremo opposto –.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 85
- Fig. 3.2 – Schematizzazione delle diverse esperienze di fruizione *Extended-Reality* in relazione al grado di *immersività* che propongono.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 90
- Fig. 3.3 – Progetto di AR per la simulazione della ricostruzione virtuale di una colonna ionica.  
Fonte: Ippoliti e Moscati, 2012 p. 92
- Fig. 3.4 – Differenze nella visualizzazione AR di contenuti aggiunti (b) e sottratti (b) all'ambiente reale (a).  
Fonte: Mori et al., 2017 p. 93
- Fig. 3.5 – Componenti del sistema KARMA e modalità di visualizzazione attraverso il HMD.  
Fonte: Feiner et al., 1993 p. 94
- Fig. 3.6 – Prototipo DIVAR: dispositivo per la visualizzazione AR della ricostruzione del Teatro romano di Benevento.  
Fonte: Campi et al., 2019 p. 95
- Fig. 3.7 – Esperienze di fruizioni AV dove l'utente percepisce sé stesso (le mani in particolare) ed esegue azioni reali su oggetti virtuali.  
Fonte: Bruder et al., 2009; Bruder et al., 2010 p. 98
- Fig. 3.8 – Esperienza di fruizione in VR per la disseminazione e divulgazione del Convento di S. Maria delle Grazie a Milano.  
Fonte: Bolognesi e Aiello, 2019 p. 100
- Fig. 3.9 – *Storytelling* delle trasformazioni della Basilica di Loreto attraverso visualizzazioni VR immersive.  
Fonte: Rossi et al., 2018 p. 101

Fig. 3.10 – Sistema di fruizione VR *semi-immersivo*.  
 Fonte: Steinicke et al., 2006 p. 102

## L'Hospital Simón Ruiz in Medina del Campo (Spagna)

Fig. 4.1 – Fronte principale su *Avenida Portugal* dell'Hospital Simón Ruiz.  
 Foto M. Pulcrano p. 111

Fig. 4.2 – *Círculo de Juan Pantoja de la Cruz*, olio su tela (1595). Ritratto di Simón Ruiz depositato presso la *Fundación Museo de las Ferias*.  
 Fonte: <https://www.museoferias.net/> p. 112

Fig. 4.3 – Pagine estratte dalla *Concordia*. Manoscritto su carta conservato presso l'Archivio Simón Ruiz (collocazione ASR, H 21.1).  
 Fonte: <https://www.museoferias.net/> p. 113

Fig. 4.4 – Centro di Medina del Campo nel XVI secolo con indicazione del percorso delle mura di cinta e delle porte di accesso alla città.  
 Fonte: Sánchez del Barrio, 1991 p. 115

Fig. 4.5 – Vista aerea del comune di Medina del Campo con individuazione della relazione tra l'area costruita (in rosso) e le aree agricole (immagine sinistra) e vista dell'Hospital Simón Ruiz in relazione al contesto urbano (immagine destra).  
 Elaborazione M. Pulcrano p. 116

Fig. 4.6 – Vista aerea del complesso ospedaliero in relazione al contesto e agli assi viari che lo delimitano.  
 Elaborazione M. Pulcrano p. 117

Fig. 4.7 (pagina precedente) – Elaborato di pianta del piano terra e alzato del fronte principale su *Avenida Portugal*.  
 Fonte: Ponz, 1772-1976 p. 119

Fig. 4.8 – Rappresentazione di pianta e sezione longitudinale della Chiesa annessa all'Hospital Simón Ruiz.  
 Fonte: Navarro García, 1998 p. 119

Fig. 4.9 e 4.10 (pagina successiva) – Schematizzazione grafica delle fasi temporali di costruzione del complesso ospedaliero medinense.  
 Fonte: Navarro García, 1998 p. 122

- Fig. 4.11 – Distribuzione funzionale degli ambienti costituenti l'Hospital Simón Ruiz.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 124
- Fig. 4.12 – Ala Sud-Ovest del complesso (primo piano – liv. secondo) destinata ad accogliere gli uomini affetti da malattie contagiose.  
Foto M. Pulcrano p. 126
- Fig. 4.13 – Vista interna della Chiesa e del cancello che separa la navata dal transetto.  
Foto M. Pulcrano p. 127
- Fig. 4.14 – Particolare della fascia verticale che caratterizza l'ingresso alla Chiesa nel fronte principale su *Avenida Portugal*.  
Foto M. Pulcrano p. 128
- Fig. 4.15 – Fronte Nord-Ovest prospiciente il giardino interno del complesso.  
Foto M. Pulcrano p. 129
- Fig. 4.16 – Vista della corte interna e dei fronti Nord-Ovest e Sud-Ovest che la delimitano.  
Foto M. Pulcrano p. 131

### **L'Hospital Simón Ruiz attraverso i rilievi *reality-based***

- Fig. 5.1 – Piante del complesso dell'Hospital Simón Ruiz con messa in evidenza (in blu) delle aree con scarse condizioni di sicurezza e, di conseguenza, non accessibili.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 134
- Fig. 5.2 – *Target* bidimensionali e tridimensionali utilizzati nei rilievi *range-based* dell'Hospital Simón Ruiz.  
Foto M. Pulcrano p. 136
- Fig. 5.3 – Nuvola di punti complessiva della prima campagna di acquisizione (Aprile 2018). Vista tridimensionale nel *software Faro SCENE*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 138
- Fig. 5.4 – Nuvola di punti complessiva della seconda campagna di acquisizione (Luglio 2018). Vista tridimensionale nel *software Faro SCENE*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 139
- Fig. 5.5 – Schema riassuntivo del percorso di scansione seguito durante i rilievi *range-based* dell'Hospital Simón Ruiz: in rosso è evidenziata la prima campagna di acquisizione (aprile 2018), mentre in blu la seconda (Luglio 2018).

Elaborazione M. Pulcrano	p. 140
Fig. 5.6 – Registrazione delle diverse <i>scan position</i> nel <i>software Faro SCENE</i> : impostazioni di riferimento per il processo di allineamento e <i>report</i> di sintesi (in giallo la <i>scan position</i> da registrare).	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 142
Fig. 5.7 – Registrazione delle <i>scan position</i> della prima e della seconda campagna di rilievo mediante l'individuazione di <i>target</i> naturali nella <i>doppia vista corrispondenza</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 143
Fig. 5.8 – Esempificazione dei correttivi grafici apportati alle singole nuvole di punti. Immagini <i>pre</i> e <i>post</i> elaborazione dei processi di applicazione filtro <i>contrasto colore</i> e del <i>bilanciamento dei bianchi</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 144
Fig. 5.9 – Visualizzazione nel <i>software Autodesk Recap PRO</i> del gruppo di scansioni (11 <i>scan position</i> totali) costituenti il fronte Sud-Ovest.	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 146
Fig. 5.10 – Nuvola di punti complessiva dell'Hospital Simón Ruiz ottenuta dalle campagne di rilievo <i>range-based</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 147
Fig. 5.11 – Nuvola di punti della Chiesa annessa all'Hospital Simón Ruiz. In rosso la messa in evidenza dell'area individuata come <i>check test</i> per la validazione del processo videogrammetrico.	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 150
Fig. 5.12 – Estrazione automatizzata dei frames dalla videoripresa delle coperture mediante il <i>software open Free Video to JPG Converter</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 150
Fig. 5.13 – Esempi di <i>frames</i> esclusi dalla computazione del processo videogrammetrico.	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 151
Fig. 5.14 – Processo di allineamento del <i>dataset</i> fotografico nel <i>software Agisoft Methashape</i> : settaggi di computazione e risultati del processo.	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 152
Fig. 5.15 – Modello tridimensionale risultante dal processo di infittimento della nuvola rada.	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 153
Fig. 5.16 – Restituzione <i>image-based</i> dell'area <i>check test</i> attraverso il <i>software RealityCapture</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 154

- Fig. 5.17 – Modelli tridimensionali (nuvola di punti rada, nuvola di punti densa e modello poligonale) ottenuti dal processamento del *dataset* fotografico nel *software 3DF Zephyr PRO*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 156
- Fig. 5.18 – Nuvole di punti elaborate nei diversi applicativi SfM: sintesi dei risultati ottenuti e confronti visivi con il rilievo *range-based* dell'area di *check test*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 158
- Fig. 5.19 – Vista dello spazio modello del *software CloudCompare* con caratterizzazione delle nuvole di punti come elemento di riferimento (in giallo, la nuvola *range-based*) ed elemento da allineare (in rosso, la nuvola di punti ottenuta mediante processo SfM nel *software Agisoft Metashape*).  
Elaborazione M. Pulcrano p. 159
- Fig. 5.20 – Individuazione delle *equivalent point pairs* e lettura della deviazione *standard* a seguito del processo di allineamento.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 160
- Fig. 5.21 – Esito del processo di confronto automatizzato tra le nuvole di punti *range-based* e *image-based*. I valori leggibili dal grafico riportano una deviazione *standard* rispettivamente pari a 9.7 cm per l'elaborazione nel *software Agisoft Metashape*, 5.8 cm per *RealityCapture* e, infine, 8.4 cm per *3DF Zephyr PRO*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 162
- Fig. 5.22 – *Collage* di una parte dei *frames* (20/316) oggetto di processo SfM per la costruzione della nuvola di punti delle coperture.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 165
- Fig. 5.23 – Primi esiti dell'allineamento nel *software RealityCapture* e inserimento dei *control points* al fine di migliorare il risultato.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 166
- Fig. 5.24 – Esito finale del processo di elaborazione videogrammetrica dei *frames* delle coperture (visualizzazione del modello *mesh*).  
Elaborazione M. Pulcrano p. 167
- Fig. 5.25 – Processo di allineamento nel *software CloudCompare*, individuazione del modello di riferimento.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 168
- Fig. 5.26 – Individuazione delle *equivalent point pairs* e sovrapposizione dei modelli. Vista dello spazio modello *pre* e *post* allineamento.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 168

## Il modello H-BIM dell'Hospital Simón Ruiz

- Fig. 6.1 – Analisi geometriche e proporzionali dello sviluppo planimetrico dell'Hospital Simón Ruiz: scomposizione in *layer* di lettura e studio d'insieme.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 174
- Fig. 6.2 – Analisi geometriche e proporzionali del fronte su *Avenida Portugal* (Sud-Est) e Nord-Ovest.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 176
- Fig. 6.3 – Analisi geometriche e proporzionali dei fronti Sud-Ovest e Sud-Est (corte).  
Elaborazione M. Pulcrano p. 177
- Fig. 6.4 – Piante del complesso dell'Hospital Simón Ruiz con messa in evidenza (in blu) delle aree acquisite mediante rilievi *reality-based*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 180
- Fig. 6.5 – Pianta delle coperture dell'Hospital Simón Ruiz in relazione al contesto urbano in cui è inserito il complesso.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 181
- Fig. 6.6 – Pianta del primo livello (piano terra).  
Elaborazione M. Pulcrano p. 182
- Fig. 6.7 (pagina precedente) – Fronte principale su *Avenida Portugal*, fronte Nord-Ovest del giardino interno e sezione AA'.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 184
- Fig. 6.8 – Fronte Sud-Ovest prospiciente il giardino e prospetto-sezione BB' della corte interna.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 184
- Fig. 6.9 – Ipografia e sezione longitudinale della Chiesa annessa al complesso.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 185
- Fig. 6.10 – Scomposizione del sistema edificio nella logica BIM e nel sistema *software Autodesk Revit*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 188
- Fig. 6.11 (pagina seguente) – *Report* di sintesi delle analisi condotte sui diversi tipi di serramenti e aperture dell'Hospital Simón Ruiz. Esempificazione di alcune componenti del complesso mediante abaco grafico, tabellare e rappresentazione vettoriale.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 188
- Fig. 6.12 – Fasi operative che hanno caratterizzato la costruzione del modello H-BIM dell'Hospital Simón Ruiz.

Elaborazione M. Pulcrano	p. 190
Fig. 6.13 – Visualizzazione affiancata della pianta del primo livello nello spazio modello <i>Revit</i> con orientamento <i>Nord reale</i> (vista sinistra) e <i>Nord di progetto</i> (vista destra).	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 191
Fig. 6.14 – <i>Input</i> di riferimento per la costruzione del modello H-BIM dell’Hospital Simón Ruiz: disegni CAD sovrapposti alla nuvola di punti <i>reality-based</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 192
Fig. 6.15 – Impostazione dei <i>parametri di progetto</i> con l’individuazione delle categorie di componenti a cui associarli e la definizione delle regole di filtraggio per gestirne la visibilità nelle viste dello spazio modello. Esempificazione sul <i>parametro di progetto RILEVATO</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 193
Fig. 6.16 – Impostazione dell’ <i>intervallo di visualizzazione</i> nella vista planimetrica associata al livello 0 – <i>Livello Primo</i> per la corretta lettura degli elementi murari nella zona absidale della Chiesa annessa al complesso.	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 194
Fig. 6.17 – <i>Modellizzazione</i> delle strutture murarie dell’Hospital Simón Ruiz in relazione ai disegni CAD e alla nuvola di punti <i>reality-based</i> . Vista planimetrica del livello 0 – <i>Livello Primo</i> – <i>Nord di Progetto</i> in visualizzazione <i>nascosta</i> con <i>livello di dettaglio basso</i> . In rosso sono indicate le porzioni desunte dal rilievo, in bordeaux quelle relative alla ricerca documentale e bibliografica.	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 195
Fig. 6.18 – Modellazione della <i>famiglia nidificata</i> del portale di accesso sinistro P1 (fronte principale in <i>Avenida Portugal</i> ): scomposizione in elementi, ricomposizione nella famiglia <i>host</i> e individuazione dei parametri da relazionare mediante <i>associazione parametro famiglia</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 197
Fig. 6.19 – Esempificazione del grado di <i>nidificazione</i> realizzabile nel <i>software Revit</i> e adoperato nella costruzione delle <i>famiglie caricabili nidificate</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 199
Fig. 6.20 – Modello H-BIM: vista di pianta in stile <i>wireframe</i> con <i>livello di dettaglio basso</i> (finestra sinistra) e <i>medio</i> (finestra destra).	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 200
Fig. 6.21 – Composizione campata tipo del fronte Sud-Ovest che guarda al giardino interno del complesso.	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 201

- Fig. 6.22 – Costruzione del fronte Sud-Ovest dell’Hospital Simón Ruiz: sequenza delle operazioni per la riproduzione in serie della campata tipo e vista tridimensionale del risultato finale nello spazio modello del *software Revit*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 202
- Fig. 6.23 (pagina precedente) – Mappatura e classificazione delle diverse tipologie di volte individuate nell’Hospital Simón Ruiz.  
Elaborazione e foto M. Pulcrano p. 205
- Fig. 6.24 – Stato di conservazione di una porzione della corte interna del complesso. Dal crollo è possibile evincere la tecnica costruttiva della superficie voltata in foto (volta a crociera a *foglio unico*).  
Elaborazione M. Pulcrano p. 205
- Fig. 6.25 – Costruzione del solido di sottrazione *adattivo* della volta a botte con arco policentrico: modellazione e parametrizzazione in *ambiente famiglia*, posizionamento e ridimensionamento in *ambiente di progetto* sulla nuvola di punti *reality-based*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 209
- Fig. 6.26 – Vista tridimensionale dello spazio modello in *Revit* in *ambiente di progetto* con la visualizzazione delle coperture voltate ottenute dal rilievo *reality-based*. In grigio sono individuati i *solidi* di riferimento per la creazione degli *smart-objects* con componenti *pavimento*, *tetto* o *muro da superficie*, mentre in blu sono evidenziati i solidi utilizzati come *vuoti* da sottrarre ad oggetti *pavimento*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 210
- Fig. 6.27 – Sovrapposizione del modello alla nuvola di punti *reality-based*: discostamento di alcune campate dei fronti Sud- Ovest, Nord-Ovest e Nord-Est della corte interna.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 211
- Fig. 6.28 – Visualizzazione del fronte Sud-Est della corte interna in sovrapposizione alla nuvola di punti *reality-based*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 212
- Fig. 6.29 – Selezione attraverso il *riquadro di selezione* della porzione di modello H-BIM (fronte Sud-Est della corte interna) da esportare in *.stl*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 213
- Fig. 6.30 – Analisi automatizzata della divergenza *cloud to mesh* eseguita tra la porzione di nuvola *reality-based* e il modello H-BIM del fronte Sud-Est della corte interna,  
Elaborazione M. Pulcrano p. 214
- Fig. 6.31 – Risultato del confronto *cloud to mesh* eseguito per il fronte Sud-Ovest che guarda al giardino interno del complesso.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 215

Fig. 6.32 – Vista tridimensionale comparativa della corte interna in visualizzazione ombreggiata. In giallo sono evidenziati gli elementi appartenenti alla fase di costruzione del *modello geometrico*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 217

### Applicazioni di *Virtual Reality*

Fig. 7.1 – Interrelazione di dati tecnici e non nella costruzione di un sistema BIM per il patrimonio storico-architettonico.  
Fonte: di Luggo et al., 2019 p. 222

Fig. 7.2 – Visualizzazione della componente geometrica del modello informativo e dei metadati associati attraverso tecniche di *Augmeted* e *Virtual Reality*.  
Fonte: Banfi et al., 2019(a) p. 223

Fig. 7.3 – Costruzione di una forma attraverso le diverse procedure di modellazione solida, *mesh* e *nurbs*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 226

Fig. 7.4 – Esperienze di fruizione immersiva: differenze nel processo di costruzione della VR a partire da rilievi *reality-based* nell'approccio tradizionale e nell'approccio H-BIM VR applicato nella presente ricerca.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 229

Fig. 7.5 – Visualizzazione della medesima ambientazione nelle modalità di navigazione *walk-through first person*, *walk-through third person* e *fly-through*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 232

Fig. 7.6 – *Framework* di progetto: dal reale al reale esteso. Processo metodologico applicato all'Hospital Simón Ruiz nella costruzione del modello informativo e interattivo.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 233

Fig. 7.7 – Definizione del sistema tecnologico per la programmazione, esecuzione e gestione dell'esperienza di fruizione VR dell'Hospital Simón Ruiz. p. 236

Fig. 7.8 – Personalizzazione delle funzioni dei diversi *input* del *controller* in relazione alle azioni da gestire durante l'esecuzione della fruizione VR.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 237

Fig. 7.9 – Settaggi di esportazione della geometria costituente il modello H-BIM dell'Hospital Simón Ruiz mediante il *plugin Export to Unity*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 240

- Fig. 7.10 – *Script* in *C#* associati all'esportazione dei metadati collegati agli *smart-objects* in ambiente BIM: *file* parametri, *script* con la programmazione delle azioni (*MouseOver*) e settaggi di esportazione (individuazione dei dati e impostazione dell'unità di misura di riferimento).  
Elaborazione M. Pulcrano p. 241
- Fig. 7.11 – Sintesi comparativa delle caratteristiche delle quattro scene ipotizzate per l'*App* VR.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 243
- Fig. 7.12 – Selezione dei tasti del *Menu iniziale* e visualizzazione delle descrizioni grafiche e testuali associate ai diversi *UI Button*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 244
- Fig. 7.13 – Associazione dello *script* per l'esecuzione delle funzioni della *Scena Menu* (caricamento delle diverse *scene* o uscita dall'*App*) al *GameManager*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 245
- Fig. 7.14 – *Menu iniziale* dell'*App* dell'Hospital Simón Ruiz con la messa in evidenza nelle modalità di navigazione tra i diversi *UI Button*. Visualizzazione grafica sulla *canvas* nel pannello *scene view* e associazione della sequenza di selezione nel pannello *inspector* (riquadro giallo).  
Elaborazione M. Pulcrano p. 247
- Fig. 7.15 – Schematizzazione del percorso di fruizione individuato per la *Scena 360°* dell'*App*, con indicazione dei diversi punti di vista – 12 totali – in cui l'utente potrà osservare i fronti esterni del complesso.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 248
- Fig. 7.16 – *Editing* delle foto sferiche in proiezione equirettangolare nel *software Pano2VR*: immagine *pre* e *post* elaborazione.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 250
- Fig. 7.17 – Immagini sferiche *pre* e *post* elaborazione inserite nel visualizzatore *Kolor Eyes* (<http://kolor-eyes.findmysoft.com/>).  
Elaborazione M. Pulcrano p. 251
- Fig. 7.18 – *GameObject* sfera in *Unity 3D* e associazione del component che definisce il materiale come *shader* di tipo *skybox cubemap*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 252
- Fig. 7.19 – Visualizzazione in modalità *live game preview* di due camere – o punti di vista – rappresentativi di due *scan position* del fronte Sud-Ovest prospiciente il giardino.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 253

- Fig. 7.20 – Aree dell’Hospital Simón Ruiz fruibili nella *Scena Point Cloud* dell’*App VR*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 254
- Fig. 7.21 – Costruzione del modello poligonale a partire dalla nuvola di punti *range-based*. Risultati dei processi di *meshing*, *texturizzazione* e semplificazione eseguiti nel *software RealityCapture*: visualizzazione del modello originario (immagine sinistra) e del modello decimato (immagine destra).  
Elaborazione M. Pulcrano p. 255
- Fig. 7.22 – Costruzione del *player* con i diversi *component* associati visualizzabili dal pannello *inspector*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 256
- Fig. 7.23 – Visualizzazione mediante il pannello *live game preview* del *menu* di *scena* e delle impostazioni relative all’altezza visuale del *player*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 257
- Fig. 7.24 – Attivazione e disattivazione delle componenti decorative delle strutture voltate attraverso il *menu* contestuale della *Scena Modello*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 258
- Fig. 7.25 – Punto di inizio della visita virtuale nella *Scena Modello*: visualizzazione in ambiente *Unity 3D* mediante i pannelli *scene view* e *live game preview*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 259
- Fig. 7.26 – Organizzazione e programmazione dei *components* – visibili nel pannello *inspector* – utilizzati per caratterizzare i diversi *hotspots* presenti nella *scena*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 261
- Fig. 7.27 – Fruizione della Chiesa mediante attivazione dell’*hotspot* che trasporta l’utente alla quota del coro. Visualizzazione degli ambienti interni con e senza la presenza del cancello di separazione tra la navata e il transetto.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 262
- Fig. 7.28 – Attivazione delle funzioni accesso/spento connesse all’*hotspot* che consente di gestire la visualizzazione del cancello. Vista della navata dal transetto.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 263
- Fig. 7.29 – Descrizione di una parte delle opere costituenti la Pala d’altare mediante la selezione dei riquadri che la compongono.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 264
- Fig. 7.30 – Area individuata per la costruzione della *Scena H-BIM*. Attraverso la *box* di visualizzazione è stata delimitata la porzione di modello da esportare, corrispondente alla corte interna del complesso.

Elaborazione M. Pulcrano	p. 265
Fig. 7.31 – Attribuzione del <i>tag modello</i> agli <i>smart-objects</i> del modello informativo e visualizzazione tramite il pannello <i>inspector</i> dei diversi <i>component</i> ad essi associati, come ad esempio, il <i>mesh collider</i> e gli <i>shader</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 266
Fig. 7.32 – Corrispondenza nel codice ID dello <i>smart-objects</i> letto in ambiente <i>Revit</i> , del medesimo <i>GameObject</i> in <i>Unity 3D</i> e della relativa riga di codice nello <i>script</i> dei parametri ( <i>file .cs</i> ).	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 267
Fig. 7.33 – Selezione degli oggetti del modello informativo e visualizzazione dei metadati associati mediante la lettura del <i>file</i> parametri. Confronto tra la grafica prevista di <i>default</i> dal <i>file MouseOver</i> (immagine sinistra) e quella personalizzata durante la progettazione della <i>Scena H-BIM</i> (immagine destra).	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 268
Fig. 7.34 – Visualizzazione della scheda di dettaglio mediante attivazione dell' <i>hotspot</i> dedicato.	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 269
Fig. 7.35 – Visualizzazione del modello costruito in base ai soli rilievi <i>reality-based</i> (immagine sinistra) o integrato con le informazioni desunte dalle analisi storiche e documentali (immagine destra). Opzione di scelta impostata nel <i>menu</i> contestuale della <i>Scena H-BIM</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 270
Fig. 7.36 – Visualizzazione stereoscopica ottenuta sul dispositivo <i>mobile</i> in seguito alla <i>built</i> dell' <i>App</i> e all'esecuzione del <i>file .apk</i> sullo <i>smartphone</i> .	
Elaborazione M. Pulcrano	p. 271

## Appendice

Fig. A.1 – Dispositivo di fruizione <i>Sensorama</i> di Morton Heiling. Fonte: Basso, 2017	p. 284
Fig. A.2 – <i>Sword of Damocles</i> progettato da Ivan Sutherland nel 1968. Fonte: Carmigniani e Furht, 2011	p. 285
Fig. A.3 – Schema di funzionamento del sistema <i>Videoplacé</i> di Myron Krueger. Fonte: Alqahtani et al., 2017	p. 285

## INDICE E FONTI DELLE ILLUSTRAZIONI

- Fig. A.4 (pagina seguente) – Schematizzazione degli attuali dispositivi che compongono i sistemi di fruizione XR.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 286
- Fig. A.5 – Coordinate spaziali e angolari che definiscono la mappatura completa – posizione e orientamento – della visuale dell’utente.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 288
- Fig. A.6 – Differenze tra le tipologie di mappatura *inside-out* e *outside-in*.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 290
- Fig. A.7 – Mappatura ottica di tipo *marker based* effettuata mediante la costruzione dell’immagine di riferimento (in alto) in *ARToolKit*. In basso l’informazione associata al *marker*.  
Fonte: Demidova, 2016 p. 293
- Fig. A.8 – Ampiezza del campo visivo e area di sovrapposizione (espressa in gradi) dei visori HMD in relazione alla vista umana.  
Elaborazione M. Pulcrano p. 297
- Fig. A.9 – Schema concettuale della composizione e del funzionamento dei sistemi *optical* e *video see-through*.  
Fonte: Azuma, 1997 p. 298
- Fig. A.10 – Esempio di HUD installato sul parabrezza di un velivolo.  
Fonte: Melzer et al., 2009 p. 299
- Fig. A.11 – *Smart glass* realizzati da *Google*.  
Fonte: <https://www.google.com/glass/start/> p. 299
- Fig. A.12 – *Virtual Retinal Display*: componenti del sistema e schema di funzionamento.  
Fonte: Chinthammit et al., 2002 p. 300
- Fig. A.13 – Composizione del sistema di fruizione VR *HTC Vive*: visore HMD, *controller* e sensore di tracciamento per la mappatura *outside-in*.  
Fonte: <https://www.vive.com/us/> p. 301
- Fig. A.14 – *Cardboard* di *Google*: dispositivi di supporto per visualizzazione stereoscopica attraverso *smartphone*.  
Fonte: <https://arvr.google.com/cardboard/> p. 302
- Fig. A.15 – *Progettazione di un sistema di fruizione CAVE*.  
Fonte: Lugin et al., 2013 p. 308







**Margherita Pulcrano** (1986), Architetto, si laurea con lode nel 2015 presso il DIARC - Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli 'Federico II' con una tesi in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura dal titolo 'Il rilievo come strumento di conoscenza dell'Insula Episcopalis di Napoli: la Basilica di Santa Restituta' (relatore Prof. Arch. M. Campi).

Dal 2016 è cultrice della materia per il settore disciplinare ICAR/17 e svolge attività di ricerca nell'ambito dello studio, della rappresentazione e della comunicazione del patrimonio storico-architettonico, approfondendo in particolare i temi del rilievo attraverso le tecniche e le tecnologie reality-based, della modellazione informativa in piattaforme BIM / H-BIM e della divulgazione del patrimonio costruito mediante sistemi per la fruizione virtuale.

OLI DEFERICO II UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI DEFERICO II U

RA TECNOLOGIE SOSTENIBILI RECUPERO E RAPPRESENTAZIONE DELL

**Università degli Studi di Napoli "Federico II"**

DIARC - Dipartimento di Architettura

**D.ARC - Dottorato di Ricerca in Architettura**

Tecnologie sostenibili, recupero e rappresentazione  
dell'architettura e dell'ambiente

**CICLO XXXIII**

**Coordinatore del Dottorato**

Prof. Arch. Fabio Mangone

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI DEFERICO II UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI DEFERICO II UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI DEFERICO II

'ARCHITETTURA E DELL'AMBIENTE DOTTORATO IN ARCHITETTURA TECNOLOGIE SOSTENIBILI RECUPERO E RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA