dottoranda
arch. SIMONA SCANDURRA
tutor
prof. arch. ANTONELLA DI LUGGO

PROCESSI DI TRADUZIONE DEI DATI DI RILIEVO STRUMENTALE PER LA REALIZZAZIONE DI MODELLI INFORMATIVI DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO ESISTENTE

A' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II **UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II** UNIVE

TE **DOTTORATO IN ARCHITETTURA TECNOLOGIE SOSTENIBILI RECUPERO E RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA E DELL'AMBIENTE** DOTTO

Il crescente sviluppo dei processi BIM ha portato ad indagare gli approcci attuali alla digitalizzazione del patrimonio architettonico esistente, indirizzando verso la strutturazione di sistemi intelligenti ed efficienti, capaci di raccogliere la multidimensionalità del reale.
In quest'ambito di indagine si inserisce la ricerca, tesa ad esplorare le potenzialità e le criticità insite nella trasposizione dei dati acquisiti con tecnologie 3D no-contact in modelli informativi propri dei sistemi Heritage-BIM. La sperimentazione è stata condotta in riferimento ad un caso studio individuato nell'Archivio di Stato di Napoli, proponendo soluzioni idonee a superare i limiti degli strumenti di modellazione offerti dai software di authoring, nel rispetto dei requisiti formali e relazionali degli elementi costitutivi del manufatto indagato. È stato dunque definito un workflow HBIM che, a partire dal rilievo e dalla raccolta della conoscenza, guarda al modello tridimensionale come risultato di un processo di lettura critica delle forme e dei significati. Particolare attenzione si è posta alla documentazione relativa alla modellazione del tempo, sperimentando opportune modalità per documentare e visualizzare le trasformazioni del manufatto architettonico, adeguando le strumentazioni software alla specifica analisi. Altro tema su cui si è focalizzata l'attenzione è quello della modellazione di elementi complessi - con particolare riferimento alle volte - ricorrendo al supporto della programmazione visuale nell'intento di ridurre gli oneri di modellazione attraverso un approccio parametrico capace di contemplare i legami con altre componenti del modello.

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Università degli Studi di Napoli Federico II

DiARC Dipartimento di Architettura

D.ARC DOTTORATO DI RICERCA IN ARCHITETTURA

Università degli Studi di Napoli Federico II

Dottorato di Ricerca in Architettura
Curriculum: Tecnologie sostenibili, recupero e rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente
Ciclo XXXII - triennio 2017/2020

Coord. Del Dottorato di Ricerca in Architettura
Fabio Mangone

Tutor
Antonella di Luggo

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 Gasparrini	Valentina Russo
Ferruccio Izzo	Sergio Russo Ermolli
Laura Lieto	Maria Rosaria Santangelo
Mario Losasso	Paola Scala

Ringraziamenti
Desidero ringraziare tutti coloro che mi sono stati vicini in questo cammino, talvolta inconsapevolmente. Ringrazio in particolare Antonella di Luggo per i preziosi consigli e il supporto scientifico, e soprattutto per avermi pazientemente incoraggiata e guidata nello svolgimento del lavoro. Ringrazio anche Massimiliano Campi, Daniela Palomba e i colleghi del TIR-Lab del DiARC per avermi coinvolta in entusiasmanti attività di ricerca, fornendomi interessanti spunti. Ringrazio inoltre Maurice Murphy per essere stato aperto al confronto e avermi accolta nel suo laboratorio a Dublino, e i dipendenti dell'Archivio di Stato di Napoli, sempre gentili e disponibili nel consentirmi di svolgere le mie attività di rilievo e studio presso i loro spazi.
Vorrei anche ringraziare Margherita e Cristiana, per la loro presenza incondizionata e costante, senza le quali questo percorso non avrebbe avuto lo stesso sapore! Infine ringrazio Michele, il mio sostegno più prezioso, e mia madre e mia sorella, che mi hanno insegnato a rialzarmi con coraggio nei momenti difficili e a riconoscere i valori veri della vita.

Dottoranda
arch. SIMONA SCANDURRA

Tutor
prof. arch. ANTONELLA DI LUGGO

PROCESSI DI TRADUZIONE DEI DATI DI RILIEVO STRUMENTALE PER LA REALIZZAZIONE DI MODELLI INFORMATIVI DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO ESISTENTE

INDICE

Introduzione p. 5

PARTE PRIMA

CAPITOLO PRIMO
La modellazione tridimensionale
Strumenti e Tecniche p. 9
1.1 Il modello in architettura p. 9
1.2 L'introduzione del digitale per la rappresentazione dell'architettura p. 11
1.3 Evoluzione degli strumenti di modellazione tridimensionale p. 14
1.3.1 Le curve complesse p. 15
1.3.2 La modellazione solida p. 18

CAPITOLO SECONDO
Acquisizione ed elaborazione dei dati nel rilievo 3D p. 21
2.1 Sistemi *reality based* p. 22
2.1.1 I sistemi *range based* p. 24
2.1.2 I sistemi *image based* p. 29
2.2 Procedure di elaborazione del dato p. 32
2.2.1 L'estrazione di ortofoto ed ortopiani p. 33
2.2.2 La *mesh* derivante dalla nuvola di punti p. 36

CAPITOLO TERZO
La rappresentazione informatizzata tridimensionale dell'architettura BIM ed HBIM p. 39
3.1 Dal modello *concettuale* al modello *consapevole* p. 39
3.2 La metodologia BIM p. 45
3.2.1 Contenuti informativi minimi, geometrici e non, nelle norme sul BIM p. 49
3.3 BIM *tools* p. 52
3.3.1 Modellazione *object-oriented* e parametrica p. 54
3.4 Specificità HBIM p. 60
3.5 Implicazioni teoriche dell'HBIM nella rappresentazione del patrimonio architettonico p. 65
3.5.1 *Condizioni di Fruizione* del modello p. 71

PARTE SECONDA

CAPITOLO QUARTO
Il caso studio: l'Archivio di Stato di Napoli p. 77
4.1 Il complesso del Grande Archivio di Napoli p. 81
4.1.1 Trasformazioni nel tempo p. 89
4.2 Definizione dell'area di studio: l'Atrio dei Marmi p. 98
4.2.1 Acquisizione e processamento dei dati metrici acquisiti con procedure *reality based* p. 102

PARTE TERZA

CAPITOLO QUINTO
La modellazione HBIM dell'Archivio di Stato di Napoli p. 121
5.1 *Framework* di progetto p. 121
5.2 Fasi di lavoro p. 126
5.2.1 Operazioni preliminari p. 126
5.2.2 Modellazione tridimensionale informativa p. 131
5.2.3 Implementazione ed estrazione dei dati p. 145

CAPITOLO SESTO
La modellazione HBIM per la rappresentazione del tempo p. 149
6.1 La *quarta dimensione* p. 149
6.1.1 Modalità di attribuzione del dato temporale secondo i livelli di conoscenza della specifica informazione p. 151
6.1.2 Organizzare il tempo nella piattaforma di modellazione BIM p. 152
6.2 La rappresentazione del tempo per il caso studio dell'Archivio p. 156

CAPITOLO SETTIMO
La modellazione HBIM degli elementi complessi: le superfici voltate p. 163
7.1 Gli elementi costitutivi di una volta p. 165
7.2 Differenze tipologiche nella grammatica formale p. 170
7.3 Procedure di modellazione delle volte in HBIM: stato dell'arte p. 179
7.4 La volta in una modellazione di tipo parametrico p. 182
7.5 Le volte nel caso studio dell'Archivio di Stato di Napoli p. 187
7.5.1 Sperimentazioni sulle volte dell'Atrio dei Marmi p. 189
7.5.2 Caratterizzazione delle superfici affrescate p. 208

Conclusione p. 213

Bibliografia di riferimento al testo p. 219

Bibliografia per l'Archivio di Stato di Napoli p. 228

Sitografia p. 229

Normativa p. 229

Altri riferimenti p. 230

Indice delle figure p. 235

INTRODUZIONE
Ambito di ricerca e struttura della tesi

Gli avanzamenti tecnologici che in anni recenti hanno interessato i diversi campi del sapere, hanno investito in modo diretto le discipline del rilievo e della rappresentazione con lo sviluppo di strumenti di acquisizione massiva e di processi per l'elaborazione dei dati capaci di raccogliere la molteplicità e la multidimensionalità del reale, pervenendo a simulazioni sempre più esaurienti.
Accanto a tali sviluppi, si è fatta viva l'esigenza di documentare l'architettura non solo nelle sue determinazioni metriche e figurative, ma anche nei suoi valori intrinseci, con l'obiettivo di porre in relazione le forme rilevate con i significati di ciò che viene rilevato, organizzando i dati secondo precise ontologie, coerentemente con un lessico univocamente interpretato e condiviso.
Attualmente i processi di rielaborazione parametrica basata su oggetti ontologicamente riconosciuti sono utilizzati nel progetto del nuovo: tali processi sono notoriamente identificati dall'acronimo BIM (*Building Information Modeling*) e riguardano una metodologia di lavoro condiviso che si serve di strumenti digitali simulativi: si tratta di modelli grafici tridimensionali e geometricamente definiti, che costituiscono il supporto

visivo a cui associare informazioni di diversa natura, dai dati grafici e documentali, ai dati di analisi e di costo, permettendo consultazioni e verifiche da più punti di vista e con relativa immediatezza. Tali processi trovano piena operatività alle diverse scale nel progetto del nuovo, diversamente da quanto accade per il costruito storico ove i riscontri applicativi risultano ancora complessi comportando un eccessivo consumo di tempo nella modellazione del dato. Molti sono gli studi e le ricerche che riguardano l'applicazione dei processi BIM all'architettura storica e che mettono in luce le criticità riscontrate nel coniugare la variabilità dell'architettura storica con la necessaria discretizzazione e standardizzazione che i processi parametrici implicano.

A tal proposito, la comunità scientifica internazionale, da alcuni anni, si occupa di *Historic/Heritage Building Information Modeling* (HBIM) e cioè dell'applicazione dei sistemi BIM al costruito storico indagando e sperimentando approcci idonei alla digitalizzazione del patrimonio esistente. Le ricerche e gli studi condotti in tale ambito si rivolgono alla lettura del manufatto, alla strutturazione delle informazioni ad esso associate e alla modalità di gestione delle lacune informative e geometriche che a questo tipo di architettura si riconducono. Si guarda all'HBIM come forma di multi-linguaggio e quale sistema di documentazione, supportato dalla rappresentazione tridimensionale digitale del manufatto, utile alla condivisione dei saperi e alla gestione interrelata dei dati.

Le nuove tecnologie consentono infatti di predisporre un documento digitale unitario, articolato su più livelli informativi, in cui sistematizzare dati di diversa natura e dunque dati a carattere teorico, tecnico, storico compositivo, strutturale, impiantistico, prefigurando un terreno di incontro comune, per una opportuna gestione del patrimonio architettonico ai fini della documentazione, valorizzazione, manutenzione e di qualsiasi intervento che su di esso debba essere operato.

Al contempo non è da sottovalutare l'obbligatorietà che sta interessando per legge (DM 560/2017) l'impiego di metodologie *BIM-Oriented* negli

appalti, considerando che la maggior parte degli interventi del nostro Paese è riferito a manufatti di interesse storico-architettonico.

Il lavoro che segue, collocandosi nello specifico disciplinare del rilievo e della rappresentazione dell'architettura, intende approfondire le metodologie e i sistemi per la scomposizione e per la modellazione semantica del costruito storico, nell'ambito di sistemi HBIM. In particolare, intende prefigurare un processo volto alla rappresentazione digitale informatizzata degli elementi dell'architettura storica, nell'ottica di garantirne un'adeguata conoscenza e implicitamente preservarne il valore nel tempo.
L'HBIM sfrutta le potenzialità dei modelli tridimensionali realizzati secondo i principi e gli strumenti delle piattaforme BIM, potenzialmente assumendo il ruolo di banca dati grafica per la conoscenza e per la documentazione del patrimonio costruito.
In tale ambito di ricerca, le criticità operative sono molteplici a fronte delle quali si rende necessario un lavoro di pre-comprensione dei dati acquisiti volto, da un lato, a verificarne i livelli di precisione e di accuratezza, dall'altro alla sistematizzazione delle informazioni, nell'ottica di individuare i livelli di simulazione nel modello digitale, in considerazione dell'unicità che caratterizza l'architettura storica.
La ricerca è articolata in sezioni che, a partire dall'analisi dello stato dell'arte relativo alle tecniche di modellazione e di acquisizione tridimensionale, prefigurano, attraverso un caso studio, soluzioni a supporto del processo di traduzione dei dati acquisiti, considerando le particolarità tipiche del costruito storico.

La prima parte fornisce un report delle attuali tecniche di documentazione dell'architettura. Queste sono intese sia come metodi di costruzione di modelli tridimensionali derivati, sia come tecnologie di acquisizione tridimensionale, con i relativi processi e risultati, fino a giungere al

concetto di *modello consapevole* che caratterizza il BIM, contemplandone le criticità proprie del costruito storico.

Nella seconda parte viene affrontato il caso studio individuato nell'Archivio di Stato di Napoli, manufatto di grande interesse, fortemente stratificato nel tempo e connotato dalla presenza di elementi propri dell'architettura storica. Dal punto di vista metodologico, il lavoro ha preso avvio dallo studio della documentazione di archivio, approfondendo successivamente la conoscenza del manufatto attraverso un'attenta campagna di rilievo *reality based*, acquisendo complessivamente una significativa quantità di dati, utili a comprendere l'articolata conformazione spaziale, nonché la storia delle trasformazioni dell'intero complesso.

La terza parte del lavoro, concerne la sperimentazione operata nel tradurre i dati acquisiti in un modello HBIM, concentrandosi in particolare sulla forma e sulla possibilità di identificare univocamente anche quelle parti dell'architettura storica non previsti nei sistemi BIM, ma strutturati in vocabolari riconosciuti. Uno specifico approfondimento si è operato sulla documentazione delle fasi temporali e di trasformazione del manufatto e successivamente sulla modellazione dei sistemi voltati e sulle possibili soluzioni teoriche e tecniche affinché il modello sia, ad un tempo, riferibile alla generalità dei casi, nella individuazione della tipologia conformativa, ma anche rispondente alle specificità dell'oggetto indagato, sfruttando la manipolazione delle nuvole di punti e le proprietà della modellazione di tipo parametrico e algoritmico.

CAPITOLO PRIMO

La modellazione tridimensionale
Strumenti e Tecniche

1.1 Il modello in architettura

A partire dalla metà del secolo scorso, la rapida evoluzione del digitale ha determinato ricadute significative nella società e in diversi campi applicativi. In particolare, nell'ambito delle discipline della rappresentazione, nell'arco di poco più di cinquant'anni, abbiamo assistito a radicali e repentine trasformazioni che hanno sostanzialmente modificato gli approcci, i modi e i metodi del rilievo e della rappresentazione, sebbene all'interno di un impalcato teorico che è restato immutato.

Come è noto, il disegno è strumento del pensiero e mezzo insostituibile per la comunicazione e per la formalizzazione di un'idea, nonché per la comprensione dell'esistente. Come per la scrittura, il linguaggio grafico si compone di segni, ovvero di convenzioni che nel loro insieme sono riconducibili a precisi significati, interpretabili secondo determinati codici culturali.

Nel disegno, dunque, viene ad istaurarsi una corrispondenza biunivoca tra realtà e segno, oltre che tra significante – inteso come parte che materializza il segno – e significato – poiché espressione e contenuto di un'idea – (GARAGNANI, 2012; DE FUSCO, 1971; DE FUSCO, et al.,

1966): *in this sense, learning to draw teaches the architect how buildings acquire meaning* (SCHEER, 2014).

Anche con l'avvento del digitale, nonostante gli evidenti cambiamenti verificatisi nella pratica operativa (si pensi alla stampa o alle operazioni di modifica del grafico), il disegno ha confermato la sua valenza di strumento interpretativo per la conoscenza del mondo, inverandosi attraverso la costruzione di modelli capaci di esplicitare i significati di ciò che rappresentano.

Se, in generale, il termine *modello* rimanda a una costruzione schematica rappresentativa di ciò che viene indagato, nello specifico, in architettura può essere ricondotto a una rappresentazione utile a comprendere un manufatto (E. Mandelli, Modello/idea... modello/riferimento... modello/rappresentazione, in MANDELLI & VELO, 2010) e in particolare a una sua riproduzione tridimensionale, capace di porre in evidenza determinati aspetti.

Il ricorso a modelli tridimensionali fisici o *maquette*[1], intesi come riproduzione materiale in scala a scopo illustrativo o sperimentale, ha radici profonde nella storia dell'architettura e le modalità di realizzazione degli stessi è variata notevolmente nel tempo. I primi riferimenti risalgono all'antica civiltà della Mesopotamia, mentre un uso continuativo e di vero supporto alla progettazione e alla comprensione delle opere è chiaramente documentato a partire dal '400, fin tutto il Rinascimento (BARLOZZINI & TOMASSI, 2014). In epoche a noi più vicine, la realizzazione di modelli plastici è stata una pratica largamente utilizzata sia per prefigurare un'idea che per documentare l'esistente. Una prima rivoluzione in questo ambito si è avuta a partire dagli anni '60 del '900 quando, ai modelli fisici, si sono affiancati modelli digitali inizialmente bidimensionali e successivamente tridimensionali, ossia elaborazioni numeriche in grado

[1] Il termine è mutuato dalla lingua francese. In ambito architettonico indica la riproduzione in scala (ovvero in formato ridotto) o a grandezza naturale di un manufatto, allo scopo di comunicarne o valutarne un'idea o un fenomeno che lo interessa.

di riprodurre forme attraverso calcoli e algoritmi fruibili attraverso uno schermo. Da allora, lo sviluppo della *Computer Graphic* – e più in generale delle ITC – ha portato, in pochi decenni, alla individuazione di una molteplicità di tipologie di modellazioni tridimensionali, diverse per figurazione, strutturazione e, soprattutto, finalità. Esistono infatti modelli per l'analisi e il calcolo strutturale, modelli per la comunicazione visiva, modelli per le analisi energetiche, modelli per la verifica della soluzione progettuale, etc.
Siano essi fisici o digitali, il concetto sotteso al modello dipende comunque dalla costruzione mentale (DOCCI, 2009) che si opera di un fenomeno reale, formulato secondo un pensiero e una finalità comunicativa e/ o operativa e la rappresentazione diviene il mezzo/linguaggio per il suo disvelamento. Ciò che cambia in maniera sostanziale nell'evoluzione dei modelli in ambito digitale è la possibilità *di coprire, in un unico sistema di rappresentazione, la totalità dei meccanismi di "visione" possibili: da un lato forniscono le medesime prestazioni dei modelli iconici, dall'altro di quelli non-iconici (modelli diagrammatici e matematici)* (M. Gaiani, Del disegno e del modello: rappresentazioni per il disegno industriale, in MIGLIARI, 2004a).

1.2 L'introduzione del digitale per la rappresentazione dell'architettura

La nascita del primo computer monoutente[2], così come lo intendiamo oggi, è ascrivibile agli anni '50 del '900 con il progetto di John Lenz per l'IBM 610, mentre quella dei primi strumenti informatici per il disegno è

[2] Lentz, John, A New Approach to Small-Computer Programming and Control, *IBM Journal of Research and Development*, Vol.2, No.1, p.72, 1958; http://www.columbia.edu/cu/computinghistory/610.html [2018]; http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/vintage/vintage_4506VV4001.html [2018].

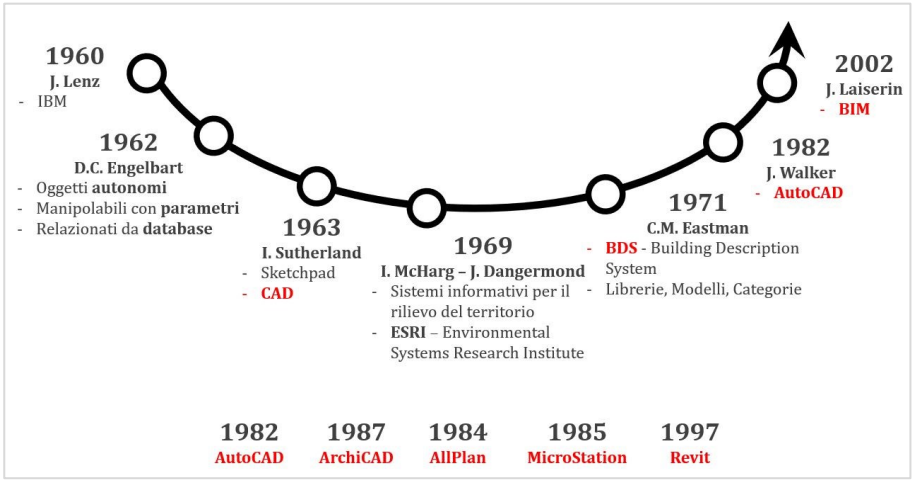


Fig. 1 - Evoluzione nel tempo degli strumenti oggi più in uso.
Elaborazione S. Scandurra.

di poco più giovane, risalendo al 1963 con lo sviluppo del software *Sketchpad*[3], antenato di ciò che negli anni '80 sarà *AutoCad* (J. Walker).
Il passaggio dal disegno su carta alla progettazione assistita dal computer (*Computer Aided Design* – CAD), ha inizialmente trasposto in ambiente digitale le modalità proprie del disegno tradizionale, modificando il supporto e gli strumenti, ma non l'approccio teorico (BIANCHINI, et al, 2016). Sebbene sussistano innumerevoli vantaggi di tipo operativo che agevolano e velocizzano le fasi di modifica e di copia degli elaborati, la rappresentazione in ambiente CAD può essere paragonata a quella realizzata con gli strumenti propri del disegno tradizionale, quali tecnigrafi e matite, servendosi in modo analogo di linee e campiture per definire un linguaggio utile per la comunicazione dei significati[4]. Diversamente, invece, per quanto riguarda la scala di rappresentazione, nello spazio

[3] Ivan Sutherland realizza lo strumento Sketchpad durante la propria tesi di dottorato al MIT, con la supervisione di Steven Coons.

[4] "*Disegno rimane de-signum: la mano che ha mosso una matita e che oggi muove un mouse, deve lasciare sul foglio un ductus, leggibile, comprensibile, condiviso ed eloquente che garantisca i contenuti del complesso rapporto biunivoco esistente tra l'oggetto e la sua immagine nella precisa finalità di arricchire con un sostegno reale il lavoro interdisciplinare.*", in *Le ragioni del disegno*, XXXVIII Convegno internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione, XIII Congresso della Unione Italiana del Disegno, Firenze, 2016.

infinito del foglio digitale il disegno è solo simbolicamente pensato in scala ridotta in funzione dell'*output* di stampa richiesto, sebbene l'unità del disegno nell'*input* sia direttamente rappresentativa dell'unità metrica.
Il mezzo informatico riproduce figure geometriche, campiture bidimensionali e segmenti di diverso spessore con coordinate di inizio e fine, coerentemente con i codici del linguaggio grafico che sin dai primi trattati di architettura sono serviti a rendere espliciti i segni. Se dal punto di vista operativo introduce procedure innovative, in termini di rappresentazione del significato non ha prodotto esiti diversi rispetto al disegno tradizionale in quanto permane la necessaria sussistenza di convenzioni condivise e l'interazione con il fruitore successivo.
Gli strumenti CAD[5] si sono presto evoluti verso la terza dimensione[6]. A partire dalla rappresentazione bidimensionale, infatti, le nuove tecnologie hanno prospettato modalità di visualizzazione dell'architettura in modelli tridimensionali, consentendo di esplorare un manufatto nella sua complessità con la possibilità di comprenderne l'articolazione spaziale e la consistenza volumetrica[7].

[5] I sistemi CAD in realtà derivano dai sistemi CAM, ovvero i sistemi di produzione assistita da computer (*Computer Aided Manufacturing*) nati per la creazione di modelli digitali di componenti ed il controllo di macchine utensili.

[6] Timothy Jhonson, collega di Ivan Sutherland, idealizza Sketchpad III, ovvero una versione tridimensionale del precedente software omonimo, dotata di un'interfaccia grafica divisa in quattro finestre, tre in proiezione ortogonale e una in proiezione prospettica, consentendone una visione simultanea come avviene ancor oggi nei software di modellazione 3D. Si tratta del primo tentativo di rappresentare interattivamente un solido nella sua complessità stereometrica (SDEGNO, 2013).

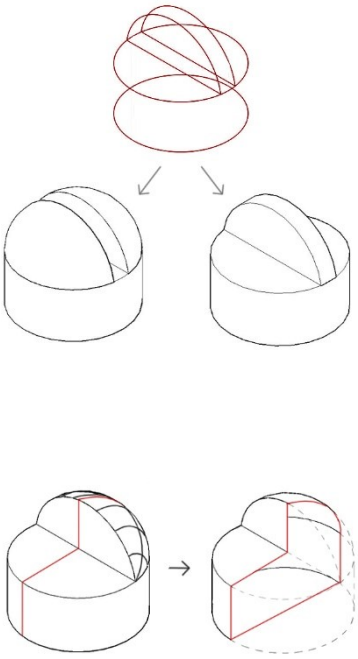
[7] Le prime ricerche sulla modellazione tridimensionale nascono all'Università di Cambridge alla fine degli anni '60. Fuori dall'ambito accademico, la maggior parte dei finanziatori interessati furono le case automobilistiche (Ford, General Motors, Nissan, Mercedes) o aerospaziali (McDonel-Douglas, Lockheed, Northrop), le quali svilupparono personali soluzioni software a partire dagli anni '70. In particolare, la Lockheed scrisse il codice del CADAM (*Computer Augmented Drafting and Manufacturing*) che nella metà degli anni '70 fu acquistato dalla compagnia aerea francese Avions Marcel

Fig. 2 – La modellazione dei bordi (in rosso) potrebbe generare confusione nella interpretazione. Inoltre, non consente di eliminare dalla vista le porzioni di modello posteriori.

Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 3 – La modellazione delle superfici riproduce una sorta di pelle sottile rimanendo però cava all'interno.

Elaborazione S. Scandurra.



1.3 Evoluzione degli strumenti di modellazione tridimensionale

Le tecniche adoperate per la modellazione tridimensionale digitale sono ad oggi numerose e dipendenti dalla tipologia di risultato che si intende ottenere.

Indipendentemente dalla tecnica, una modellazione tridimensionale digitale è da intendersi come processo di comprensione e di descrizione di un oggetto attraverso la definizione della struttura geometrica di cui si compone. L'introduzione della modellazione tridimensionale in ambito ingegneristico e architettonico ha dato la possibilità di prefigurare un'idea nella sua completezza formale, consentendo di realizzare un prototipo grafico e di beneficiare della velocità con cui reperirne infinte viste ortografiche, assonometriche o prospettiche, semplicemente ruotandolo in base alle necessità, anziché lavorare attraverso onerose operazioni grafiche disegnate sul piano bidimensionale, attraverso costruzioni basate sulla geometria descrittiva.

Le prime sperimentazioni in ambito CAD sono quelle relative alla *modellazione dei bordi* e alla *modellazione delle superfici*: si tratta di procedure fondate sulla manipolazione di primitive grafiche di base[8] che riproducono le forme reali attraverso un'astrazione. La prima, la *modellazione dei bordi* o *wireframe* (Fig. 2), come suggerito dal nome stesso, riproduce esclusivamente i contorni degli oggetti reali, attraverso l'utilizzo di punti e

Dassault, la quale sviluppò CATI (*Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive*), divenuto CATIA (*Computer Aided Three Dimensional Interactive Application*) nel 1981; in seguito adottato in numerosi ambiti ingegneristici poiché in grado di gestire gran parte del ciclo di vita di un prodotto, dal design (CAD), alla produzione (CAM), all'analisi (CAE), il software è ancor oggi tra i più utilizzati.

[8] Le primitive semplici, in geometria, sono le entità di base che, composte tra loro, consentono di generare una serie di altre forme. Nell'ambito della Computer Grafica, le primitive di base sono il punto, la linea e la superficie/poligono. In particolare, la superficie può essere intesa come triangolo, poiché le altre figure geometriche possono essere scomposte in tanti triangoli.

di linee rette e curve, senza alcun riferimento al concetto di *superficie*. La seconda, la *modellazione delle superfici* (Fig. 3), scompone l'oggetto in un certo numero di facce piane – sagomate attraverso una preventiva analisi dei contorni –, giustapposte tra loro al fine di riprodurre le superfici reali, senza tener conto del concetto di *pieno*.

In entrambi i casi vengono trasposte nei piani digitali (XZ ed YZ) le operazioni inizialmente ammesse solo nel piano XY, divenendo affini all'oggetto reale o meglio, alla sua scomposizione geometrica tridimensionale. I dati metrici sono assegnati all'oggetto attraverso attributi numerici costanti, rendendo le eventuali operazioni di modifica necessariamente puntuali.

Gli strumenti software dedicati alla produzione digitale di modelli hanno inizialmente interessato il settore ingegneristico della produzione automobilistica e aerea e si sono sviluppati con obiettivi per lo più legati alla riproduzione metrica e geometrica sempre più accurata dell'oggetto reale. Ciò ha comportato degli approfondimenti specifici: da un lato si sono sviluppati algoritmi per la realizzazione di curve complesse, dall'altro si è concretizzato il concetto di modellazione solida tridimensionale.

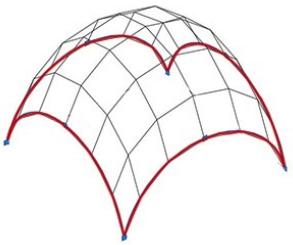


Fig. 4 – Coons Patch per la costruzione geometrica di una volta a vela.

Elaborazione S. Scandurra.

1.3.1 Le curve complesse

Nel 1967 vengono pubblicate le ricerche di S. A. Coons[9] sugli algoritmi di costruzione della superficie a doppia curvatura detta *Coons Patch*, ovvero una superficie apparentemente libera, gestita attraverso il controllo delle sole curve di bordo, le quali uniscono a due a due i vertici di un quadrilatero sghembo (Fig. 4).

Dei primi anni '60 sono invece le sperimentazioni di Pier Bézier per la Renault. P. Bézier comprende la necessità di gestire non solo i contorni,

[9] Docente del MIT, Steven Coons è particolarmente importante nella storia della Computer Grafica, oltre che per i suoi algoritmi di costruzione delle *superfici di Coons*, anche come Advisor di I. Sutherland, ovvero il PhD che programmò *Sketchpad*.

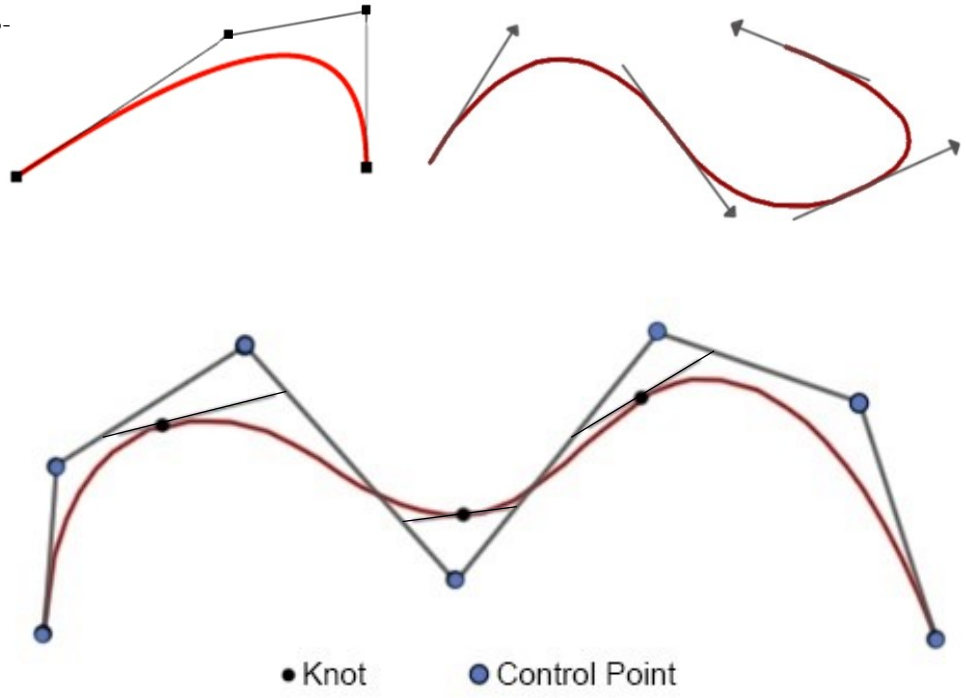


Fig. 5 – Curva di Bézier. e B-spline.

Elaborazione S. Scandurra.

(USHAKOV, 2011) ma anche la superficie stessa[10]. Egli formula un particolare tipo di curva smussato, descrivibile matematicamente in modo da calcolarne le coordinate spaziali e modificabile secondo un limitato numero di punti di controllo anche intermedi. L'algoritmo, ancor oggi utilizzato da molti software di grafica vettoriale, rende possibile la costruzione di quella che è detta appunto *curva di Beziér* (Fig. 5).

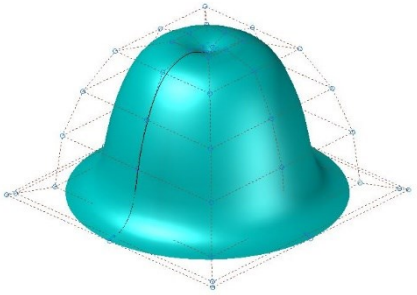
[10] La *curva di Hermite*, dal matematico francese di fine '800 Charles Hermite ad esempio, consente il controllo dei soli punti finali e del vettore ad essi tangente, non permettendo quindi una diretta influenza nello sviluppo della forma.

A partire dagli studi di Bézier, negli anni '70 si discute sulle *B-Spline* e nel 1975 K. J. Vesprille, in una tesi di dottorato[11], formalizza le *B-Spline* per sistemi CAD, ovvero un particolare tipo di *Spline*[12] costituita proprio dalle *curve di Bézier*, al fine di agevolare la modellazione di superfici tridimensionali complesse. K. J. Vesprille diventa famoso nel mondo CAD poiché formula, a partire da una generalizzazione e dall'approfondimento delle precedenti sperimentazioni, le *NURB* (*Non Uniform Rational Basis-splines*)[13].

Negli stessi anni si sviluppa anche la metodologia di costruzione delle curve definita *Subdivision Surfaces* che si basa sul concetto che una curva è rappresentabile attraverso una spezzata i cui angoli vengono più volte tagliati fino ad ottenere una curva sufficientemente morbida (*smoothing*).

Fig. 6 – Modello in superficie tridimensionale NURB.

Elaborazione S. Scandurra.



[11] Kennet James Vesprille, *Computer-Aided Design Applications of the Rational B-Spline Approximation Form,* 1975. Electrical Engineering and Computer Science Department, Syracuse University, Advisor: Steven A. Coons.

[12] Le Spline sono sostanzialmente curve composte da più curve polinomiali, congiunte in modo tale che nel punto di congiunzione, la tangente e la curvatura delle curve congiunte sono identiche. Dal punto di vista formale quindi la congiunzione è fatta in modo da mantenerne continuità e regolarità.
Il nome deriva dalle strisce di materiale flessibile che veniva utilizzato per la modellazione fisica di particolari curve, come supporto alla rappresentazione a mano, ovvero dagli oggetti fisici che i matematici studiarono per formularne la costruzione algoritmica: "*Back in the days before computers, architects, engineers, and artists would draw their designs for buildings, roads, machine parts, and the like by using pencil, paper, and various drafting tools. (…) Often, a curve was needed that went smoothly through a number of predetermined points. This problem was particularly acute in shipbuilding: although a skilled artist or draftsman could reliably hand-draw such curves on a drafting table, shipbuilders often needed to make life-size (or nearly life-size) drawings, where the sheer size of the required curves made hand drawing impossible. (…) To aid in the task, the loftsman would employ long, thin, flexible strips of wood, plastic, or metal, called splines. The splines were held in place with lead weights, called ducks because of their resemblance to the feathered creature of the same name*" (SCHNEIDER, 1996).

[13] Attraverso la modellazione di tipo NURB è possibile riprodurre dalle forme più semplici a quelle più complesse ed organiche. Questo tipo di modellazione ha infatti agevolato la diffusione di architetture free-form, rendendo estremamente accessibili modellazioni che la geometria descrittiva e le tecniche tradizionali permettevano solo attraverso lunghi procedimenti, qui tradotti in algoritmi informatici di manipolazione digitale. Cfr. https://www.rhino3d.com/nurbs [2018].

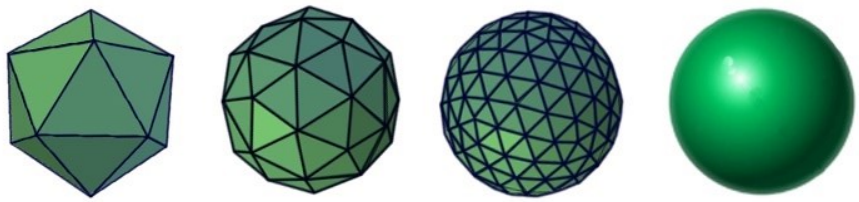


Fig. 7 – Operazione di smoothing per realizzare una sfera a partire da un poliedro.
Elaborazione S. Scandurra.

Queste ultime due tecniche di costruzione delle curve – NURBS e *Subdivision Surface* – consentono di riprodurre un'ampia gamma di forme geometriche, dalle *curve di Bézier* e le coniche, fino a cerchi e rette.
In anni più recenti si è avviato il tentativo di congiungere le proprietà delle NURB con quelle della *Subdivision Surfaces* attraverso le cosiddette *T-Spline*[14].

1.3.2 La modellazione solida

Le tecniche di modellazione definitesi a partire dagli anni '70[15], a differenza delle prime sperimentazioni (*modellazione dei bordi* e *modellazione delle superfici*), introducendo il concetto di *volume* cambiano sostanzialmente le modalità con cui generare le forme. Questi sistemi infatti riguardano un tipo di modellazione tridimensionale solida e consentono di ragionare anzitutto sull'idea di *pieno* e di *vuoto*, operando per masse digitali e per relazioni topologiche, piuttosto che con accostamenti di linee e facce del tutto indipendenti tra loro[16].

[14] Sederberg, T. W., Zheng, J., Bakenov, A., and Nasri, A., 2003, T-Splines and T-NURCCs, in *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), 477-484.

[15] Nel 1972 la MAGI (*Mathematic Application Group Inc.*) realizza il software *SynthaVision* per analizzare tridimensionalmente le esposizioni alle radiazioni nucleari. Pur se non pensato per il design, si tratta del primo esempio di modellazione solida affine al metodo CSG (*Constructive Solid Geometry*).

[16] Cfr. 1.3.1.

All'Università di Cambridge, a partire dal 1969 C. Lang e I. Braid propongono una serie di sperimentazioni che conducono in pochi anni alla formulazione di un primo modellatore di tipo *B-rep* (*Boundary representation*). Tale sistema può essere inteso come un'implementazione della *modellazione di superfici* perché utilizza ugualmente superfici[17] realizzate a partire da bordi e da vertici ma, accanto all'informazione geometrica, reca anche l'informazione topologica dell'oggetto (oltre le dimensioni, anche le relazioni tra vertici, bordi e facce e il loro orientamento).
Contemporaneamente si sviluppa la tecnica CSG - *Constructive Solid Geometry*[18], un tipo di modellazione *volume-based*, ovvero che genera forme a partire da primitive solide (parallelepipedi, cilindri, sfere, ...), combinate esclusivamente mediante operazioni booleane (AND, OR, NOT).

Nelle diverse modalità operative e procedurali, l'obiettivo resta sempre quello di dar luogo a rappresentazioni quanto più prossime al reale, nei suoi significati e nelle sue articolazioni spaziali, fornendo una possibile risposta al bisogno di fisicità dei sistemi di rappresentazione. Così come indicato da V. Cardone, attraverso le elaborazioni digitali tridimensionali *la linea ha perso quel carattere decisivo, quell'importanza assoluta che ha avuto in tutta la rappresentazione grafica, tecnica e non, fino ad oggi. Pare, inoltre, che si profili una prevalenza dei modelli che (…) vengono proposti alla vista 'come se fossero' l'oggetto reale*[19]. Con gli anni infatti, l'obiettivo primario della modellazione è stato fortemente basato sulle potenzialità di resa visiva, per la possibilità di costruire un'immagine mimetica del reale con risultati eccellenti dal punto di vista fotorealistico. Gli ultimi sviluppi in tal senso sono legati ai progressi dei motori di renderizzazione e alle attuali tecniche in grado di

[17] Le superfici sono da intendersi come rappresentazione matematica di entità infinitamente sottili. Sono superfici parametriche tutte quelle superfici ottenute attraverso le costruzioni di Hermite, Bézier, B-spline o NURB (cfr. 1.3.1).

[18] Cfr. nota 14.

[19] V. Cardone, Modelli grafici e modelli informatici, in DELL'AQUILA & DE ROSA., 2000.

immergere l'osservatore nella realtà riprodotta o immaginata, ricreando un vero e proprio mondo parallelo (A.R. – *Augmented Reality* e V. R. – *Virtual Reality*).

In altre parole, i progressi della modellazione tridimensionale, seppur inizialmente assimilabili a una digitalizzazione del disegno tradizionale (linee e superfici) dotata di profondità, in pochi anni sono giunti alla riproposizione volumetrica dell'architettura e al fotorealismo, consentendo di studiare un manufatto nelle sue specificazioni e nella sua articolazione spaziale, scomponendolo e semplificandolo in forme geometriche diversamente articolate.

E attraverso filtri grafici e texturizzazioni su modellazioni anche non necessariamente accurati dal punto di vista metrico, è possibile riprodurre realisticamente un manufatto, avvantaggiandosi con sistemi di navigazione immersiva nella comunicazione delle apparenze visive.

CAPITOLO SECONDO

Acquisizione ed elaborazione dei dati nel rilievo 3D

Accanto alle tecniche di realizzazione di modelli tridimensionali *derivati* intesi quale ri-presentazione del reale, le attuali tecnologie di acquisizione hanno consentito di predisporre modelli iconici derivati da acquisizioni *reality based*. Alle tecniche tradizionali consolidatesi nel corso dei secoli, si sono infatti affiancate tecniche digitali *no-contact* che, attraverso *range camere*, fotocamere e sensori, sono capaci di restituire una gran quantità di dati in tempi fortemente contenuti.
Gli esiti di queste indagini possono riguardare diversi aspetti del manufatto, dalle caratteristiche superficiali a quelle intrinseche, fornendo, a seconda dei casi, risultati di tipo diverso.
I dati forniti dagli strumenti *no-contact* utilizzati per il rilevamento metrico sono di tipo qualitativo e quantitativo. I sistemi più diffusi riguardano le tecnologie *laser scanner* e le tecniche di *fotogrammetria digitale automatizzata*, largamente utilizzate soprattutto nell'ambito del patrimonio costruito poiché consentono la registrazione accurata dei dati dimensionali di un manufatto architettonico attraverso un modello puntiforme fortemente mimetico della realtà.
Sono invece di tipo qualitativo i dati forniti da strumenti quali le *termocamere*, attraverso cui si ottiene un'immagine 3D termica del

manufatto, registrando le emissioni di radiazione infrarossa dei singoli punti di corpo caldo e indagando strati fino a 20 cm di profondità, o ancora i sistemi che misurano il tempo e la velocità di attraversamento di un *impulso sonico* nella muratura (le prove soniche o ultrasoniche), utilizzati per qualificare la morfologia della sezione muraria, segnalandone vuoti o lesioni non percepibili ad occhio nudo; e il *georadar* che, attraverso la qualificazione di segnali elettrici di ritorno degli impulsi di energia elettromagnetica indotta, ricerca elementi nascosti nelle chiusure verticali e orizzontali, o nelle tessiture murarie coperte alla vista.

Le categorie di sensori *no-contact* affrontate nei prossimi paragrafi, riguardano le strumentazioni *reality-based* sviluppate a partire dagli anni '90 dello scorso secolo, dedicate all'acquisizione tridimensionale dei dati metrici e di superficie del manufatto.

2.1 Sistemi *reality based*

L'obiettivo comune alle diverse tecniche di rilievo è quello di acquisire i dati relativi allo spazio tridimensionale in maniera quanto più rispondente al reale. In particolare, le strumentazioni attualmente utilizzate e classificabili in *range-based* (laser scanner, stazione totale, radar, …) ed *image-based* (teodoliti, tacheometri, elaborazioni fotogrammetriche, …), ovvero in sensori ottici attivi e passivi[20], si sono evolute con una velocità persino più rapida rispetto alle tecniche di restituzione grafica. La scelta sul tipo di strumentazione da impiegare avviene in funzione di una serie di caratteristiche, in parte relative all'oggetto del rilievo (dimensioni,

[20] I sensori trattati si basano sull'utilizzo di radiazione luminosa. La natura della luce utilizzata differenzia i sensori tra attivi e passivi, ovvero saranno attivi i sensori la cui luce è codificata e svolge un ruolo nella misurazione.; saranno invece passivi i sensori che sfruttano la presenza di luce naturale nella scena da acquisire.

collocazione, percorribilità, …) e d'altra parte in relazione alle disponibilità e agli obiettivi del rilevatore. Come è noto, esse producono un modello discreto della realtà, tridimensionale, digitale e fotorealistico, reso in *nuvole di punti*.

Con le nuvole di punti lo spazio tridimensionale sembra apparentemente non avere più segreti: qualunque sia la forma, la dimensione o la complessità degli spazi, l'uso combinato di una o più strumentazioni consente l'acquisizione dei dati con un alto grado di affidabilità metrica e nell'intero sviluppo tridimensionale. Manipolare una nuvola di punti nello spazio digitale, è paragonabile a una navigazione in una foto 3D svincolata dal punto di acquisizione e misurabile, poiché la riconoscibilità degli elementi presenti nella scena è immediata.

Ciononostante, le nuvole, di per sé, non producono conoscenza, non essendo altro che un gran numero di punti registrati nella memoria informatica e del tutto indipendenti tra loro, se non rispetto al riferimento cartesiano di appartenenza nello spazio digitale. Le caratteristiche registrate in ogni punto riguardano esclusivamente: la posizione, la normale alla superficie, la riflettanza e il colore in RGB. In particolare la *posizione* è riferita alle coordinate x,y,z misurate, laddove non vi sia l'associazione a strumentazione GPS, rispetto al centro di acquisizione nel caso del laser scanner, ovvero relative allo spazio digitale nel caso della fotogrammetria; la *normale alla superficie* permette l'individuazione del lato positivo e del lato negativo dello spazio rilevato ed è un dato particolarmente importante soprattutto in riferimento alla trasformazione dei punti in superfici o in fase di texturizzazione del modello; la *riflettanza* Y è riconducibile nelle scansioni laser alla percentuale di riflessione del pattern luminoso che tocca la superficie e consente di acquisire un primo, seppur embrionale, dato materico, espresso in scala di grigi, con valori che variano da 0 a 255; il *colore in RGB* restituisce il dato cromatico che deriva dall'acquisizione fotografica che generalmente gli strumenti effettuano in automatico contestualmente alla scansione, influenzato dalle condizioni di illuminazione al momento dell'acquisizione.

La nuvola di punti, sia essa derivata da sistemi *range based* o *image based*, è considerata un modello privo di intelligenza poiché è del tutto inconsapevole di ciò che riproduce in quanto fornisce un calco virtuale (REMONDINO, 2011) degli aspetti superficiali di un manufatto architettonico senza alcun dato relativo al significato di ciò che si è acquisito. È inoltre privo di consistenza volumetrica in quanto riproduce le sole forme esteriori, per quanto consenta di immagazzinare una grande quantità di dati dimensionali con un alto livello di accuratezza. In tal senso, le operazioni di rilievo e di interpretazione vengono soltanto trasposte nello spazio digitale, poiché vi è la necessità di dover rielaborare il dato, non solo in termini di processamento, ma anche e soprattutto in termini di comprensione dei significati.

2.1.1 I sistemi range based

I sistemi *range based*, ovvero i dispositivi *reality-based* che impiegano sensori attivi, sono dotati di *range-camera* il cui sistema di acquisizione delle distanze è basato sulla proiezione – sulla superficie da rilevare – di pattern luminosi opportunamente codificati e la successiva ricezione degli stessi attraverso un sensore in grado di registrarne la risposta. I più diffusi utilizzano la luce *laser*[21], poiché consente di raggiungere distanze piuttosto elevate. Ai fini della sicurezza sono contrassegnati da un parametro definito LEA - Limite di Emissione Accettabile[22] che è rappresentativo della categoria di rischio relativo al livello di radiazione emesso (BORNAZ, 2006).

[21] L.A.S.E.R. è l'acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Si tratta di una radiazione elettromagnetica – onda luminosa – che risponde a particolari caratteristiche, ovvero 1) essere composta da una sola frequenza di luce (monocromatica); 2) propagarsi in modo unidirezionale anche a grande distanza (coerenza spaziale); 3) essere costituita da onde di pari frequenza e pari fase (coerenza temporale). La radiazione luminosa emessa dal laser può essere ultravioletta (da 200 a 400 nm di lunghezza d'onda), visibile (tra i 400 e i 700 nm) o infrarossa (tra i 700 e i 300 nm).

[22] Secondo il LEA, gli strumenti laser si distinguono in 5 classi (1, 2, 3A, 3B, 4); all'aumentare della classe, aumenta il livello di pericolosità dello strumento.

Fig. 8 – Nuvola di punti degli esterni di Palazzo Donn'Anna a Napoli. Acquisizione con laser scanner a tempo di volo Riegl VZ400i ed elaborazione con RiscanPro.

Fonte: contributo dal titolo *Procedure Integrate per il rilievo e la documentazione digitale di ambienti complessi,* presentato dal gruppo di ricerca M. Campi, A. di Luggo, D. Palomba, F. Pisano, M. Pulcrano, L. Repola, S. Scandurra, N. Scotto di Carlo, nell'ambito del convegno internazionale TDA – *Technologies & Digital Artefacts for cultural heritage*, Napoli 2019.

Dal momento in cui il raggio laser colpisce la superficie dell'oggetto da rilevare, una parte della radiazione luminosa sarà assorbita, un'altra parte sarà trasmessa e un'altra parte ancora sarà riflessa. Tutti e tre i coefficienti saranno rappresentativi di un'interazione tra la specifica tipologia di luce e le caratteristiche materiche superficiali dell'oggetto. È per questo che la riflettività (o riflettanza) è considerato un dato significativo nelle classificazioni dei punti della nuvola: a seconda della percentuale registrata infatti, è possibile una prima associazione del dato acquisito ad alcune categorie materiche.

L'acquisizione del dato avviene in tempi decisamente rapidi ed è del tutto indipendente dalla morfologia dell'oggetto da rilevare.

Per oggetti di modesta grandezza (oggetti d'arte, prototipi meccanici, che necessitano di misurazioni accurate al di sotto del millimetro) è possibile utilizzare sistemi basati sulla *triangolazione*[23] mentre per manufatti a scala

[23] La misurazione avviene sulla base del teorema del triangolo secondo cui la misura di un cateto (a) corrisponde al prodotto tra la misura dell'altro cateto (b) per la tangente dell'angolo acuto opposto al primo cateto: $a = b * \tan \alpha$.

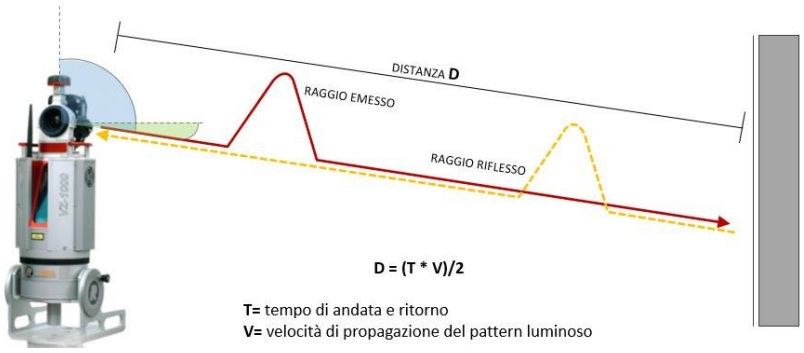


Fig. 9 – Tecnologia di misurazione a tempo di volo.
Elaborazione S. Scandurra.

architettonica o superiore è necessario ricorrere a sistemi basati sulla *misura della distanza* (*distanziometri*)[24].

I distanziometri in particolare si basano sul tempo che il raggio luminoso impiega per toccare la superficie da rilevare e tornare indietro (*TOF – Time of Flight*). L'elevata velocità della luce però, provoca generalmente un'incertezza vicina ai 2 mm: ciò, insieme alla capacità di raggiungere grandi distanze, li rende strumenti idonei al rilievo di manufatti di grandi dimensioni piuttosto che per il rilievo di dettaglio minuto.

Gli strumenti attualmente in commercio si differenziano per tecnica di misurazione; sono infatti disponibili dispositivi in grado di misurare *direttamente* o *indirettamente* il tempo di volo. Nello specifico, i primi (Fig. 9) emettono impulsi luminosi noti[25] sulla scena che, chiaramente, in parte verranno riflessi e riletti dallo strumento stesso: nota la velocità di propagazione dell'impulso, la distanza sarà in tal caso calcolata

[24] "*Il principio di funzionamento sfrutta il concetto del rilievo celerimetrico proposto agli inizi del XIX secolo da Ignazio Porro che mise in evidenza come la sola misura della distanza non sia sufficiente a localizzare un punto nello spazio: occorre infatti definire la direzione nello spazio (lungo cui è misurata la distanza) mediante 2 angoli tra loro ortogonali, un angolo sul piano orizzontale denominato angoli azimutale e un angolo nel piano verticale denominato angolo zenitale.*" Bianco I., Lingua M. A., Piumatti P., Il rilievo metrico dei tessuti edificati, in ZERBINATTI 2014, P. 119-124.

[25] *Pulsed Wave* PW; è nota la tipologia di luce emessa e la velocità della stessa, assunta pari a $2{,}9979 \times 10^8$ m/s.

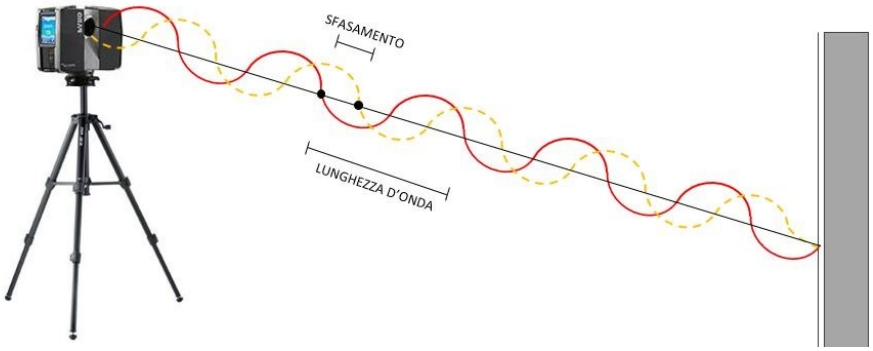


Fig. 10 – Tecnologia di misurazione a modulazione di fase.

Elaborazione S. Scandurra.

direttamente in funzione della quantità di tempo – infinitesima – trascorsa tra l'impulso emesso e l'impulso ricevuto (tempo di volo).

I secondi invece sono definiti a *modulazione di fase* (Fig. 10). Questi emettono una radiazione luminosa continua a frequenza nota[26] modulata sinusoidalmente; per ottenere la distanza, misurano lo sfasamento (differenza di fase) tra l'onda emessa e quella ricevuta.

Un'ulteriore classificazione dipende dalla modalità di acquisizione *statica* o *dinamica*: nel primo caso, nel progettare la fase di campagna, vanno opportunamente scelti i diversi punti dove stazionare lo strumento per le singole acquisizioni, al fine di ridurre il più possibile le zone d'ombra in considerazione del campo di acquisizione dello strumento; ogni acquisizione corrisponderà ad una singola nuvola di punti che, attraverso l'individuazione semi-automatica di *target*[27] nella fase di processamento, sarà univocamente posizionata nello spazio digitale.

In un'acquisizione di tipo dinamico, invece, lo strumento acquisisce i dati nel percorrere gli spazi che si intendono rilevare. Su questo principio si basano i sistemi ALS - *Airborne Laser Scanner* che associano, ad un laser scanner, un sistema di posizionamento satellitare e un sistema di

[26] *Continuos Wave* (CW).

[27] I *target* sono oggetti fisici disposti preventivamente nello spazio reale e rappresentano quei punti di controllo che consentono di riconoscere la continuità dello spazio rilevato da punti di stazione differenti, al fine di ricomporre la nuvola di punti complessiva.

navigazione inerziale. Accanto a ciò vanno considerati i più recenti sistemi MMS - *Mobile Mapping Systems* dotati di un sistema inerziale in cui le misure fornite da accelerometri e giroscopi vengono utilizzate per tracciare la posizione di un oggetto rispetto alla posizione di partenza, all'orientamento e alla velocità di movimento, senza segnale GNSS - *Global Navigation Satellite System*. Tali sistemi calcolano la traiettoria percorsa e costruiscono, aggiornandola continuamente, la mappa tridimensionale dell'ambiente (RIISGAARD & BLAS, 2003).
In entrambi i casi la nuvola si genera in contemporanea con l'acquisizione, da cui la qualificazione in strumenti di tipo attivo.
La struttura dei dati cambia tra una tipologia di strumento e l'altro: in particolare nelle acquisizioni statiche, le coordinate relative dei singoli punti della nuvola conservano il riferimento con il punto di stazionamento da cui sono state acquisite[28], mentre ciò non avviene nel caso delle acquisizioni dinamiche.
Il dato elaborato è inizialmente monotòno, ossia ogni punto è dotato solo di un valore di riflettanza in aggiunta alla coordinata; la colorazione per lo più avviene riproiettando sulla nuvola il dato di tipo fotografico. A seconda dello strumento, le fotografie possono essere acquisite direttamente in simultanea alla scansione o provenire da strumentazioni secondarie. L'associazione del dato colorimetrico al dato metrico consente di ottenere un modello dalla veste estremamente fotorealistica.

In ogni caso, nell'impiego di tali sistemi, come è noto, l'operatore non sceglie esattamente i singoli punti da rilevare ma, tutt'al più, l'ambiente in cui si trovano o una porzione d'esso. I parametri gestibili dall'operatore prima dell'acquisizione riguardano generalmente la porzione angolare di spazio da acquisire, la densità[29] di punti della nuvola ed il numero di volte

[28] In questo caso si tratta di una misurazione di tipo sferico, per cui di ogni punto vanno considerate le coordinate sferiche, due angoli ed una distanza.

[29] Per densità si intende la quantità di punti da rilevare, definiti sulla base dell'intervallo presente tra un punto e l'altro a distanza nota (es: 12mm tra un punto e l'altro su una

in cui battere ogni singolo punto. Altri parametri risultano invece intrinsecamente dipendenti dallo strumento scelto e dalla specifica situazione in cui ci si trova[30].

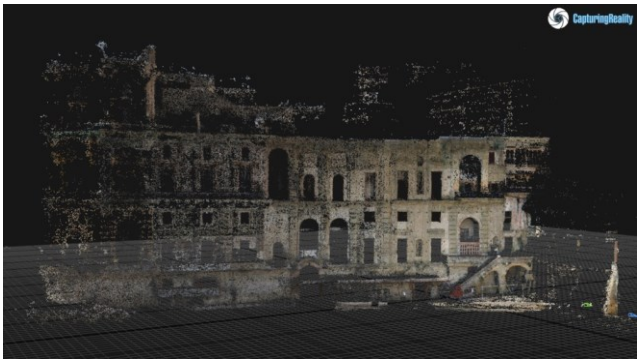
2.1.2 I sistemi image-based

Per quanto riguarda i sistemi *image-based*, si tratta di una tecnologia detta a sensori ottici passivi in quanto non svolgono un ruolo attivo nel rilievo del dato metrico e la strutturazione della nuvola di punti non coincide con il momento dell'acquisizione ma prevede una fase di lavorazione successiva. Tra le tecniche di acquisizione passiva, negli ultimi anni è largamente utilizzata la *fotomodellazione* (DE LUCA, 2011), ossia la fotogrammetria digitale che consente di generare nuvole di punti misurabili, a partire da acquisizioni fotografiche (REMONDINO & EL-HAKIM, 2006). In particolare, la generazione del modello tridimensionale digitale avviene grazie alla definizione dell'omologia geometrica tra i fotogrammi e la scena reale, riproposta digitalmente per la ricostruzione sottoforma di nuvola di punti.

La procedura avviene ad oggi attraverso sistemi quasi del tutto automatizzati, grazie ai numerosi protocolli che integrano la strategia di orientamento *SFM* (*Structure For Motion*) derivante dalla *Computer Vision*, con la misurabilità ricercata dalla fotogrammetria. Il processo prende avvio

superficie immaginata a 10 m dallo strumento). È chiaro che, a parità di impostazioni, se il punto di stazionamento dello strumento è più vicino all'oggetto da acquisire, il numero di punti acquisito sulla stessa porzione di oggetto sarà maggiore rispetto alla stessa acquisizione effettuata da un punto di stazionamento più lontano. Ciò sta a significare anche che se l'acquisizione è tale da presentare un intervallo tra i punti inferiore alle discontinuità presenti sull'oggetto da acquisire, allora tali discontinuità saranno leggibili dalla nuvola di punti, viceversa l'oggetto risulterà "a bassa risoluzione".

[30] In ogni rilievo è importante tener conto in particolare di tre fattori fondamentali: accuratezza, precisione e risoluzione. Mentre la risoluzione dipende dal passo di campionamento, l'accuratezza e la precisione sono legati dall'errore sistematico o casuale, insito nell'atto della misurazione stessa. Nello specifico, l'accuratezza indica quanto la misura sia vicina a quella reale mentre la precisione indica quanto siano vicine tra loro le diverse misurazioni riguardanti uno stesso punto, a parità di condizioni.



dalla ripresa fotografica che va effettuata con fotocamere digitali (da terra o aeree – col supporto di velivoli o droni) rispettando precise regole di distanza e di posizione rispetto all'oggetto reale, oltre che di sovrapposizione tra fotogrammi successivi[31].

A seconda del soggetto da rilevare, in fase di scatto va opportunamente programmato il percorso di acquisizione e il tipo di camera dalla quale dipenderà la qualità dei fotogrammi. Le fotocamere moderne (compatte, brige, reflex) consentono di acquisire immagini costituite da diversi milioni di *pixel*[32] per cui generalmente la risoluzione è molto alta. La lente della camera o obiettivo consente di variare, a parità di posizione relativa dall'oggetto inquadrato, la porzione di scena o angolo visivo; esistono

[31] La percentuale di sovrapposizione dipende, in parte, dall'applicativo che si intende utilizzare (generalmente è richiesto almeno il 60-70% di sovrapposizione tra fotogrammi successivi), d'altra parte è necessario per l'avvio della procedura stessa poiché è chiaro che riusciremo ad ottenere una vista stereoscopica solo della porzione di scena inquadrata da almeno due punti di vista differenti e quindi presente in una certa percentuale in almeno due fotogrammi.

[32] I pixel possono essere descritti come l'unità minima di cui si compone un'immagine. Ogni fotogramma è costituito da una matrice di pixel, la cui posizione è definita dalle coordinate u,v che ne descrivono la riga e la colonna di appartenenza. Il sistema di coordinate è da intendersi con centro O convenzionalmente posto nell'angolo in alto a sinistra dell'immagine, asse delle ascisse verso destra ed asse delle ordinate verso il basso.

infatti obiettivi grandangolari, standard o teleobiettivi[33]. La qualità dei fotogrammi dipende anche dalle impostazioni di messa a fuoco e di esposizione; in particolare, rispetto all'esposizione, oltre ai parametri interni alla macchina è da tenere in considerazione anche la luce (naturale o artificiale) presente nella scena, poiché una sovraesposizione o una sottoesposizione può generare un dato fotografico inutilizzabile ai fini del processo fotogrammetrico. Si prediligono infatti condizioni di illuminazione il più possibile omogenee; in alternativa, in fase di post-produzione, è necessario operare una correzione del dato fotografico.
Vanno infine considerate le distorsioni intrinseche della fotocamera. I software che supportano la fotogrammetria digitale[34] sono infatti stati implementati da algoritmi che consentono di misurare, a partire da fotografie di immagini note all'elaboratore, la misura d'errore generata dallo specifico obiettivo adoperato.
Nell'ottica di ridurre i tempi di acquisizione e rendere meno soggettiva la fase di ripresa, tra i sistemi tecnologici più recenti basati sulla fotogrammetria si sono sviluppate una serie di *multi-camera rover* che attraverso acquisizioni a 360° ed alla tecnologia *SLAM (Simultaneous Localization and Mapping*), ricostruiscono la scena e, simultaneamente, riconoscono la posizione relativa, fornendo dati in *real time* con un elevato grado di dettaglio e resa fotorealistica (PULCRANO, et al., 2019).
Per quanto riguarda il percorso di acquisizione invece, questo dipende sempre dalla morfologia dell'oggetto da acquisire, dalla sua dimensione e dalla distanza di acquisizione.
Durante la fase di ripresa si instaura infatti un preciso rapporto di corrispondenza tra le immagini e l'oggetto reale, rapporto che dipende dalle regole della geometria proiettiva implicitamente contenute nelle immagini fotografiche e che dovrà essere riproposto nella generazione della nuvola di punti, rispetto ai fotogrammi riposizionati in ambiente

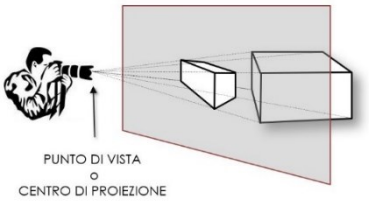


Fig. 11 (pagina precedente) – Punti omologhi e vertici della *mesh* del prospetto nord-est di Palazzo Donn'Anna a Napoli, elaborata in *Reality Capture* a partire da 141 fotografie scattate con macchina fotografica di tipo *bridge*.

Fonte: L. Repola, A. di Luggo, M. Campi, V. Cera, S. Scandurra, M. Pulcrano, N. Scotto di Carlo, F. Pisano, La rappresentazione quale specchio del reale: le nuove tecnologie a servizio della conoscenza per la documentazione di ambienti complessi, in *Riflessioni l'arte del disegno/il disegno dell'arte*, Gangemi Editore.

Fig. 12 – Collinearità tra il centro di proiezione, i pinti del pano dell'immagine e l'oggetto reale.

Elaborazione S. Scandurra.

[33] Sono detti *grandangolari* gli obiettivi con focale compresa tra i 18 e i 35 mm, *standard* gli obiettivi con focale tra i 38 e i 50 mm e *teleobiettivi* quelli con focale superiori ai 90 mm.

[34] Per citarne alcuni, si segnalano i software *Agisoft Photoscan* (ad oggi *Metashape*), *PhotoModeler*, *Reality Capture*.

digitale e secondo i relativi parametri di calibrazione ed orientamento. Si basa quindi sul principio della collinearità secondo cui il centro di proiezione della fotocamera, un punto sull'immagine e il suo corrispondente punto nello spazio, giacciono su una linea retta.
La scena che si intende ricostruire tridimensionalmente deve essere acquisita da almeno due fotogrammi con diversi punti di vista. Ciò, nel generare parallasse, replica ciò che avviene nella visione umana, ossia una vista stereoscopica dell'area in sovrapposizione e, quindi, informazioni sulla terza dimensione. Inoltre, per calcolare le coordinate di un punto identificato in più immagini, si ha l'intersezione di molteplici raggi di collinearità utili a calcolare le coordinate dello specifico punto detto *punto omologo* o *tie point* (BIANCO, et al., 2014).
Ad oggi, la possibilità di servirsi di un consistente numero di immagini per ottenere ricostruzioni notevolmente ricche di dati e, quindi, la risoluzione del sistema di equazioni di collinearità che ne deriva, si fonda sull'utilizzo dell'algoritmo di *bundle adjustment*.
I punti della nuvola ottenuta dai processi fotogrammetrici, presentano una dispersione apparentemente casuale rispetto a quella a griglia tipica dei sistemi *range-based*, perché dipende da numerose variabili, relative al grado di lettura delle immagini, alla loro risoluzione, alle soluzioni di continuità presenti nella scena inquadrata. Anche in questo caso come per i sistemi *range-based*, i punti da acquisire non vengono selezionati preliminarmente dall'operatore, trattandosi, nella fase di campagna, di acquisizioni indistinte.

2.2 Procedure di elaborazione del dato

Rilevare un manufatto architettonico significa intraprendere un percorso di conoscenza che, a partire dalla lettura dei dati acquisiti approfondisce l'analisi di aspetti non immediatamente visibili ma significativi nella comprensione del bene.

Diversi studi (LOPEZ, et al., 2018a; LOGOTHETIS, et al., 2015; VOLK, et al., 2014) analizzano l'efficacia delle procedure che dall'acquisizione sotto forma di nuvola di punti giungono alla reinterpretazione critica del dato.
Si evidenzia (CLINI, 2011; FERRARI, 2014; EMPLER, 2016) come, ad oggi, il problema dell'interpretazione venga ancora affrontato per lo più in analogia a quanto accade nelle procedure di rilievo diretto, ove il rilevatore opera una selezione riconoscendo, in base alle finalità specifiche, le quote di pianta e di sezione utili alla comprensione dello spazio, ricavandone le basi per una rappresentazione in termini bidimensionali e solo successivamente tridimensionali.

2.2.1 L'estrazione di ortofoto ed ortopiani

Molte delle *software-house* che si occupano di disporre ambienti digitali per la gestione delle nuvole di punti (*Faro Scene*, *Pointools*, *PointCab*, *CloudCompare*, *Scene*, etc.) hanno previsto *tools* per l'esportazione di orto-fotografie (Fig. 13) della nuvola come riferimento utile per l'elaborazione di sezioni, prospetti e piante. In queste elaborazioni va tenuto conto che, essendo le orto-foto immagini raster, nonostante l'alto grado di accuratezza del dato di partenza, il ridisegno rischia di essere affetto da un errore derivante dalla variabilità insita nella traduzione da entità *pixel* a entità *punto*. Per ovviare a ciò, altri *tools* ci consentono di estrapolare direttamente una polilinea vettoriale attraverso l'interpolazione dei punti della nuvola intercettati da un piano (*CloudCompare, 3DF Zephyr*, etc.). Questi sistemi automatizzati di estrapolazione dei bordi non riescono però a fare distinzioni tra i punti: ciò significa che l'eventuale *rumore* sarà ritenuto parte del ridisegno, oppure – ipotizzando di lavorare su una vista di pianta – eventuali oggetti accostati alle pareti in fase di acquisizione caratterizzerebbero (erroneamente) il profilo muro. Ciò significa che, nonostante la ricca e complessa struttura del dato acquisito, la restituzione avviene nello spazio digitale attraverso una drastica e a volte acritica riduzione. Inoltre, il grado di automazione è solo parziale, poiché è

Fig. 13 – Ortofoto estratta in Faro Scene a partire dalla nuvola di punti della Basilica di Santa Restituta, presso il Duomo di Napoli

Elaborazione S. Scandurra, M. Pulcrano, nell'ambito della tesi di Laurea *Rilievo come strumento di conoscenza dell'Insula Episcopalis di Napoli: Basilica di S. Restituta,* 2015, relatore: M. Campi, correlatori: A. di Luggo, M. di Mauro, R. Catuogno, A. Cuccaro.

evidente la necessità di intervento di un operatore capace di valutare la bontà del dato.

Nelle ultime versioni, anche *Autodesk AutoCad* consente di importare la nuvola di punti nel proprio *workspace*, di visualizzarla in proiezione ortogonale piana o in 3D, e sezionarla.

Per nuvole di grandi dimensioni, permane una manipolazione articolata del dato nello spazio CAD ma, per nuvole di dimensione ridotta, grazie alla gestione del piano di lavoro tramite UCS, dello *slice* di nuvola da visualizzare e dell'attivazione dello *snap* ai punti, è possibile ridisegnare le piante e le sezioni senza ricorrere ai pixel delle orto-foto, mantenendo parte dei vantaggi riscontrabili nelle estrapolazioni automatizzate dei bordi. In questo caso però è l'operatore a scegliere quali punti *snappare,* ovvero a quali punti ancorarsi, per la costruzione della polilinea, mantenendone l'aderenza e controllando simultaneamente il rilievo nelle sue tre dimensioni.

Per quanto riguarda le elaborazioni tridimensionali (Fig. 14), invece, bisogna considerare che in una nuvola di punti le superfici non vengono restituite: basta ingrandirne sufficientemente una porzione per rendersi conto che, per quanto fitta possa essere, non è

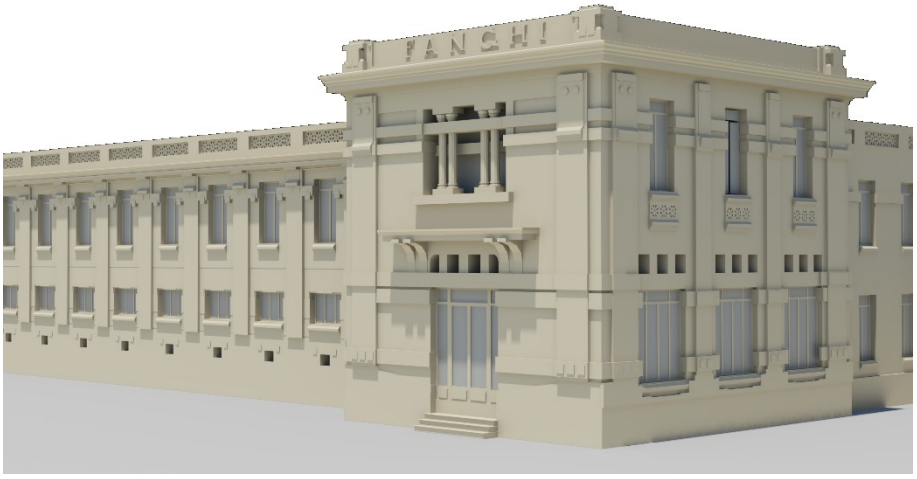


Fig. 14 – Modello 3D costruito in ambiente CAD di una porzione delle Terme di Agnano (Napoli) a partire dalle elaborazioni bidimensionali di pianta e sezione.

Fonte: S. Acquaviva, L. Amoroso, G. Minini, nell'ambito della tesi di Laurea *Complesso Termale di Agnano: Percorso documentario, grafico e conoscitivo per la ricostruzione della memoria*, 2018, relatore: A. di Luggo, correlatori: M. Campi, S. Scandurra, G. Bartolo.

possibile individuare univocamente i bordi, gli spigoli di ciò che è stato acquisito, poiché la maglia di punti è del tutto casuale.

Gli studi su tali processi si concentrano sulle metodologie di trascrizione del dato 3D numerico, in un dato ugualmente tridimensionale matematico o geometrico, manipolabile dall'operatore.

Attualmente la costruzione di modelli 3D avviene, a partire dagli elaborati bidimensionali estratti dalla nuvola, operando manualmente con una o più tecniche di modellazione[35]. Il percorso così descritto passa da una rappresentazione tridimensionale ad un'altra, attraversando una fase di riduzione bidimensionale che, per sua stessa natura, non può garantire una esaustiva documentazione delle specificità di quanto rilevato: il riferimento è ad un numero finito di piante e di sezioni ritenute opportune (Fig. 15). Ciò comporta necessariamente delle semplificazioni e una perdita di informazioni, in quanto il risultato finale potrebbe non restituire eventuali irregolarità presenti nelle porzioni del manufatto non intersecate dai piani prescelti.

[35] Cfr. cap. 1.

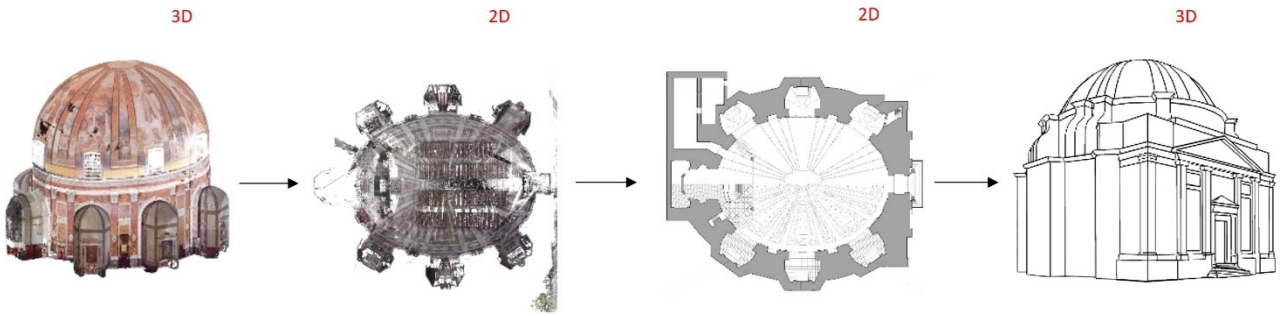


Fig. 15 – Chiesa di San Carlo all'Arena, Napoli.
Processo tradizionale di costruzione di un modello tridimensionale a partire da una nuvola di punti: il percorso passa da una rappresentazione tridimensionale ad un'altra, attraversando una fase di riduzione bidimensionale.

Elaborazione S. Scandurra.

2.2.2 La *mesh* derivante dalla nuvola di punti

La trasformazione del dato puntiforme in *mesh* o *modello poligonale* consente di leggere le superfici del manufatto acquisito, definendone i punti di discontinuità. Anche le *mesh* possono essere viste come forma di discretizzazione delle superfici reali, stavolta sotto forma di maglie di poligoni adiacenti, per lo più dotati di caratteristiche geometriche, (vertici di coordinate x, y, z), topologia (intesa come connessione tra le facce adiacenti) ed attributi (colore, normale alla superficie, …).

Questo processo è previsto da numerosi software di elaborazione *reality-based*, sia di tipo *image-based*, sia di tipo *range-based* (*MeshLab*, *Photoscan*, *Reality Capture*, *ReCap*, *Faro Scene*, etc.). Ottenere una superficie continua a partire dai punti, significa anzitutto definire univocamente i limiti degli spazi acquisiti; inoltre, a definirli, saranno superfici aderenti all'oggetto reale – poiché costruite sulla base dei punti della nuvola –, tanto più affini quanto più numerosa sarà la quantità di maglie triangolari che si sceglie di calcolare, quindi capaci di riprodurne le irregolarità e le deformazioni in tutti i piani.

La *mesh* gioca un ruolo fondamentale anche negli studi di resa grafica poiché, attraverso l'applicazione di filtri e algoritmi può essere *texturizzata* a partire da fotografie, accentuando così, oltre al dato di accuratezza metrica, anche il carattere mimetico dell'elaborazione.

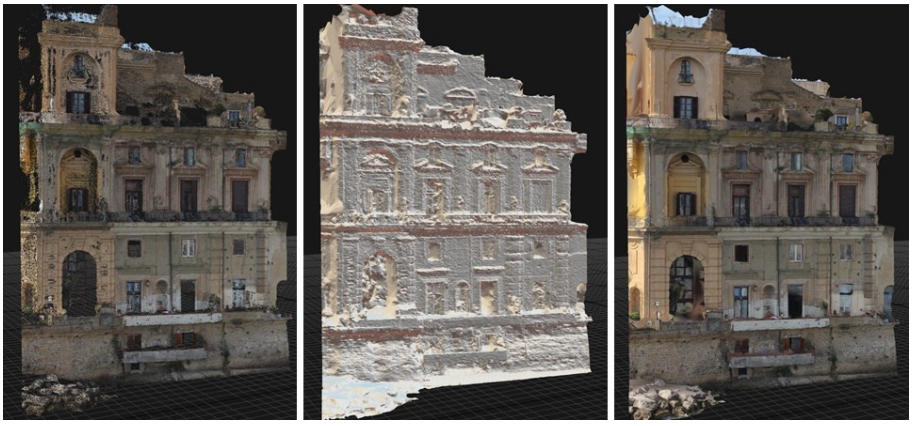


Fig. 16 – Nuvola di punti, mesh e texturizzazione di una porzione del prospetto NordEst di Palazzo Donn'Anna a Napoli, elaborata col software *Reality Capture*.

Fonte: contributo dal titolo *Procedure Integrate per il rilievo e la documentazione digitale di ambienti complessi,* presentato dal gruppo di ricerca M. Campi, A. di Luggo, D. Palomba, F. Pisano, M. Pulcrano, L. Repola, S. Scandurra, N. Scotto di Carlo, nell'ambito del convegno internazionale TDA – *Technologies & Digital Artefacts for cultural heritage*, Napoli 2019.

La nuvola di punti si differenzia dai modelli derivati (CAD, NURBS, …), da una parte per il fondamento scientifico dell'acquisizione, dall'altra perché non prevede alcuna discretizzazione a priori e, soprattutto, nessuna scomposizione, rimanendo infatti un'entità unica, sebbene costituita da milioni di punti ontologicamente indifferenziati.

Seppur la trasformazione in modello poligonale avvicini il prodotto alla continuità materica dell'architettura, permane nel dato una omogeneità assoluta, che ignora categorizzazioni e tassonomie tipiche nelle documentazioni ragionate del costruito: mentre ogni opera architettonica è un sistema costituito da una serie di elementi fortemente relazionati tra loro, la nuvola di punti è una fotografia tridimensionale che pone tutto sullo stesso identico piano informativo.

Inoltre, sia per la *point cloud* che per la *mesh*, si tratta di modelli di per sé privi del concetto di massa, ossia incapaci di riportare dati sulla consistenza reale del manufatto architettonico e sui volumi. Ciò si evidenzia ancor più nell'inversione che viene a presentarsi in riferimento alle nozioni di pieno e di vuoto nell'architettura: ciò che la nuvola riporta è rappresentativo dell'elemento spaziale dell'intero sistema, mentre il vuoto, il dato visivamente mancante, è in effetti il dato utile a rappresentare l'architettura stessa, ovvero tutti quegli elementi aventi funzione di separazione e conformazione degli spazi.

Fig. 17 – Nuvola di punti, mesh e texturizzazione di uno degli altari della Basilica di Santa Restituta, elaborata col software *Photoscan*.

Fonte: S. Scandurra, M. Pulcrano, Acquisire e comunicare attraverso la fotografia, in *Delli Aspetti de Paesi, Vecchi e nuovi Media per l'Immagine del Paesaggio*, vol. II, 2016, Edizioni FedOA.

In definitiva, per lo studio dell'architettura, i modelli costituiti dalle nuvole di punti sono un riferimento fondamentale per quanto riguarda i dati dimensionali ma non possono dar luogo a una rappresentazione esaustiva del manufatto: molte delle informazioni necessarie ad una corretta documentazione vanno oltre la superficie e in gran parte persino oltre la sua consistenza fisica. Ogni architettura infatti è definita da attributi di diversa natura: oltre alla forma e alle dimensioni, essa si connota anche attraverso dati di tipo qualitativo. E ognuno degli elementi costitutivi si caratterizza per la stessa tipologia di attributi che caratterizza l'opera nel suo insieme, oltre che sulla base di precisi rapporti tra le parti e con il tutto. Nonostante il crescente sviluppo delle componenti hardware e software legate alla gestione delle nuvole di punti, è evidente che l'interpretazione del dato rimane compito di un operatore esperto capace di leggere l'architettura nella sua complessità e nella sua articolazione complessiva.
Tali osservazioni portano a diverse considerazioni inerenti le *point cloud*. In primo luogo, ci si interroga su come e secondo quali criteri sia possibile scomporre le nuvole di punti affinché siano riconosciuti con evidenza gli elementi costitutivi dell'architettura e ne sia fornita una restituzione immediatamente leggibile ma ugualmente accurata; in secondo luogo permane la necessità di implementare il dato metrico, ed eventualmente geometrico, con altre informazioni non derivabili dalla nuvola di punti.

CAPITOLO TERZO

La rappresentazione informatizzata tridimensionale dell'architettura
BIM e HBIM

3.1 Dal modello *concettuale* al modello *consapevole*

Le tecniche di modellazione e di acquisizione tridimensionale dell'architettura di cui ai capitoli precedenti, conducono alla formulazione di modelli capaci di concettualizzare il dato reale, riproponendone le forme attraverso astrazioni grafiche.
Intorno agli anni '60, nel 1962, D.C. Engelbart[36] cominciò a lavorare su un'idea apparentemente utopica, proponendo l'ipotesi di modelli di oggetti digitali che fossero in qualche modo autonomi e capaci di agevolare il lavoro di progettazione dell'architetto. Egli teorizzò sulla possibilità di manipolare degli elementi di base con la modifica di parametri, relazionati tra loro in un sistema gestito da un database: nel 1969 quest'idea prese in parte forma attraverso la nascita dei sistemi informativi per il rilievo del territorio, con la fondazione dell'ESRI – *Environmental Systems Research Institute* (I. McHarg e J. Dangermond). La ESRI diede il via a ciò che ad oggi chiamiamo GIS – *Geographical Information System* – ossia allo sviluppo di sistemi di documentazione e analisi territoriale che integrano alla

[36] ENGELBART, D.C., (1962). *AUGMENTING HUMAN INTELLECT: A Conceptual Framework*, Stanford Research Institute, http://www.1962paper.org/web.html.

memorizzazione del dato, la rappresentazione cartografica e analitica, sotto forma di cartogrammi, grafici e tabelle, agevolandone la lettura incrociata.
Gli sviluppi più recenti del GIS vedono la possibilità di documentare tridimensionalmente il territorio, dando luogo a sperimentazioni applicative anche a scala architettonica (BRUSAPORCI & CENTOFANTI, 2008; BRUSAPORCI & CENTOFANTI, 2010), al fine di sfruttarne i vantaggi di relazionalità tra le informazioni.
Nel 1971 a Pittsburgh Charles M. Eastman[37] formalizza il BDS – *Building Description System*[38], divenendo il padre di ciò che nel 2002 J. Laiserin definisce definitivamente con l'acronimo BIM[39].
Il BDS prima ed il BIM poi, rappresentano ciò che più si avvicina alla concretizzazione delle idee di Engelbart sulla possibilità di organizzare il pensiero in liste interconnesse di specifiche e dati, atti ad agevolare, in particolare, il lavoro degli operatori edili. L'intento della sperimentazione del gruppo di studio della Carnegie-Mellon University di Pittsburgh era infatti quello di risolvere alcune problematiche connesse al modo della progettazione, attraverso un sistema informatico capace di generare un modello di edificio dall'aggregazione di elementi di base dotati di attributi inerenti alla geometria, al materiale e ad altre caratteristiche tecniche.
Vi era inoltre l'idea di poter giungere a composizioni automatiche di disegni architettonici di alta qualità attraverso la sistematizzazione di algoritmi specifici. Lo stesso Eastman infatti qualche anno prima propose

---

[37] *"(…) the processes and technologies behind BIM have been evolving for at least 40 years. (…) Early researchers included Chuck Eastman (then at CMU, now at Georgia Tech), Tom Maver at Strathclyde University, Arto Kiviniemi in Finland (now at Salford University), and John Mitchell and Robin Drogemuller (QUT) in Australia. All five are still invested in driving research and industry forward in this area.*" TBH Editor, 24 Novembre 2014, https://thebimhub.com/2014/11/24/history-of-building-information-modelling/#.W8hcymgzZPY.

[38] EASTMAN, 1974.

[39] EASTMAN, et al., 2008.

il *GSP – General Space Planner* – per ottimizzare la distribuzione spaziale di unità abitative attraverso l'uso di algoritmi memorizzati nel computer, mentre J. Souder e W. Clark idearono il sistema *CoPlanner* di *Computer Aided Planning* per il controllo statistico e grafico delle distribuzioni funzionali nella progettazione di ospedali (SDEGNO, 2016).

L'avvio di processi propriamente BIM ha dovuto attendere la definizione di un protocollo univoco di modellazione[40], propendendo per quello di tipo *parametrico object-oriented*.

La modellazione parametrica, di per sé, non è nuova al mondo della modellazione architettonica. Rispetto alle modellazioni B-Rep e CSG[41], le forme di un modello parametrico sono dipendenti da parametri che ne gestiscono le variazioni tipologiche: ciò significa che per la modifica di una delle dimensioni, non bisogna effettuare un ricalcolo dell'intero modello, ma basta variare la costante arbitraria che la caratterizza, assegnandole il valore corrispondente al risultato desiderato. In questo modo ogni singolo elemento è adattabile e può essere reimpiegato rapidamente in infinite composizioni architettoniche.

La vera rivoluzione però consiste nel trasporre il concetto di rappresentazione verso il concetto di simulazione di entità edilizie universalmente riconosciute: il problema non è il segno grafico, ma la sua codificazione univoca affiancata alla capacità di trasmettere intrinsecamente il proprio significato. Ogni oggetto digitale diventa cioè il diretto corrispondente di un oggetto reale e ne conserva la forma e le annotazioni semantiche.

---

[40] *"Da un lato la rappresentazione per contorni (Boundary Representation, B-rep) era il metodo che consentiva di visualizzare le superfici in maniera da realizzare un solido con forma definita. Dall'altro, la Constructive Solid Geometry (CSG) associava a modelli tridimensionali le equazioni relative e i comandi testuali, che non prevedevano la realizzazione di superfici di contorno nella visualizzazione. Mentre la prima campionava i risultati come sommatoria di operazioni, la seconda registrava la formula algebrica della morfologia, con la possibilità di variare in maniera più interattiva gli esiti della modellazione. L'unione di queste due attività permise di dare inizio alla modellazione solida che, acquisendo l'interattività della parametrizzazione, ha permesso di affrontare le tematiche proprie del Building Information Modeling"*. SDEGNO, 2017.

[41] Cfr. cap 1

Ciò è possibile grazie all'associazione di un modello grafico con un *database*, ossia un archivio di informazioni strutturate secondo precise regole e logiche di gestione in record e categorie.
In altre parole, è con il BIM che, attraverso corrispondenze biunivoche tra il dato grafico e il dato alfanumerico, la modellazione della realtà non avviene più attraverso primitive grafiche simboliche (punti, linee, archi, etc.). Piuttosto, il modello acquisisce una serie di dati disomogenei ma correlati secondo logiche che fanno capo alla sintassi propria dell'architettura nella sua consistenza reale (muri, finestre, solai, etc.). Questi modelli infatti risultano caratterizzati da proprietà, regole ed attributi tali da renderli in qualche modo *intelligenti* – *smart-object* –, in parte perché implementabili con numerose informazioni riguardanti l'oggetto fisico, ma soprattutto per le relazioni reciproche che ne sottolineano la diretta rappresentatività.
Per questo motivo è evidente l'interesse crescente verso gli strumenti di *Information Technology (IT)* atti a produrre sistemi di gestione integrata dei dati, grafici e non, che si riferiscono all'ambiente costruito (OSELLO, 2015).
Vanno pertanto riconosciuti due momenti nella digitalizzazione: quello della proto-digitalizzazione (BIANCHINI, et al., 2016) e quello della digitalizzazione vera e propria, le cui ricerche sono ancora in corso e sono suscettibili di cambiamenti ed evoluzioni sempre più rapide, correlandosi ad esse il concetto di virtualizzazione del reale.
Se concettualmente il BIM si fonda sulle prospettive di ricerca avviate da Engelbart degli anni '60 e sulle prime sperimentazioni degli anni '70, l'acronimo, gli strumenti e l'utilizzo diffuso, saranno stabilmente presenti sul mercato solo qualche decennio dopo.
Il nome *Building Information Modeling* viene sponsorizzato dalla *Autodesk*, nota casa software per l'edilizia, nel 2002, contemporaneamente all'acquisto del pacchetto di modellazione parametrica *Revit*. L'*Autodesk* sceglie queste tre parole per definire le proprie nuove soluzioni sul mercato, ovvero per rendere esplicita la differenza tra queste e le

precedenti basate sul CAD. In realtà, diversi autori (Laiserin in EASTMAN, et al., 2008; RIDOLFI, 2018; KUIJPERS, 2018) segnalano che nel panorama scientifico internazionale, le tre parole appaiono in uso combinato già nel 1992, ma utilizzate come parole chiave – e non riprese nel contenuto – di un *paper* di van Nederveen e Tolman della TU Delft nei Paesi Bassi (VAN NEDERVEEN & TOLMAN, 1992). Ciò denota come il concetto alla base fosse già fortemente riconosciuto e che venisse richiesta una specifica nomenclatura capace di identificarlo in modo autonomo rispetto alle pratiche consuete, agevolandone una comprensione condivisa, nonché una rapida diffusione. Le stesse case software, ad esempio la Graphisoft[42], parlano di *edifici virtuali* o, come la Bentley[43], di *modellazione di progetti integrati*.

Nel 2002 J. Laiserin[44], analista commerciale, ritiene necessario affrontare il problema della *proliferation of names and languages that prevent us from distinguishing meaningful differences and similarities among emerging approaches to software about buildings*[45]. In quest'occasione dichiara *Building Information Modeling* come la più adeguata combinazione di termini e, di conseguenza, BIM come acronimo sostitutivo al CAD, a sua volta non più sufficientemente descrittivo dell'ampiezza e della profondità del processo.

---

[42] *Graphisoft* è una casa produttrice di software per architetti dal 1982. Ha prodotto *ArchiCad*, noto software per la progettazione, costruzione e gestione di opere edili, considerato il primo strumento di modellazione parametrica operante per oggetti virtuali rappresentativi del reale. http://www.graphisoft.com/ [2018].
Cfr. IBRAHIM, et al., 2003.

[43] Bentley System è una società di sviluppo software per l'edilizia dal 1984. https://www.bentley.com/it [2018].

[44] Jerry Laiserin, analista commerciale specializzato sulle tendenze del design, della progettazione e delle costruzioni, si è laureato presso la School of Architecture della Princeton University e presso la Stern School of Business della New York University, dedicandosi poi a numerosi seminari ed approfondimenti professionali sulle tecnologie collaborative per il lavoro edile. http://laiserin.com/about/index.php [2018].

[45] LAISERIN, 2002.

Egli inoltre motiva[46] la sua preferenza tra i vari termini proposti in letteratura e dalle software house: spiega che l'atto del costruire (*to Build*) è, nel gergo comune, più affine a tutto ciò che riguarda il design e la costruzione di opere edili, contrariamente al termine *progetto* che può riguardare ambiti anche diversi, come ad esempio quello dello sviluppo di software. Inoltre, combinato al termine informazione (*Information*), rimanda anche a ciò che riguarda il funzionamento e la conoscenza dell'opera, oltre la sua geometria. La modellazione (*Modeling*) infine, consiste nella descrizione matematica di un sistema, fino alla sua simulazione per previsioni future.

Da allora l'interpretazione dell'acronimo si è evoluta, talvolta attribuendo termini e definizioni differenti a qualcuna delle lettere di cui si compone, oppure aggiungendone di nuove.

Ad esempio, la "B" è stata ritenuta caratteristica del più vasto verbo Costruire, ma anche talvolta limitata al sostantivo Edificio; la "M" viene distinta in *Modeling*, *Model* e *Management*, indicando nell'ordine il processo che sottende il lavoro, il modello grafico e la potenzialità gestionale[47].

---

[46] *"(…) I find that I prefer the word "building" over "project" because there are many kinds of projects (such as software development) that have nothing to do buildings. At the same time, the word "building" is loose enough to hint at design, construction and operation. Without delving into the semantics of data versus information versus knowledge, I find that "information" is clearly suggestive of software that deals with more than just geometry. Combined, "building information" implies, to my ear, a strong sense of what the design, construction and operation of buildings is about. It avoids techno-jargon, yet remains evocative of technical goings-on. "Modeling," although a near-jargon word, does connote the mathematical or digital description of objects or systems: we have econometric models and weather models as well as physical models of 3D objects. "Modeling" also implies a process of description or representation that provides the foundation for building performance simulation (essentially, modeling future behavior) and for the management of building information (information models serving as the frameworks in which information is managed).*
So, "building information modeling," as a description of the next generation of design software", LAISERIN, 2002.

[47] Tra i protocolli riconosciuti a livello internazionale, l'NBIMS-US™ V3 (*National BIM Standard-United States Version 3*, terza versione del progetto del *buildingSMART alliance* che mira alla fornitura di una struttura standardizzata e riconosciuta a livello internazionale

Per il costruito storico, si parla in particolare di HBIM. La combinazione *Historic Building Information Model* è utilizzata per la prima volta da M. Murphy in un testo del 2009 (MURPHY, et al., 2009) dove appunto si discute della possibilità di applicare il processo BIM all'analisi, alla documentazione e alla trasformazione del costruito di interesse storico. Nello stesso scritto, Murphy sceglie di riferirsi a procedure di comparazione dei manufatti analizzati con le regole riportate nella trattatistica classica: il rigore espresso nelle costruzioni geometriche e nei rapporti che la trattatistica ritiene fondamentali per l'armonia compositiva, diventano, nel suo studio, codice di lettura, decodifica e trascrizione dell'esistente in un modello digitale geometrico di tipo parametrico. In particolare, in tale ambito il parametro viene inteso quale proprietà dimensionale e geometrica generativa dei componenti dell'architettura oggetto di studio, impostata secondo i paradigmi espressi dai trattatisti nella definizione dei *tipi* e degli *ordini* architettonici.
L'attenzione alla tematica è estremamente attuale e mostra spunti di interesse da molteplici punti di vista. In particolare, la "H" dell'acronimo ha assunto anche il significato di *Heritage*, sottolineando appunto la volontà di riferirsi al patrimonio architettonico.

3.2 La metodologia BIM

Ad oggi, il termine BIM è rappresentativo di un tipo di modellazione dell'architettura ritenuta *avanzata* dal punto di vista informativo. È vero

affinché il processo tra professionisti e l'utilizzo delle tecnologie d'informazione sia il più possibile collaborativo ed uniforme) definisce il BIM come "*a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. A BIM is a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its lifecycle; defined as existing from earliest conception to demolition. A basic premise of BIM is collaboration by different stakeholders at different phases of the life cycle of a facility to insert, extract, update, or modify information in the BIM to support and reflect the roles of that stakeholder*".

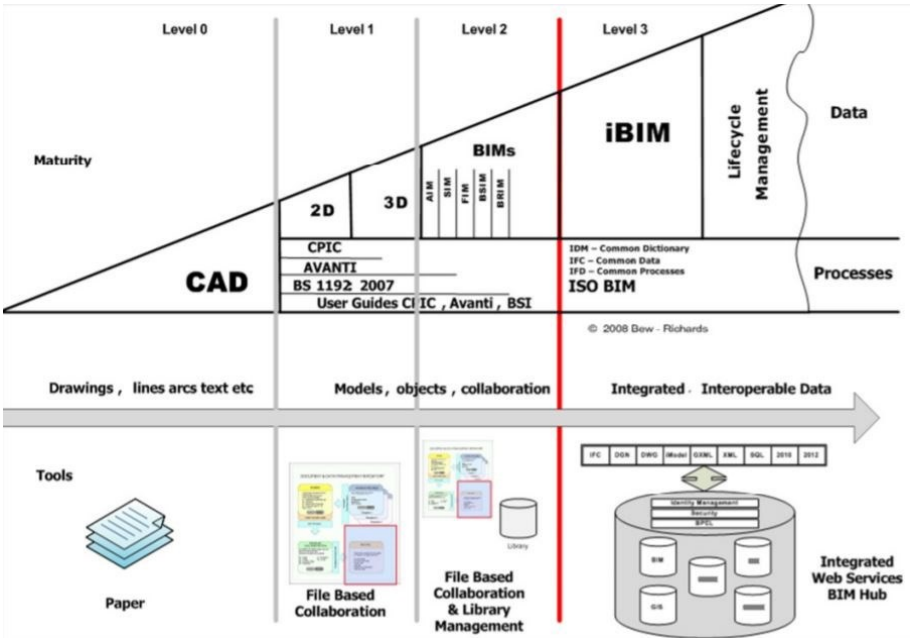


Fig. 18 – Il Regno Unito ha definito i livelli di maturità del processo di progettazione classificandoli tra 0 e 3. Al livello 0 pone i disegni a mano e CAD 2D. Al livello 1 il 3D privo di informazioni condivise, quindi solo per la visualizzazione. Al livello 2 introduce il BIM ed al livello 3 l'Open BIM con il massimo livello di interoperabilità e condivisione.

Fonte: Bew, M., & Richards, M. (2008). BIM Maturity Model, *Construct IT Autumn 2008 Members' Meeting*, Brighton, UK.

infatti che l'approccio è definibile più sottoforma di *modellizzazione*[48], in quanto modellare appare principalmente come un'attività di rappresentazione e riproduzione e si avvicina semmai all'idea del rifare a partire da uno schema, difettando nel carattere di rigore e trasparenza insita nel processo BIM. Quest'ultimo appare più affine al modellare in ambito scientifico, dove si selezionano particolari aspetti della realtà e se ne stabiliscono precise relazioni.

In questi modelli, ciascun oggetto non rappresenta esclusivamente una schematizzazione geometrica del manufatto, ma ha un significato intrinseco e si relaziona all'insieme in cui è inserito.

La modellazione informativa raccoglie infatti dati relativi a uno o più elementi architettonici che costituiscono un sistema più complesso – il manufatto nel suo insieme – e li aggrega, comprendendone i legami e le

[48] CRESTI, Simona, (2016). *Un dubbio "scientifico": modellare o modellizzare?*, Accademia della Crusca.

specificità. Dal punto di vista architettonico, consente di costruire il modello sulla base della semantica che ne rappresenta il fondamento, ossia del significato che possiede ognuno degli elementi di cui si compone. Tali elementi sono muri, finestre, porte, solai, tetti, scale, pilastri, travi, fonemi dell'architettura implementati nell'archivio digitale che li descrive assegnandovi un preciso significato.

È di estrema chiarezza l'esempio riportato da Pavan (PAVAN, et al., 2017) sulla rappresentazione in pianta di un muro: col disegno a mano rappresentiamo due linee parallele, ad una certa distanza tra loro, eventualmente associandovi un'annotazione testuale di tipo descrittivo; col disegno in sistemi CAD, l'operazione è praticamente la stessa, con la differenza che le linee sono lette dal computer che le riconosce esclusivamente come vettori e non già come muro, affermandosi come veicolo di rappresentazione non auto-consapevole. Ugualmente avviene nei software di modellazione solida dove il muro è letto esclusivamente come parallelepipedo. Ciò sta a significare anzitutto che lo studio di scomposizione geometrica che precede la modellazione e l'addizione delle forme prodotte, può del tutto prescindere dal significato reale di ciò che si rappresenta[49]; ma, soprattutto, l'associazione di quel segno con il concetto di *muro* avviene solo per l'interpretazione di chi legge, se dotato dell'adeguata preparazione culturale. La differenza dei sistemi di modellazione BIM consiste proprio nel modellare direttamente con oggetti che sono stati programmati per essere e comportarsi similmente alla realtà, definendo pertanto un sistema inequivocabile. In questo modo la rappresentazione del *muro* in pianta, seppur apparentemente può essere la stessa, non è più soggetta ad interpretazioni ambigue perché è lo stesso strumento informatico che ne elabora la lettura in quanto *muro*.

La rappresentazione tridimensionale che ne consegue, consiste in un modello digitale coerente con le informazioni della costruzione; diviene

[49] Estremizzando, possiamo ad esempio dire che un muro, un solaio, il piano di un tavolo saranno tutti modellati allo stesso modo, ovvero, con un parallelepipedo.

cioè il mezzo visuale che consente di aggiungere dati ed interrogarli, poiché attraverso tale modello le informazioni sono in grado di sincronizzarsi, restando georiferite alle puntuali aree di interesse e categorizzate in base alle proprie specifiche e comportamenti (DI LUGGO, et al., 2019).
In estrema sintesi, il modello BIM è multidimensionale[50] e caratterizzato da (DALLA MORA, et al., 2014):

- oggetti parametrici digitali composti da attributi grafici e informativi;
- possibilità di analisi e interrogazione del dato;
- dati coerenti e non ridondanti;
- database comune o correlato per la rintracciabilità del dato.

Ne consegue che i vantaggi della metodologia sono riscontrabili sia nella fase di progettazione che nella successiva fase di gestione, poiché l'intera storia del manufatto è continuamente documentata e aggiornata, le eventuali modifiche sono automaticamente estese a tutte le aree del modello interessate e le analisi (strutturali, energetiche, illuminotecniche, economiche, etc.) sono sempre possibili.
In tale contesto operativo l'obiettivo massimo è quello di restituire un dato quanto più fedele possibile al reale e per questo si parla di modello *as-built*. Tale modello è generalmente il risultato di più modelli correlati, realizzati secondo diverse specificità (strutturale, impiantistico, design, manutenzione, sicurezza, etc.) e quindi un modello definito di tipo *aggregato* o *federato*. La congruenza tra i diversi modelli è costantemente verificata attraverso più strumenti, tra cui in particolare le funzionalità di *clash detection, model checking* e *code checking*[51].

[50] Il modello BIM è definito multidimensionale poiché all'informazione geometrica (3D) sono associabili molteplici altri livelli di dimensione informativa relativi alla programmazione (tempistica – 4D), alla gestione di computi e valutazioni economiche (costi – 5D), alla manutenzione fino alla dismissione (facility management – 6D) ed alla relativa sostenibilità ambientale sociale ed economica (sostenibilità 7D).

[51] I termini derivano dalla normativa inglese. Operando un paragone con la norma italiana UNI 11337:2017, questa definisce la *Clash Detection* come analisi delle possibili *interferenze*

La *clash detection* verifica le eventuali collisioni tra le diverse entità geometriche e si distingue in *hard clash* che riguarda gli elementi che si sovrappongono occupando fisicamente lo stesso spazio; *soft clash* che mette in evidenza elementi che potrebbero invadere lo spazio necessario al montaggio o alla manutenzione di altri elementi; *4D workflow clash* che segnala elementi solo temporalmente incompatibili. Ognuna delle condizioni corrisponde alla necessità di apportare modifiche al modello, oppure alle fasi di costruzione reale.
Il *model* o *code checking* invece fa riferimento alle inadempienze rispetto a prescrizioni del Capitolato Informativo, norme tecniche specifiche o requisiti prescritti dal committente o da uno degli attori del processo[52].
Tutto ciò concorre a sottolineare l'efficienza di un processo BIM ben strutturato, proiettato verso uno scambio costante del dato tra operatori e software diversi[53], con conseguente riduzione dei tempi di lavorazione e modifica, attraverso controlli costanti del risultato.

3.2.1 Contenuti informativi minimi, geometrici e non, nelle norme sul BIM

In realtà, seppur auspicabile, una modellazione di tipo *as-built* non è sempre possibile e, talvolta, neanche necessaria. Molto dipende dall'obiettivo per il quale si decide di operare in BIM e, di conseguenza,

geometriche tra oggetti, modelli ed elaborati interessati dal processo; Le attività di *Model* e *Code Checking* sono invece le analisi delle possibili *incoerenze* informative di oggetti, modelli ed elaborati rispetto a specifici regolamenti di settore riportati nel Capitolato Informativo.

[52] *Guida al BIM, La rivoluzione digitale dell'edilizia*, seconda edizione, 2018 ACCA software S.p.A..

[53] Nell'ottica dell'interoperabilità e dell'Open BIM, affinché il modello possa essere letto da operatori diversi indipendentemente dal software commerciale scelto per la sua realizzazione, le piattaforme BIM più sviluppate hanno integrato la possibilità di esportare ed importare modelli nel formato aperto di tipo *.ifc – Industry Foundation Classes*, ovvero una sorta di modello dati neutro, non vincolato esclusivamente ad una specifica software house, nato dal consorzio *Industry Alliance for Interoperability* (attuale società *BuildingSMART International*, www.buildingsmart-tech.org).

dalla quantità e qualità di informazioni raccolte e rese disponibili attraverso l'ACDoc e l'ACDat[54].

A tal proposito, le diverse normative esistenti sul BIM hanno avanzato una serie di classificazioni in riferimento ai contenuti informativi minimi che un modello, designato per uno specifico scopo, deve contenere. Tali contenuti sono relativi da un lato ai dati metrici, dall'altro alle informazioni non geometrizzabili. Sono stati introdotti parametri specifici per rendere univoche le finalità e le possibilità di utilizzo dello specifico modello fino alla formulazione del concetto di LOD, inteso come *Level of Detail* o *Development*[55].

Seppur simili nell'acronimo, il livello di dettaglio e il livello di sviluppo non sono da interpretare con pari significato: mentre il primo si riferisce alla minuzia operata in fase di modellazione geometrica e fotorealistica, il secondo esprime il grado di attenzione con cui la geometria e le informazioni ad essa associate sono state pensate e approfondite[56].

La normativa americana[57] è stata tra le prime ad adottare tali concetti nei propri protocolli e a fornirne una definizione puntuale. Tra le

---

[54] ACDat è l'Ambiente di Condivisione Dati previsto dalla UNI 11337 come *ambiente di raccolta organizzata e condivisione dei dati relativi a modelli ed elaborati digitali, riferiti ad una sola opera o ad un singolo complesso di opere*. Il concetto deriva dal CDE – *Common Data Environment* – introdotto dalla BS 1192:2007 e PAS 1192 e sostanzialmente rappresenta il sistema nervoso del BIM, dove tutto è organizzato secondo cartelle strutturate e condivise, le informazioni sono immediatamente disponibili e

[55] L'acronimo LOD è stato utilizzato per la prima volta come Level of Detail dalla Vico Software (attuale Trimble). Nel 2004 la casa software ha introdotto il concetto di MPS – Model Progression Specification, con l'intento di esplicitare il grado di informazione relativo al modello, in termini di geometria, costi e tempi, facilitandone la gestione durante la condivisione. *LOD identifies how much information is known about a model element at a given time* (www.vicosoftware.com). (BOLPAGNI & CIRIBINI, 2016).

[56] NISSIN, Lorenzo, (2015*). La specifica LOD della AIA: un approfondimento,* www.ibimi.it

[57] Si tratta del protocollo E202-2008 aggiornato con la E203-2013 ad opera dell'AIA – American Institute of Architects. Nella loro definizione, il Level of Development è identificativo del grado di attendibilità che possiedono le informazioni associate all'elemento ed alla sua rappresentazione grafica. Il concetto include diversi possibili usi

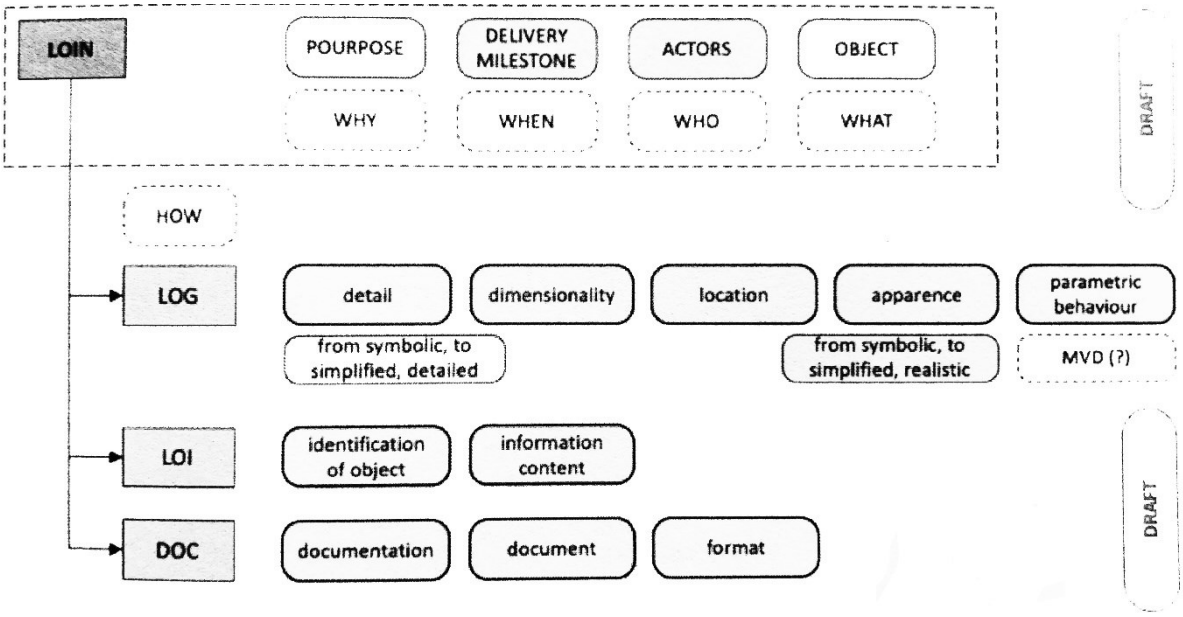


Fig. 19 - Struttura proposta per i LOIN al tavolo di lavoro coordinato dall'Italia nell'ambito del tavolo normativo comunitario CEN/TC 442.

Fonte: PAVAN, et al., 2019.

personalizzazioni operate dagli altri Paesi, è interessante il protocollo rilasciato dall'AEC (UK) nel 2009, poiché incorpora il livello di dettaglio e i *Grade* (G0, G1, G2, G3), una classificazione dedicata più specificatamente agli aspetti geometrici. In un successivo aggiornamento, nel Regno Unito (PAS 1192-2) è stata proposto il *Level of Definition* (sette livelli), suddiviso tra LOD (*Level of Model Detail*) e LOI (*Level of Model Information*)[58], dove i primi stanno ad indicare il contenuto grafico ed i secondi il contenuto informativo (BOLPAGNI, 2016). Successivamente, tale classificazione è stata implementata in numerosi altri Paesi.

del modello oltre la progettazione tra cui, ad esempio, quello di analisi energetica. La scala dei LOD AIA prevede cinque Livelli (100, 200, 300, 400, 500) che vanno da una schematizzazione del tutto concettuale ad una modellazione ed informatizzazione di tipo as-built.

[58] La scala generale per i LOD UK è così articolata: 2-Concept stage; 3-Developed design; 4-Technical design; 5-Construction.
La scala generale per i LOI UK è così articolata: 2-Concept stage; 3-Developed design; 4-Technical design; 5-Construction; 6-Operation and maintenance.
(SATTANINO, 2018)

In Italia, i LOD sono stati introdotti con la norma UNI 11337:2017. Nelle revisioni ad oggi in corso, la norma differenzia i LOG (Livello di sviluppo degli oggetti – attributi geometrici) e i LOI (Livello di sviluppo degli oggetti – attributi informativi) come porzioni informative costituenti i LOIN (*Level of Information Need*). Si prospetta la possibilità (PAVAN, et al., 2019) che i LOIN sostituiscano i sette LOD della UNI 11337:2017, rappresentati con lettere che vanno dalla A alla G[59] e relativi step intermedi (es: LOD C.01, LOD C.02, etc.). La novità introdotta dalla norma italiana nel 2017 consiste in parte nella definizione di un LOD G relativo al costruito esistente (oggetto aggiornato) e nell'indipendenza del concetto di LOD dal concetto di *fase del processo*, più direttamente legata agli *obiettivi* ed agli *usi* del modello.

Si segnala infine che i diversi sistemi di LOD ad oggi esistenti non sono direttamente paragonabili tra loro (SATTANINO, 2018), ma tutte le classificazioni fanno riferimento ai singoli oggetti del modello e non al modello nella sua interezza, poiché è chiaro che un modello può essere composto da oggetti dal diverso grado di approfondimento, sia geometrico che informativo.

3.3 BIM *tools*

Gli strumenti software che circondano il mondo del BIM, sono classificabili secondo una o più qualità che li contraddistinguono (LOPEZ, et al., 2018a). In particolare, se consideriamo il modo in cui sono stati concepiti e il rapporto col modello, possiamo distinguere tre tipologie principali che riguardano: 1) la fase di costruzione e di informatizzazione

[59] Secondo la norma UNI 11337:2017 i LOD sono: LOD A: oggetto simbolico; LOD B: oggetto generico; LOD C: oggetto definito; LOD D: oggetto dettagliato; LOD E: oggetto specifico; LOD F: oggetto eseguito; LOD G: oggetto aggiornato.

(*modellatori*), 2) la fase di esplorazione visiva (*visualizzatori* o condivisori) e 3) la fase di verifica (*analizzatori*).

I *modellatori* sono tutti quei software che consentono di riprodurre nello spazio digitale il manufatto architettonico nel suo insieme e in ognuna delle parti di cui si compone, oltre che associarvi dati non geometrici, di diversa natura e formato.
La costruzione del modello può avvenire col supporto di viste ortogonali tradizionali (piante, prospetti, sezioni), seppur gli elementi che si inseriscono sono direttamente tridimensionali e quindi già consci della propria consistenza anche in viste diverse da quelle attive in fase di inserimento. Nonostante la tendenza sia quella di trasferire l'intero processo in una concezione tridimensionale, permane infatti ancor oggi una preferenza nel controllo bidimensionale del modello: è molto più immediato concepire uno spazio architettonico tracciando profili di pareti e delimitando superfici in una vista di pianta piuttosto che formalizzarne gli aspetti direttamente in 3D (GARAGNANI & CINTI LUCIANI, 2011a).
Facendo riferimento al report annuale dell'NBS (*National Building Specifications*) i *modellatore* BIM più utilizzati nel 2018 sono *Autodesk Revit*, nelle versioni *Architecture*, *Structure* e MEP, seguito poi da *Graphisoft ArchiCAD* (acquisito dalla *Nemetscheck*), *Nemetscheck Vectorworks*, *Nemetscheck Allplan* e le applicazioni *Generative Components* della *Bentley System Inc.*. Nell'ambito italiano invece, sta compiendo enormi progressi il *modellatore Edificius* della *Acca Software* e la piattaforma *usBim Platform*, della stessa casa.
In quanto software BIM, tutte le applicazioni suddette consentono di lavorare con librerie di oggetti parametrici e con dati di input estremamente variegati: disegni in *.dwg* o *.dxf*, documenti *.pdf*, file di immagini, modelli *.skp*, etc. Inoltre, in considerazione del crescente interesse verso la realizzazione di modelli BIM del patrimonio costruito, negli ultimissimi anni quasi tutte le piattaforme BIM hanno implementato l'utilizzo e la manipolazione delle nuvole di punti in diverso formato.

I *visualizzatori* servono invece ad esplorare il modello tridimensionale nella sua spazialità, consentendone la lettura dei parametri e delle informazioni ad esso associate e, talvolta, la messa in evidenza di eventuali problematiche riscontrate nella realtà, o nel modello stesso. Sono quindi strumenti che agevolano la comunicazione, la collaborazione e la verifica. *Autodesk Viewer*, *A360*, *BIM360*, *BIMx*, *Navisworks Freedom*, sono solo alcune delle soluzioni proposte dalle *software house*.

Gli *analizzatori* infine, sono BIM *tools* che consentono di interrogare il modello dal punto di vista analitico e di operare simulazioni nei comportamenti attuali, futuri o ipotetici. In particolare, si tratta di applicazioni pensate per la verifica e per la progettazione di comportamenti di tipo energetico, strutturale, illuminotecnico, o per il controllo di interferenze tra più aspetti riguardanti l'opera (come ad esempio la progettazione impiantistica e la progettazione strutturale) e il grado di corrispondenza con le normative vigenti.

Ad oggi le piattaforme e i software dedicati al BIM sono numerosi, ciascuno con particolarità tali da renderli adeguati a specifiche circostanze, dal *concept* alla progettazione, fino all'analisi ed alla condivisione. Non è quindi possibile individuare univocamente uno strumento ma, piuttosto, è opportuno prediligerne un uso combinato[60].

3.3.1 Modellazione *object-oriented* e parametrica

Produrre un modello BIM significa produrre un modello informativo *n-dimensionale* di tipo aggregato, ovvero composto da uno o più sotto-modelli inerenti allo stesso manufatto, ma ognuno dedicato all'esplicitazione di uno o più aspetti specifici (architettonico, strutturale, impiantistico, sanitario, gestionale, etc.). Ad ognuno dei modelli, fanno riferimento un insieme di oggetti, caratteristici appunto delle diverse componenti del modello stesso. Ogni elemento è collegato al contesto con cui si relaziona

[60] Cfr. nota 53.

e la *modellazione è orientata ad oggetti*[61] oltre che *parametrica*, ovvero consente di produrre elementi autonomi, ma manipolabili attraverso parametri e relazionati per mezzo di database.

In una *modellazione ad oggetti*, il singolo oggetto è definito *istanza*, da intendere come simulazione di una porzione del modo reale, compreso e reso comunicabile attraverso una sua concettualizzazione digitalizzata. Far ciò significa attribuire una precisa *identità* all'istanza, assegnandovi gli *attributi* che la rendono univoca ed esplicitando le *operazioni* che ne replicano il comportamento nel contesto. L'*associatività* è invece garantita dai collegamenti che replicano le *relazioni* con altre istanze del modello. In un certo senso è un modo per rendere chiaro e privo di incomprensione ciò di cui si parla, poiché si tende ad uniformare il linguaggio attraverso l'attribuzione di un significato univoco a ciò che si percepisce e si comprende della realtà.

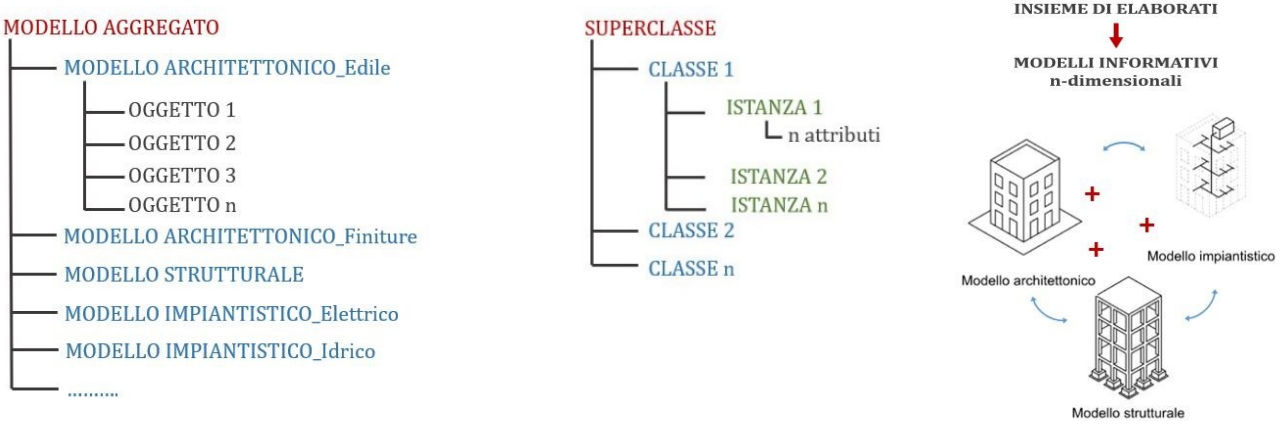
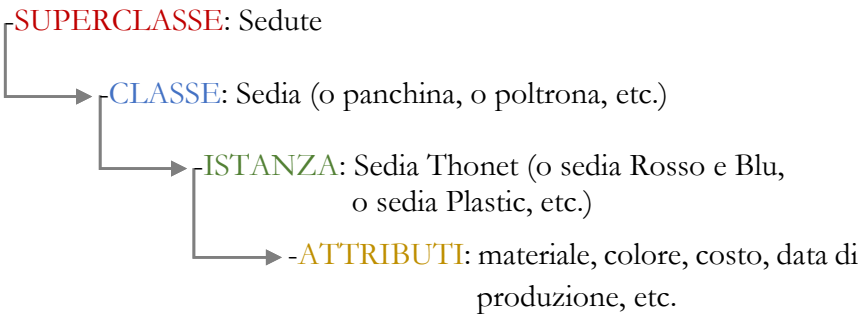


Fig. 20 – Il BIM e la modellazione per oggetti.

Elaborazione S. Scandurra.

[61] *Il linguaggio di modellazione grafica della programmazione ad oggetti prende il nome di UML (Unified Modelling Language)* (PAVAN, et al., 2017).

Secondo questa logica, ogni *istanza* appartiene ad una specifica *classe*, ovvero ad una categoria specifica che ne definisce i limiti tipologici. Ogni *classe* può derivare i propri attributi da altre classi o averne dei propri. Quindi può appartenere ad una *superclasse* che funge da macro-categoria. Il sistema è quindi gerarchico e può essere paragonato ad un albero le cui categorizzazioni vanno dal generale (*superclasse*), al particolare (*istanza*). È quindi ovvio che una *superclasse* può avere un illimitato numero di sottoclassi mentre ogni *classe* può appartenere ad un'unica *superclasse*. In architettura ciò si traduce nella possibilità di connotare ogni elemento in un solo ed unico ruolo semantico (*superclasse*), lasciando poi agli *attributi* quel grado di personalizzazione e caratterizzazione specifica.
Ogni concetto o argomento reale potrebbe essere modellizzato secondo questa logica[62].
La composizione di più istanze può avere carattere *dipendente* o *cumulativo*, ovvero ci sono *istanze* che non possono esistere se non in appartenenza ad



altre (non può esiste una porta senza un muro) ed *istanze* che invece coesistono mantenendo una propria indipendenza (muri, sedie, tubature, etc.). In realtà le regole di relazione e di comportamento reciproco, più che

[62] Auraen e Gjemdal riportano l'esempio dei passeggeri di un aereo: alla *superclasse* delle persone appartengono due sottoclassi dedicate al pilota ed ai passeggeri, i cui singoli saranno le istanze, ed ogni istanza avrà specifici attributi come ad esempio il numero di posto occupato. Hege Auraen, Hanne Gjemdal, 2016. *Object Modelling and Building Information Modeling*, Master Thesis, Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology.

alla singola *istanza*, possono far riferimento alla *classe* di appartenenza o addirittura alla s*uperclasse*, poiché generalmente si tratta di modi di essere comuni tra le istanze che ne derivano.
In un modello BIM quindi, ogni oggetto simula una componente del reale (ideato o rilevato) negli attributi e nelle geometrie.

In *Autodesk Revit*[63] la struttura gerarchica degli elementi segue esattamente questa logica: il modello (singolo o aggregato) è infatti realizzato in *ambiente di progetto* ed è costituito da una serie di oggetti.
Ogni oggetto inserito è definito *istanza* ed ogni *istanza* appartiene ad un *tipo*, a sua volta appartenente ad una *famiglia* e quindi ad una *categoria di famiglia*.
In questo caso, il comportamento e la condizione specifica di ogni *istanza* sono dettati dai *parametri*.

I *parametri* rappresentano la seconda caratteristica distintiva del tipo di modellazione associata al BIM.
Tutte le informazioni relative al modello, sia quelle grafiche che quelle tecniche, sono definite da *parametri*. Geometricamente ciò sta a significare

[63] Il nome *Rev-It* deriva da *Revise Instantly* – revisione istantanea; esprime esattamente il flusso di lavoro possibile nel software, ovvero ogni modifica operata agisce istantaneamente su tutte le componenti, viste e dati che ne sono in qualche modo interessati.

che una variazione dimensionale non consiste in una modifica locale del dato grafico, ma in una variazione del *parametro* che rappresenta quella specifica dimensione e l'aggiornamento del dato avviene contestualmente e automaticamente in tutto il *data sheet*, conservando le relazioni con altre *istanze*. Ugualmente avviene per i dati tecnici. Quindi qualunque valore compilabile all'interno di un *tipo* è un *parametro*.
Chiaramente un *parametro* può avere natura numerica, testuale, grafica, etc. e rappresenta in sintesi il luogo di incasellamento di tutte le informazioni associate al progetto (url, immagini, descrizioni, valuta, visibilità, lunghezza, volume, area, angolo, materiale, densità, etc.).

In *Autodesk Revit* esistono due tipologie di parametri, ossia *parametri di tipo* e *parametri di istanza*. Come suggerisce il nome, la variazione della tipologia di parametro ricade su tutte le istanze appartenenti ad uno specifico *tipo* (*parametri di tipo*) o sulla singola *istanza* selezionata (*parametri di istanza*). La scelta di impostare un parametro secondo l'una o l'altra modalità è per lo più lasciata all'operatore che ne valuta il vantaggio nella gestione del modello, a seconda dei casi[64].
Tutto ciò che è presente in un progetto realizzato con *Autodesk Revit* è appartenente ad una specifica *famiglia*, dagli oggetti che interessano il modello direttamente (muri, solai, tubature, impianti, profili, etc.) a ciò che serve come supporto alla modellazione o alla comunicazione della stessa (annotazioni, etichette, linee di sezione, etc.).
Le *famiglie Revit* sono organizzate in tre tipologie che dipendono dal grado e dalle modalità di personalizzazione delle stesse e che, in via esemplificativa, possono essere associate alle modalità di realizzazione dei relativi tipi in un cantiere: *famiglie di sistema*, *famiglie caricabili* e *famiglie locali*.

[64] Immaginiamo ad esempio di avere un progetto con cinque sedie tutte identiche ma diverse per colore. Piuttosto che duplicare cinque volte il *tipo*, potrebbe essere vantaggioso scegliere di avere un solo *tipo* di cui inseriamo *cinque istanze* e lasciare il colore come *parametro di istanza* così da poterlo variare nel singolo elemento, conservando l'informazione di appartenenza allo stesso identico *tipo*.

Le *famiglie di sistema* rappresentano gli elementi di base di un edificio (muri, solai, tetti, scale) e possono essere paragonate alle porzioni di manufatto che generalmente sono realizzate direttamente in cantiere. Non possono essere create da zero, ma possono essere personalizzate ed inserite direttamente all'interno dell'*ambiente di progetto*, ovvero dello spazio dedicato alla costruzione e alla informatizzazione del modello; spesso fungono da *host* per le *famiglie caricabili*.
Le *famiglie caricabili* o *componenti standard* interessano invece tutti quegli elementi che in genere sono di completamento per un manufatto architettonico, ovvero componenti di costruzione o di sistema assemblati altrove e installati all'interno dell'edificio (finestre, porte, arredi, impianti di areazione, impianti idraulici, etc.). A queste si aggiungono famiglie di dettaglio come i profili che fungono da supporto per altre famiglie o elementi di annotazione (simboli, cartigli, etichette, etc.) che completano la rappresentazione e la comunicazione del progetto. Le *famiglie caricabili* sono realizzate e modificate in un ambiente di lavoro dedicato, esterno all'ambiente di progetto e sono infatti salvabili in formato *.rfa* come file indipendente. Ciò le rende caricabili in qualunque progetto.
Le *famiglie locali* o *oggetti in place* sono invece elementi modellati specificatamente per un singolo progetto e senza ricorrere ai comportamenti e *template* predefiniti per le categorie di *famiglie caricabili*. Sono usate generalmente per modellare elementi unici o *masse concettuali*.
La possibilità di generare *famiglie* personalizzate deriva dalla consapevolezza della consistente variabilità degli elementi presenti in ambito architettonico. I *template* di *famiglia caricabile* esistenti però, rispondono per lo più alle categorie semantiche già riconosciute dal software, nell'ottica di consentire la modellazione di elementi differenti per forma ma non per comportamento e significato. Per tutti gli altri elementi, esistono *template* di categoria generica, privi di comportamento stabilito a priori. Non è possibile però creare da zero nuove *famiglie di sistema*.
Le tecniche di modellazione, nel caso di realizzazione di nuove *famiglie* di elementi tridimensionali, si basano per lo più su procedure di estrusione, unione e rivoluzione. Uniche differenze sono riscontrabili in modelli di *famiglia adattiva*, le cui forme sono generate a partire da punti, linee e

superfici, consentendo una manipolazione della forma estremamente flessibile.
Il comportamento di un'istanza o tra istanze è gestito in parte di *default* dal motore *Revit* attraverso una gerarchia di tipo elemento ospitante (*host*) – elemento ospitato[65]; d'altra parte può essere personalizzato dall'utente attraverso la gestione di *vincoli, priorità* e *parametri*.
Ciò avviene soprattutto nella generazione di *famiglie nidificate*, ovvero *famiglie* composte da più *famiglie* i cui comportamenti sono appunto vincolati. Per comprendere le *famiglie nidificate* è necessario ricordare che in *Autodesk Revit* tutto è una *famiglia*: una famiglia *porta* è generata attraverso la nidificazione di tre elementi: telaio, anta e maniglia; il comportamento tra i tre elementi è vincolato e parametrizzato, per cui al variare della dimensione del vano, il telaio vi si adatta in altezza e larghezza. Contemporaneamente l'anta a sua volta si adatta al telaio e la maniglia si posiziona all'altezza più adeguata alla nuova configurazione, senza deformarsi.

3.4 Specificità HBIM

I Paesi che si sono interessati all'HBIM sono in particolare il Canada, la Gran Bretagna e l'Irlanda, ma anche l'Italia gioca un ruolo fondamentale in considerazione del suo immenso patrimonio architettonico che pone quesiti nuovi, esigenze differenti rispetto alle altre realtà che necessitano di risposte alternative a soluzioni previste in altri contesti.
Le ricerche sull'HBIM sono ancora in corso, tant'è che testi specifici sull'argomento sono in numero limitato, mentre la produzione scientifica è maggiormente rinvenibile in articoli di riviste a carattere scientifico e atti

[65] Si pensi al comportamento finestra-muro: il software non ci consente di inserire una finestra nello spazio di progetto a meno che non sia già stato inserito un muro, poiché la collocazione della finestra potrà avvenire solo su di esso.

di convegno. Si riconoscono in particolare quattro macro-interessi che riguardano[66]:

a. le metodologie e le procedure più adeguate alla definizione delle forme, nell'ottica di superare l'attuale fase di modellazione estremamente onerosa;
b. l'inclusione nei sistemi BIM di elementi non previsti, affinché possano essere gestite problematiche nuove inerenti ad esempio alla documentazione e alla gestione delle collezioni artistiche e la strutturazione di precise ontologie dell'architettura storica;
c. l'organizzazione dei dati per il *facility management*;
d. la gestione dei livelli di incertezza nella conoscenza del costruito storico.

In questa sede ci si sofferma in particolare sui punti a e b:

a. Rispetto alla definizione della forma, quasi tutte le ricerche si concentrano sul passaggio di trascrizione delle nuvole di punti in modelli BIM, e alcune di esse sono rivolte all'individuazione di algoritmi e *plug-in* specifici affinché le fasi di traduzione delle nuvole di punti in modelli tridimensionali possano risultare in parte automatizzate[67]. Le difficoltà riscontrate da tali procedure, risiedono preliminarmente nel fondamento stesso di riconoscibilità automatizzata delle componenti acquisite da una nuvola di punti e

[66] *Results show scarce BIM implementation in existing buildings yet, due to challenges of (1) high modeling/conversion effort from captured building data into semantic BIM objects, (2) updating of information in BIM and (3) handling of uncertain data, objects and relations in BIM occurring in existing buildings*. VOLK, et al., 2014.

[67] Nei progetti di ricerca dell'Unione Europea per il quadro H2020 ci sono esempi dedicati proprio alla costruzione semiautomatica di modelli BIM o HBIM. In particolare, si segnala il progetto INCEPTION (www.inception-project.eu [2018]) che si occupa di strategie per l'accuratezza e l'economicità nei processi di acquisizione del patrimonio e nella relativa produzione di modelli 3D semantici.

nella trasformazione di queste parti in oggetti riconosciuti[68]. Anche laddove questi sistemi risultino efficaci nelle procedure relative alle architetture contemporanee, elementi apparentemente semplici come i muri e i solai delle architetture storiche non si prestano facilmente ad essere riconosciuti dai sistemi digitali, in ragione delle irregolarità tipiche del costruito storico. I risultati infatti si mostrano ancora poco accurati e parzialmente rispondenti al reale. Ciò è evidente se confrontiamo le irregolarità del costruito storico con il rigore richiesto dai processi algoritmici e geometrici. Inoltre, la maggior parte dei processi di traduzione automatizzata[69] non forniscono un oggetto digitale già rispondente alle logiche di parametrizzazione ed ontologia architettonica perseguita da un modello di tipo BIM[70]. L'interpretazione critica del dato acquisito, soprattutto in riferimento agli aspetti qualitativi dello stesso, nonostante i veloci avanzamenti tecnici e tecnologici a servizio delle ICT, è difficilmente replicabile in sistemi di intelligenza artificiale (BIANCHINI, 2014). In ragione di ciò, per il modello HBIM, si prediligono procedure semi-automatiche o manuali, affinché i dati possano essere gestiti e controllati da una mente umana, capace di

[68] op. cit. VOLK, et al., 2014.

[69] Interessanti risultati nella segmentazione della nuvola sono quelli riportati dalle ricerche di HONG et al. (2015) che sfruttano l'algoritmo *Random Sample Consensus* (RANSAC) per riconoscere le superfici della nuvola, per poi ripulirle dal rumore e riconoscerne i contorni, ovvero le discontinuità. Gli oggetti digitali finali però, non sono direttamente BIM.

[70] Si segnalano a tal proposito gli algoritmi perseguiti da Edge-wise, capace di identificare nella nuvola di punti elementi quali muri, solai, travi, pilastri e finestre, basandosi in particolare sulla rispondenza con geometrie riconosciute dalla piattaforma e sulla planarità orizzontale e verticale e sulle interruzioni, e identificandoli già in riferimento alle categorie di elementi riconosciuti dalla piattaforma BIM Autodesk Revit. I repentini cambi di direzione e spessore delle murature storiche e gli innumerevoli elementi di disturbo generalmente presenti nella scena rendono difficoltosa l'applicabilità del sistema al patrimonio storico. http://www.clearedge3d.com/products/edgewise-plant-suite [2018].

constatare di volta in volta le specificità del caso e valutare le scelte più rispondenti ad uno specifico scopo.
Ciò nonostante, va tenuto conto del fatto che le procedure di modellazione e informatizzazione manuale o semi-automatica sono svariate e non esistono, ad oggi, precisi protocolli operativi da seguire. Nell'ottica di replicare i protocolli anglosassoni previsti per la documentazione BIM delle costruzioni ex-novo, è auspicabile infatti l'individuazione di precise categorie di situazioni riscontrabili nell'ambito del patrimonio storico-architettonico, affinché possa essere garantito un grado di uniformità laddove si presentino casi analoghi.
Da un'analisi della bibliografia di settore, si evincono differenti approcci alla modellazione, ma non tutti sono esplicitati al punto da poter essere riprodotti con le medesime proprietà da altri autori, al fine di creare flussi di lavoro più efficienti. Tra i casi maggiormente esplicitati vi sono ricerche che sperimentano la modellazione direttamente in ambiente BIM, servendosi dei soli strumenti resi disponibili dalla piattaforma scelta, altre ricerche che si servono di strumenti di supporto alla modellazione stessa ed altre ancora che si avvalgono di modellazioni totalmente esterne alle piattaforme BIM, da importare successivamente all'interno del progetto complessivo.
Le ricerche del primo tipo prevedono una fase iniziale di progettazione delle viste di sezione e prospetto della nuvola di punti del manufatto, come supporto nella definizione dei profili che meglio descrivono l'oggetto che si intende simulare; dopodiché i profili vengono trasformati in solidi attraverso operazioni previste dagli strumenti di modellazione interni al software (DEL GIUDICE & OSELLO, 2013). Alcune differenze risiedono nelle scelte e nel grado di scomposizione della nuvola di punti che talvolta si ferma al macro-elemento architettonico, mentre altre volte giunge ad un livello di informazione più minuzioso (BRUMANA, et al., 2013).

Le ricerche del secondo tipo nascono nell'ottica di implementare gli strumenti BIM in modo da superare le lacune riscontrate. Per lo più si sceglie di usufruire di modellazioni algoritmiche o di modellazioni NURBS esterne, in combinazione con le categorizzazioni e con le procedure di modellazione consentite dalla piattaforma BIM prescelta, collegate con specifici *plug-in* affinché tali elementi possano mantenere o assorbire le caratteristiche parametriche ritenute opportune.
Nel terzo tipo infine, la modellazione non è prevista in ambiente BIM, ma realizzata all'esterno secondo metodologie di modellazione ritenute meno vincolanti. La piattaforma BIM è utilizzata per la messa a sistema di una serie di informazioni sul modello importato che, però, non è in alcun modo parametrico, né intelligente.
In tutti i casi la modellazione di architetture del passato resta un'operazione complessa, ma indispensabile, affinché i manufatti siano documentati secondo criteri e logiche rispondenti alle più attuali possibilità e necessità di documentazione.

b. La complessità maggiore deriva dalla mancanza di librerie H-BIM, per cui è di attuale interesse l'individuazione dei processi più veloci ed esaustivi affinché ognuno degli elementi caratteristici delle architetture del passato possa essere facilmente riprodotto nonostante le singolarità del caso.
Per modellare le singole componenti del costruito è indubbia la necessità di ricorrere ad approcci di tipo storico-analitico, indispensabili alla comprensione di ciò che va oltre le superfici e cioè degli aspetti compositivi, materici, tecnologici, artistici, etc. I risultati delle strumentazioni di rilievo *reality-based* infatti, per quanto sofisticate, sono limitate alla sola superficie osservabile e misurabile e solo attraverso altre indagini si possono reperire i dati sulle modalità costruttive, sui materiali e sulle cause delle eventuali anomalie riscontrate in superficie. Uno *smart-object* deve fornire altre risposte oltre alle sue determinazioni metriche o alla sua apparenza visiva,

poiché fondamento del BIM è anche la possibilità di condividere informazioni multidisciplinari e pertanto ogni oggetto deve avere la possibilità di essere integrato e ulteriormente analizzato.
Autodesk Revit è tra i software BIM che tengono maggiormente conto della semantica di ognuno degli *smart-object* del modello, ma le categorie preimpostate non riescono a rispondere a tutte le esigenze di documentazione; ad esempio, i sistemi voltati, tipicamente presenti nelle architetture storiche, non sono considerati in nessuna categoria di *famiglia* predefinita, tanto meno nei solai. Ciò obbliga, ogni volta, ad una procedura di modellazione dedicata, che parte da zero. Da ciò nasce l'esigenza di strutturare librerie apposite e secondo precise regole, affinché possano essere riconosciute e replicate; ogni nuovo elemento, inoltre, dovrebbe tenere considerazione dei parametri più utili a dare ampia risposta a progetti dalle caratteristiche simili, oltre che supportare l'interconnessione con le altre fonti di dati.

3.5 Implicazioni teoriche dell'HBIM nella rappresentazione del patrimonio architettonico

Le discipline del rilievo e della rappresentazione hanno codificato negli anni una serie di protocolli, di linee guida di supporto alle operazioni di analisi e di documentazione di un manufatto architettonico. *Mediatore di valenze espressive e di intenzionalità conoscitive, il Disegno (…) è interprete e spesso protagonista in molte attività di analisi, di investigazione e di progetto sul patrimonio dei beni architettonici (…) in quanto linguaggio di comunicazione riconosciuto per descrivere, figurare, esporre tesi, comprovare ipotesi* (NOVELLO & LO TURCO, 2016).
L'evoluzione dei mezzi informatici e l'introduzione dell'HBIM hanno potenzialmente determinato la possibilità di fruire di dati multidimensionali accanto a quelli geometrico-analitici e storico-analitici. Diventa pertanto importante ragionare sulla modalità di organizzazione

dei dati e sulle relazioni reciproche, rendendone indispensabile la disposizione secondo sistemi logici riconducibili alle singole parti di cui si compone l'opera architettonica.
Ciò è ancor più vero laddove ci si accinga ad indagare un manufatto esistente, poiché il dato non è sempre completo (basti pensare alla impossibilità di predisporre indagini invasive) ed è spesso difficile da interpretare ed esplicitare. Per cui se l'obiettivo dell'HBIM è un modello tendente alla simulazione, il lavoro principale consiste nel trovare il modo più coerente per rappresentare nello spazio digitale ciò che è presente nel reale, attraverso una lettura a ritroso dello sviluppo nel tempo.
Se è infatti evidente che l'arricchimento semantico di un modello dell'esistente storico comporta uno sforzo rilevante, è anche vero che l'elaborazione degli aspetti geometrici inerenti ciascuno degli elementi costituenti il manufatto affinché questi siano riconosciuti in piattaforme che lavorano con la semantica dell'architettura è ugualmente non immediata. Potremmo definirlo, nell'insieme, un complesso processo di *reverse reading* - per usare un termine anglosassone che richiama alla mente le procedure di *reverse engineering* della produzione meccanica.
Ponendo attenzione al processo di modellazione geometrica, nonostante la fase dell'acquisizione dello stato di fatto – soprattutto dal punto di vista geometrico-morfologico – , faccia oramai uso di strumentazioni e tecnologie capaci di generare un vero e proprio clone della realtà in ambiente digitale, permane un *gap* tra i dati acquisiti e la creazione di modelli tridimensionali HBIM metricamente e geometricamente fedeli, ovvero non esiste *ancora un sistema automatico o semi-automatico in grado di svelare le ragioni (compositive, storiche, tecnologiche, culturali, etc.) per cui un certo elemento è stato realizzato in quel determinato modo e posto in quella determinata posizione. Ben si comprende, pertanto, perché il Disegno sia divenuto (e sia ancora) lo strumento d'elezione per il progettista nell'analisi della struttura di un edificio: solo con esso è infatti possibile scomporre l'organismo edilizio, interpretarne i caratteri e le varie funzioni e infine ricomporlo in ragione del ruolo e qualità di ciascun elemento* (BIANCHINI, et al., 2016).

Nel BIM il modello tridimensionale diviene infatti il mezzo con cui raccontare, attraverso elementi rappresentati secondo precise logiche, ciò che è la realtà costruita[71].
Il problema è che, mentre le tecniche di modellazione che lavorano per primitive grafiche garantiscono, nella libertà compositiva del segno grafico, di riprodurre le irregolarità e l'unicità del costruito storico, la modellazione *object-oriented* alla base dei processi BIM, proprio per le regole matematiche sottese, non è manipolabile al di fuori di precise regole preimpostate[72], nonostante le proprietà variazionali e associative che la contraddistinguono[73].
In realtà la questione è solo apparentemente di natura tecnica, poiché resta compito dell'architetto esplicitare i limiti di una rappresentazione (intesa

---

71 "*Se è vero che l'atto del rappresentare implicitamente rimanda alla costruzione di ciò che viene rappresentato, ciò appare ancora più vero laddove i sistemi BIM sostituiscono ad un sistema di linee indistinte, elementi ontologicamente definiti, non solo nelle loro dimensioni e funzioni, ma anche nelle reciproche relazioni, nei materiali e nelle specificità intrinseche*." DI LUGGO & SCANDURRA, 2016.

72 Alcuni autori guardano al BIM come possibile causa di una definitiva morte del disegno e del ruolo dell'Architetto (SCHEER, 2014; SACCHI, 2015), ma se la teoria riconduce la rappresentazione all'operazione di costruzione di un modello mentale, ciò risulta ancora più valido nell'applicazione dei sistemi BIM, *ove la chiarezza del modello è esito di una precisione analitica ed intellettuale che garantisce la costruzione di un paradigma logico disponibile ad ogni sezione illustrativa* (DI LUGGO, et al., 2016).

73 *"(…) infatti ci si può imbattere in situazioni dove la complessità dei legami variazionali / associativi è tale che l'operatore non riesce ad impostare cambiamenti nel modello come desiderato. In altri termini, questo è il retro della medaglia per le potenzialità fornite da un approccio parametrico applicato a modelli molto articolati come quelli che rappresentano in dettaglio un edificio. (…) Perfino la diffusa capacità dei programmi a disposizione dei progettisti di descrivere forme e strutture meno convenzionali desta qualche perplessità in un'ottica d'ingegnerizzazione B.I.M., dacché la variabilità geometrica è quella prevista dall'intelligenza degli oggetti a catalogo. In alcune situazioni si può intervenire sulla descrizione dell'oggetto per estenderne la copertura geometrica ma, data la complessità della struttura di questi componenti, l'utente non sempre ha completa libertà sulla loro ridefinizione tipologica".* GARAGNANI, et al., 2011b.

anche come modello), in termini di sviluppo[74] della stessa, avendone ben chiari gli obiettivi. La rappresentazione di un manufatto storico deve infatti confrontarsi con caratteristiche diverse, forme irregolari e difficilmente rispondenti a soluzioni standard individuabili a priori, dati spesso lacunosi e frammentari, formati (relazioni tecniche, fotografie, documenti legali, letture tematiche, ecc.) misti e disconnessi. I dati necessari per rappresentare manufatti storici sono dunque di natura molto diversa da quelli previsti per i progetti ex novo, sia dal punto di vista informativo, sia dal punto di vista geometrico. *La specificità, l'eterogeneità e la molteplicità delle informazioni richiede la creazione di database adeguati, in grado di registrare, gestire, analizzare e correlare informazioni più complesse di quelle tradizionalmente offerte dal BIM sul mercato* (BRUSAPORCI, 2017a).

In altre parole, bisogna porre attenzione al contempo alla *forma* ed al *significato* che rende ognuna delle parti univocamente riconoscibile secondo il lessico proprio dell'architettura.
Una possibile strada per le indagini sulla *forma*, nel caso di architetture costruite, può derivare dalle riflessioni sulle incongruenze tra le costruzioni geometriche e la consistenza reale. Le architetture del passato sono generalmente concepite in riferimento ad una serie di norme compositive riscontrabili nei trattati di architettura classica, dove la *regola* guida le scelte formali di base, attraverso l'uso di precisi rapporti geometrici. I manufatti risultano frutto della combinazione di elementi che si ripetono e si relazionano tra loro attraverso specifici ritmi e proporzioni. Ciò nonostante va considerata la libertà di espressione e le irregolarità riconducibili a difetti di esecuzione. In altre parole, la comprensione e la restituzione geometrica di tali forme, per quanto non possa prescindere dall'analisi degli archetipi a partire da cui sono state pensate, deve in

[74] Da non confondere con i LOD previsti da normativa perché non intesi in senso burocratico ma dal punto di vista della conoscenza, interpretazione e utilizzabilità del dato.

qualche misura relazionarsi alle evidenze riscontrate dal rilievo del reale. Ciò comporta una riflessione sulle modalità di approccio alla forma poiché *reducing the architectural elements of the building to typified objects leads to setting aside the peculiarities of the historical object, in favour of a less time-consuming workflow. On the contrary, a greater correspondence of the model to the surveyed building leads to a reduction in the benefits of parametric modelling* (BRUSAPORCI, et al., 2018).
Diversi studi (BIAGINI & DONATO, 2017; BORTOT, et al., 2017) trovano una possibile soluzione nella documentazione della misura degli scostamenti tra il modello restituito nel rispetto dei canoni geometrici e la nuvola di punti. Chevrier[75] invece, ha lavorato sulla modellazione NURBS delle forme in aderenza alla nuvola, sfruttando software di terze parti ma la successiva esportazione in ambiente BIM è risultata del tutto anonima e assolutamente non gestibile tramite parametri.
Il *significato* di un'architettura può essere indagato in considerazione dei molteplici punti di vista che possono interessare l'opera: ogni elemento sarà tale perché vengono riconosciute determinate caratteristiche, una specifica conformazione, una propria funzione, un particolare comportamento. Appositi studi hanno come obiettivo quello di catalogare gli elementi per renderli inequivocabili: ne è un esempio *l'Art & Architecture Thesaurus (AAT)* del *Getty Research Institute*[76], un vocabolario strutturato (ID numerico univoco) di dominio controllato e riconosciuto a livello internazionale che include termini e descrizioni, con rispettive relazioni gerarchiche e associative, per concetti generici relativi all'arte e all'architettura. Anche l'*ICOM CIDOC CRM Conceptual Reference Model*[77] lavora per la creazione di un modello generale di dati per facilitare lo scambio di informazioni attraverso la strutturazione di concetti e relazioni che interessano il patrimonio culturale. Infine, seppur in misura differente,

[75] CHEVRIER, et al., 2010.

[76] http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/ [2018].

[77] http://www.cidoc-crm.org/ [2018].

anche l'*Istituto Centrale per la Catalogazione e Documentazione (ICCD)*[78] in Italia offre una serie di vocaboli di controllo, tra cui quelli relativi ai beni architettonici e paesaggistici e ai beni storici e artistici, affinché vi sia una terminologia (generale e specifica) condivisa dalla letteratura scientifica di settore e riconosciuta nelle attività di catalogazione e consultazione[79].

La comprensione della forma e del significato del costruito e delle parti che lo compongono sono il fondamento di ogni operazione di rilievo, inteso come interpretazione critica e operazione complessa, che indaga l'opera nelle sue specificità, analizzando le relazioni che compongono il tutto, riorganizzandone i dati secondo precise ontologie.
Il problema centrale è pertanto quello di ricondurre la complessità ad un sistema, non più di segni, ma di elementi ontologicamente conclusi, la cui definizione è funzione degli obiettivi conoscitivi. La modellazione per oggetti si basa infatti su un diverso modo di affrontare il progetto di architettura e lo studio dell'esistente, predisponendo modelli multidimensionali condivisibili con altre professionalità, anche sulla base dell'interoperabilità tra software (DI LUGGO & SCANDURRA, 2016).
Ci si interroga dunque su quando e quanto sia necessario tendere ad un modello di tipo *as-built* nel caso di architetture del patrimonio storico. La riproduzione mimetica del reale tende a produrre infatti un clone digitale che non sempre implica conoscenza. Piuttosto, nelle indagini al patrimonio storico risulta indispensabile operare un processo critico di semplificazione e scomposizione che consenta di leggere l'architettura e le sue parti come un sistema logico, distinto secondo *layer* informativi che consentano di riconoscere immediatamente il significato di ognuna delle sue parti. In tal senso il modello HBIM può essere progettato anche

[78] http://www.iccd.beniculturali.it/it/strumenti-terminologici [2018].

[79] Le ricerche guidate da Livio de Luca al CNRS superano persino il concetto di forma, relazionando tra loro le molteplici informazioni che possono interessare un manufatto architettonico, sulla base dell'identificazione semantica di ognuna delle parti che lo compongono.

sottoforma di modello semplificato, inteso però come mezzo intelligente attraverso il quale mettere a sistema dati georiferiti e strutturati, prodotti e resi disponibili secondo diverse modalità di rappresentazione.

3.5.1 *Condizioni di Fruizione* del modello

Strettamente legata alla definizione delle forme è lo scopo del modello: non è detto che una sola ipotesi finale di rappresentazione grafica possa rispondere alle infinite possibili esigenze per le quali si sta configurando il documento HBIM. In questo senso vanno distinte anzitutto le esigenze di tipo visivo – ovvero legate alla rappresentazione, alla scala della stessa e al dettaglio del contenuto informativo grafico – dalle esigenze di tipo funzionale – ovvero legate all'utilità stessa del modello (comprensione geometrica, analisi strutturale, documentazione metrica, supporto gestionale, esplorazione storica, etc.).

Dal punto di vista normativo tali esigenze sono in parte considerate attraverso il sistema dei LOD che, come evidenziato al paragrafo 3.2.1, definiscono la rappresentazione dell'oggetto digitale sia graficamente, che in riferimento all'uso per il quale il modello è pensato e, di conseguenza, in riferimento agli obiettivi della specifica *fase del processo*[80].

Un modello tridimensionale dell'architettura può però essere distinto anche in base alla risoluzione – ovvero alla complessità poliedrica dell'oggetto digitale, tale da renderlo più o meno vicino alle forme reali e in base alla metodologia/tecnica di rappresentazione scelta affinché possa adeguatamente veicolare specifiche informazioni. In quest'ultimo caso, la scelta univoca o combinata dipenderà esclusivamente da ciò che potremmo definire *Condizioni di Fruizione* ovvero le capacità del modello di rispondere a domande specifiche: misurabilità, riconoscibilità, mappatura materica, concettualizzazione spaziale, analisi, calcolo, visualizzazione, contestualizzazione, etc.

[80] La *fase del processo*, nella norma italiana, è distinta in categorie quali *sostenibilità, funzionale, autorizzativa, tecnologica, esecutiva, etc.*

Per comprendere tale concetto è necessario ripercorrere le tecniche di modellazione analizzate fino ad ora, sottolineandone le qualità specifiche.

Una prima forma di rappresentazione che si è scelto di considerare è quella ottenuta attraverso le attuali strumentazioni di rilievo *reality based*, ovvero le *nuvole di punti*.
Le *nuvole di punti* riproducono esattamente ciò che la lente dello strumento intercetta, con un grado di risoluzione ed accuratezza gestibile in fase di programmazione dell'acquisizione stessa. Come già detto, i punti della nuvola corrispondono ai numerosi punti battuti dallo strumento *range based*, o all'insieme di punti notevoli – e successivo infittimento – riconosciuti dal processamento *image-based*.
Dal punto di vista della registrazione e della trasmissione del dato metrico, rappresentano indubbiamente il prodotto migliore a cui si possa giungere, per cui, qualora questo rappresenti lo scopo finale di un modello, non ci sarebbe necessità di produrre alcun ulteriore *modello derivato*[81]: deformazioni, forme complesse, misurazioni a distanze non direttamente raggiungibili, sono infatti riprodotte esattamente in coerenza col reale. D'altro canto, come anticipato al capitolo 2, la nuvola di punti non fornisce nessuna informazione di tipo *volumetrico* e, soprattutto, è costituita da un insieme di punti che hanno in comune tra loro solo il sistema di coordinate: sono entità non relazionate e del tutto ignare di ciò che rappresentano, indifferenti alla continuità materica che invece è caratteristica dell'architettura. La volontà di ricercare informazioni differenti da quelle metriche comporta dunque necessariamente il ricorso ad un modello di altro tipo.
Un modello poligonale di tipo *mesh* è una prima possibile variazione del modello puntiforme, seppur direttamente ricavato da esso. Conserva dunque in gran parte l'accuratezza metrica del dato acquisito, seppur la

[81] In questa sede, col termine modello derivato si intendono quei modelli in un certo senso ricostruiti da capo a partire da specifici dati tra cui, eventualmente, vi può essere la nuvola di punti.

risoluzione dipende dal grado di infittimento e dall'algoritmo scelto in fase di produzione. Rispetto alla nuvola, la grana discreta dei punti diventa invece continua e, in un certo senso, più assimilabile alla realtà. Vi è infatti l'aggiunta del dato di superficie e, se opportunamente processata, di parte del dato volumetrico. Infine, se sulla *mesh* si proiettano immagini fotografiche, il modello poligonale può raggiungere un alto livello di fotorealismo, estremamente oneroso da ottenere, con pari risultati, attraverso un *modello derivato*.
Manca in questo caso la consistenza dell'architettura in termini di *massa*; una volta sezionato infatti, ciò che nella realtà è il pieno, ovvero la materia di cui il manufatto si compone, in questa tipologia di modello, come nella nuvola di punti, risulta del tutto assente, vuoto. Tant'è vero che, come precedentemente accennato, i prodotti delle acquisizioni *reality based* riguardano le sole superfici osservate dalla lente dello strumento.

Considerando invece i *modelli derivati*, tra i più diffusi vi sono i modelli CAD.
I modelli CAD sono costituiti da un insieme di solidi di base che, opportunamente manipolati secondo operazioni di tipo booleano, consentono di riprodurre le forme dell'oggetto reale.
Il fatto che gli elementi reali siano riprodotti attraverso elementi digitali letti come solidi, significa associare al modello l'informazione inerente la massa, oltre a quella della superficie. Di contro, la scomposizione preventiva delle forme reali in forme geometriche, comporta necessariamente una serie di semplificazioni e normalizzazioni delle superfici, ovvero una perdita di parte del dato relativo alle irregolarità.
La componente geometrica della modellazione CAD è, in una certa misura, definibile come parametrica poiché le dimensioni di base degli elementi possono essere gestiti secondo le relative costanti. Le lunghezze, le aree e i volumi di ognuno degli elementi di cui sono costituiti sono inoltre automaticamente interrogabili, mentre altre informazioni come, ad esempio, il materiale o il colore possono essere manualmente aggiunte.
La gestione dell'informazione però è limitata sia nell'implementazione che nell'esplicitazione. Ciò è dovuto da una parte alla natura stessa del modello,

perché costituito da entità grafico-geometriche di base (linee, punti, coni, sfere) che simulano l'architettura inconsapevolmente, e d'altra parte agli strumenti di strutturazione del disegno offerti dal sistema stesso. In tal senso è l'utente a scegliere e caratterizzare parte degli elementi secondo una o più attributi comuni, soggettivamente scelti, definendone l'aggregazione in gruppi o l'appartenenza ad uno specifico *layer*.

Gli strumenti di modellazione BIM si servono di una modellazione di tipo parametrico a 360°, ove ognuno degli attributi di cui è affetto il modello è un parametro, sia esso dimensionale, descrittivo, materico o testuale.
In particolare, ogni oggetto del manufatto architettonico digitale è caratterizzato da proprietà associative – che ne definiscono la geometria, la pertinenza e le relazioni col contesto – e da possibilità di variazione – per cui da una configurazione iniziale, se ne possono derivare infinite nel rispetto delle regole stabilite per la specifica tipologia di elemento - (GARAGNANI, et al., 2011b).
Inoltre, l'informazione è espressa da un modello parametrico orientato ad oggetti ed è quindi implementata dall'identità di ognuna delle parti di cui si compone: non più linee e parallelepipedi, ma muri, solai, finestre, etc. A differenza delle altre tipologie di *modelli derivati*, ciò comporta l'utilizzo di *smart-object*.
Nell'ottica dei possibili usi del modello (restauro, collaudo, gestione, etc.) questa tipologia di strutturazione del dato consente l'implementazione dello stesso con una serie di documenti – grafici e non grafici – relazionati tra loro.
I vantaggi di questa tecnica di modellazione si scontrano però con le specificità, semantiche e formali, del costruito storico, poiché è nata, come già detto nei paragrafi precedenti, per la documentazione di architetture contemporanee.

Pur limitandoci alle sole tecniche di rappresentazione *point cloud*, *mesh*, *CAD* e *BIM*, dalle osservazioni operate è possibile affermare che ogni tipologia di rappresentazione dell'architettura consente di esprimere in maniera più o meno esaustiva e immediata specifici aspetti del manufatto

reale. In considerazione della multidimensionalità del patrimonio costruito è quindi indispensabile che si adoperino più tipi di rappresentazione, selezionati in base all'interesse specifico e alla tipologia di informazione che veicolano. Ognuna infatti può riuscire a garantire il massimo dell'informazione per una o più specifiche *Condizione di Fruizione* ma, se considerata in forma individuale, non può garantire un'informazione omnicomprensiva.

Tra i vantaggi maggiormente auspicati dalle piattaforme BIM vi è proprio la possibilità di importare, in un unico ambiente di lavoro, dati diversificati. Ciò non deve però intendersi – erroneamente – nella necessità di riprodurre obbligatoriamente, nel modello derivato, la specifica informazione importata; piuttosto risulta opportuno trovare il modo di sottolineare la caratteristica peculiare di ognuno dei dati importati ed impostare i legami necessari affinché tale informazione sia appropriatamente collegata a tutto il resto e, quindi, consultabile. A tal proposito le ricerche di settore discutono sulla possibilità di introdurre un nuovo tipo di livello informativo e grafico, svincolato dalla necessità di ri-modellare. Si parla, ad esempio, di un LOD 0 del BIM dedicato alle porzioni di modello definite esclusivamente da porzioni di nuvole di punti (BOLOGNESI & CAFFI, 2019).

CAPITOLO QUARTO

Il caso studio: l'Archivio di Stato di Napoli

I temi trattati nei capitoli precedenti hanno trovato applicazione nella sperimentazione su uno specifico caso studio, il Grande Archivio di Napoli.

L'edificio è stato selezionato per l'intrinseco interesse del manufatto in sé e per la significativa presenza di elementi propri dell'architettura storica, con particolare riferimento ad un ampio campionario di superfici voltate presenti nelle grandi corti che conformano il complesso e nelle sale interne, nell'ottica di condurre una efficace sperimentazione sulla traduzione di rilievi strumentali in modelli HBIM.

Considerando la natura frammentaria e scarsamente organizzata della ricca documentazione rinvenuta nella prima fase di studio del complesso, si è ritenuto necessario provvedere ad una sistematizzazione dei dati e alla strutturazione di un archivio digitale per la conservazione e la fruibilità delle informazioni anche nell'ottica della tutela del bene. La produzione di un modello HBIM, in tal senso, seppur implicitamente caratterizzata da fasi di analisi iniziali estremamente onerose, ha consentito di raccogliere e organizzare informazioni molteplici, con la possibilità di relazionarle ad un modello digitale esplicito.

Nello specifico, la ricerca ha inteso indagare le problematiche relative all'utilizzo di sistemi BIM per la documentazione del patrimonio storico,

Fig. 21 – Complesso dell'Archivio di Stato nel contesto urbano.

Immagine elaborata da S. Scandurra sulla base delle foto satellitari di Google Earth.

focalizzandosi in particolare sugli aspetti geometrici e morfologici nelle procedure di modellazione tridimensionale di alcuni elementi che lo caratterizzano.
La sperimentazione condotta è articolata in quattro fasi principali: ricerca storiografica, rilievo dei dati morfo-metrici e colorimetrici, lettura e scomposizione del dato, modellazione HBIM.

Il rilievo strumentale dei dati metrici è stato condotto secondo prassi operative finalizzate ad ottenere un primo modello tridimensionale del manufatto architettonico. In particolare, per questa fase, si è prevista l'acquisizione e la registrazione delle informazioni metriche e colorimetriche con l'ausilio di strumentazioni *reality-based*, il processamento dei dati, l'integrazione tra le varie campagne di rilievo e, infine, la pulizia ed il filtraggio dei dati di interesse.

L'analisi critica del dato acquisito è stata operata in relazione al corpus documentale raccolto attraverso ricerche bibliografiche e archivistiche. Il modello è stato riconosciuto nelle sue parti e nelle relazioni tra i suoi elementi costitutivi, anche attraverso una lettura della storia e delle vicende che hanno reso il manufatto così come lo osserviamo oggi. In questa fase è stato necessario elaborare una prima segmentazione del dato acquisito, in accordo con le specificità del caso studio. Considerando la molteplicità

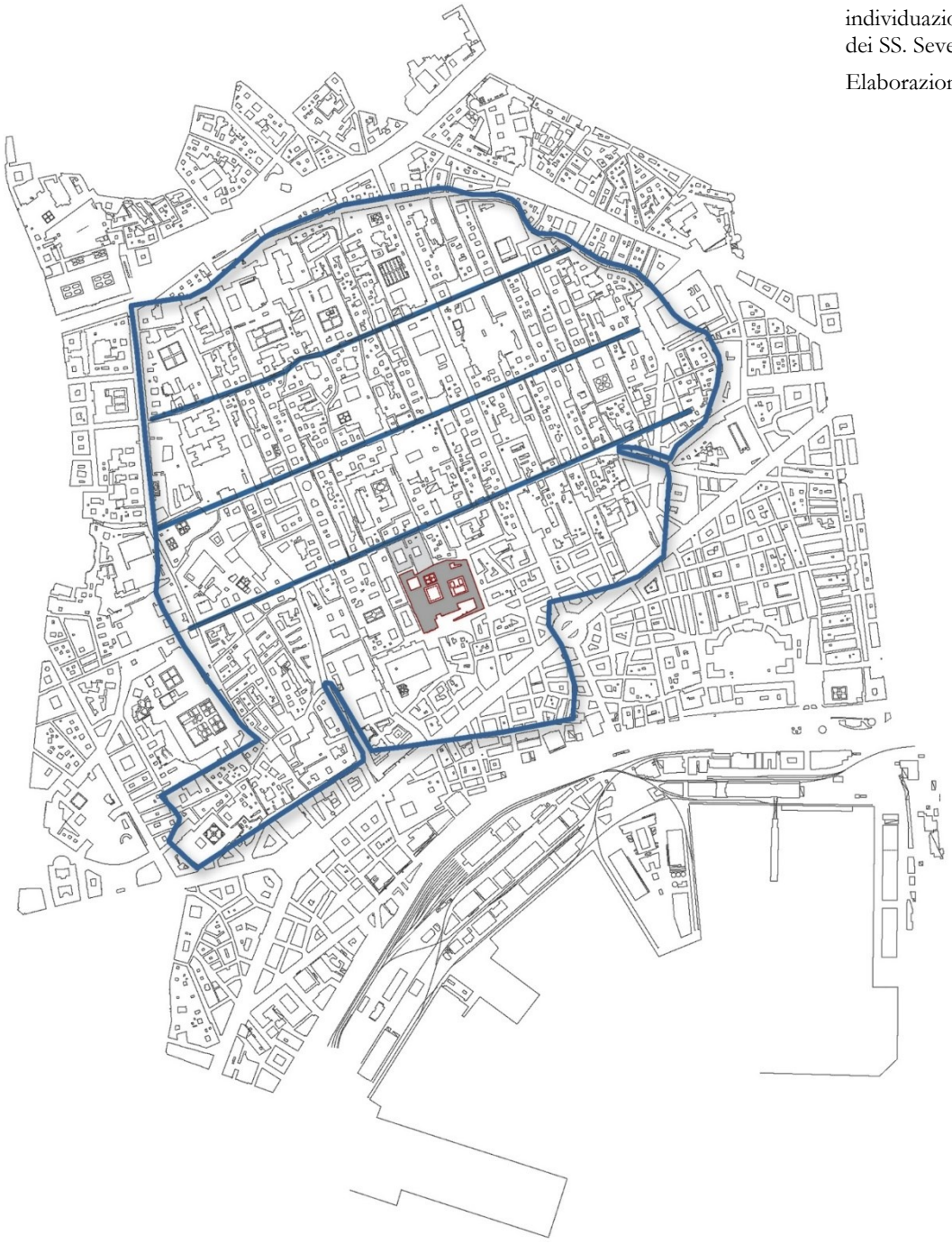


Fig. 22 – Antica cinta muraria della città di Napoli e individuazione del complesso dei SS. Severino e Sossio.

Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 23 – Individuazione delle vie che costeggiano il complesso.

Elaborazione S. Scandurra.

dei possibili criteri classificatori (per aree funzionali, per tipi, a griglia, etc.), è stata valutata preliminarmente la modellazione HBIM, stabilendo conseguentemente una regola disgregativa capace di tenere conto della forma nella sua più coerente segmentazione fenomenologica.

La fase di modellazione HBIM si è focalizzata sull'individuazione di regole di traduzione della conoscenza in un modello digitale, rispondendo ai vincoli del sistema e tenendo conto, al tempo stesso, della rispondenza del dato e della sua semplificazione, sia per quanto riguarda la rappresentazione della conformazione geometrica, sia per ciò che concerne la sua coerenza costruttiva.

4.1 Il complesso del Grande Archivio di Napoli

Il Grande Archivio Napoletano è ospitato da oltre centocinquant'anni[82] nell'antico monastero Benedettino dedicato ai Santi Severino e Sossio.
L'intero complesso è situato nel centro storico della città di Napoli (Fig. 22), nel quartiere Pendino, e occupa un'insula a sud del decumano inferiore[83] di impianto greco-romano[84], seguendo l'orografia della collina del Monterone (Fig. 23).
L'impianto è scandito dalla presenza di quattro grandi *Atrii* - o chiostri, dalla Basilica Superiore dedicata ai SS. Severino e Sossio, dalla Basilica Inferiore e da alcuni spazi aperti, in particolare due giardini – di cui uno afferente alla Basilica – e un piccolo cortile con ambienti di servizio annessi a nord[85].
Il complesso è accresciuto su sé stesso in tempi differenti, per esigenze funzionali, strutturali e formali. Gli stessi chiostri sono caratterizzati da quinte murarie stilisticamente differenziate, rendendo evidente una particolare *aggregazione di costruzioni diverse per forma e solidità*[86].

[82] Dopo la soppressione degli ordini religiosi, nel 1835 una risoluzione reale decise di destinare il monumento a sede dell'Istituto archivistico (ROSANOVA, 1999).

[83] Attuale Via San Biagio dei Librai.

[84] Il complesso è delimitato ad Est dall'omonima via del Grande Archivio (ex vico Pensieri) su cui troviamo l'attuale ingresso principale, a Sud dalla via Bartolomeo Capasso, ad Ovest dal vico San Severino (ex vicus Missi, poi vico Monachorum) dove troviamo l'antico ingresso, ed a Nord-Est dal vico Figurari.

[85] La maggior parte del complesso è occupato dal Grande Archivio e dagli ambienti di servizio e studio dello stesso. Le aree legate alla funzione religiosa sono invece di proprietà del FEC – Fondo Edifici di Culto, un organo del Ministero degli Interni che gestisce il patrimonio immobiliare religioso non più nella disponibilità giuridica della Chiesa.

[86] ROSANOVA, 1999.

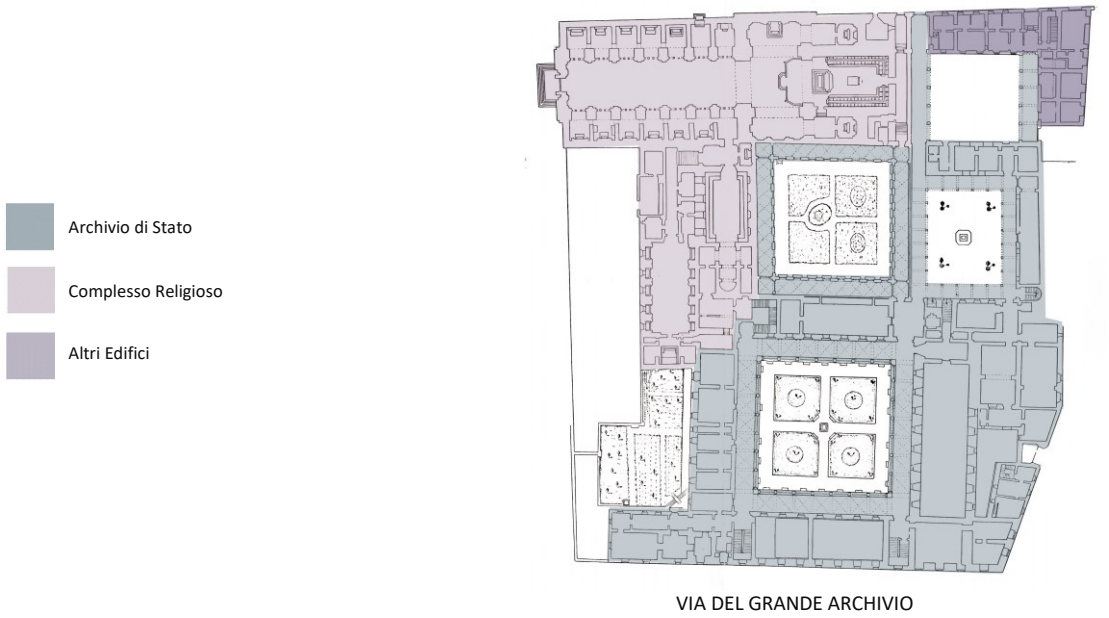


Fig. 24 – Individuazione dell'area destinata alla funzione di Archivio.

Elaborazione di S. Scandurra su grafico di pianta presente in MAZZOLENI, 1964.

A partire dall'antico ingresso in Vico San Severino, i chiostri che si incontrano sono (in ordine) l'*Atrio Primo*, l'*Atrio Secondo* o *Atrio Capasso*, l'*Atrio del Platano* e l'*Atrio di Marmo* (Fig. 25).

L'*Atrio Primo* (Fig. 26) è costeggiato ai lati Nord e Ovest da un edificio di proprietà privata, a Sud dalla Basilica dei Santi Severino e Sossio e ad Est da un primo corpo dell'Archivio. Solo i fronti Nord e Sud sono caratterizzati da quattro arcate a tutto sesto al piano terra. In particolare, le arcate sud sono in continuità con l'androne dell'antico ingresso al complesso e costeggiano il passaggio voltato che porta fino al disimpegno di collegamento tra il primo atrio ed il secondo.

L'attuale *Atrio Secondo* (Fig. 27) o *Atrio Capasso* (1901), originariamente chiamato *Atrio del Noviziato* poiché vi affacciavano le camere dei novizi, è stato realizzato nella metà del '400 ed è stato notevolmente trasformato nei lavori seicenteschi ed ottocenteschi. Il quadrilatero è scandito al piano terra da archi a tutto sesto su colonne quadrangolari in piperno, mentre il

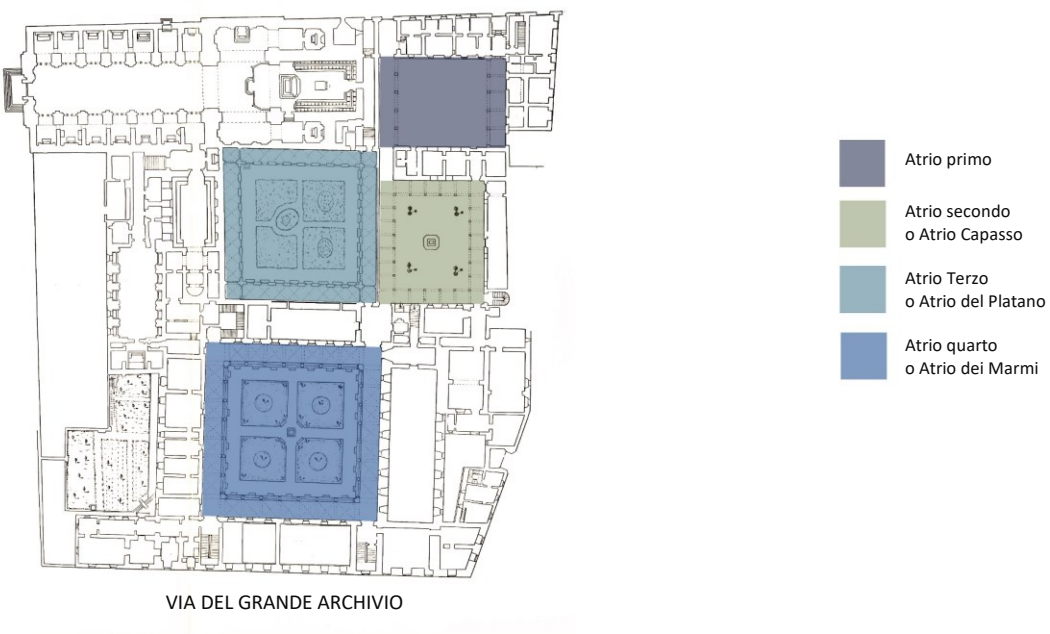


Fig. 25 – Distribuzione planimetrica degli Atri.

Elaborazione di S. Scandurra su grafico di pianta presente in MAZZOLENI, 1964.

piano superiore, originariamente a loggia, oggi alterna finestre circolari e finestre quadrangolari. Ulteriori due piani arretrati sono stati realizzati a partire dal 1803, anno in cui sono stati effettuati ingenti lavori di ampliamento e recupero. Mentre gli archi e l'ex loggiato superiore conservano coperture a volta a crociera, gli ambienti interni alternano volte a botte ribassata, volte a vela e volte a crociera ed al piano terra, attualmente, ospitano laboratori.

L'*Atrio terzo* è l'*Atrio del Platano*, detto così perché fu realizzato nel '400 su un terreno coltivato con platani, di cui se ne conserva un esemplare. Dei quattro bracci coperti da volte a crociera, impostate a muro su peducci a forma di mezzo capitello ionico, due ospitano l'importante ciclo di affreschi (Fig. 28) realizzato tra il XIV e il XV secolo ad opera del pittore

Fig. 26 – Atrio Primo del complesso dei SS. Severino e Sossio e dettaglio del cancello che dall'Atrio Primo porta all'Atrio Secondo.

Foto S. Scandurra.

di scuola veneta Antonio di Giovanni di Pietro da Solario detto *Lo Zingaro*, che illustrano la vita di San Benedetto[87] raccontata dal II libro dei *Dialoghi*

[87] Da destra verso sinistra:1) Benedetto a cavallo s'incammina verso Roma accompagnato e scortato; 2) Benedetto fugge da Roma con la nutrice, giunge in Efide accolto da uomini della chiesa di S. Pietro; 3) Benedetto inginocchiato opera il prodigio della ricongiunzione di un capistero (crivello), con folla a destra che leva in alto il capistero sulla porta maggiore della chiesa; 4) A Subiaco è rivestito dell'abito della conversione dal solitario Romano; 5) Il giovane romito, seduto in un angolo dello speco, legge e riceve per mezzo di una fune il vitto, mentre lo spirito maligno turba la pace del luogo rompendo il campanello attaccato alla fune; 6) Benedetto è seduto a mensa il giorno di Pasqua con il prete inviatogli dal Signore perché non muoia di fame; 7) Benedetto è tentato da un uccello nero; 8) Nel cenobio, in mezzo ai monaci, benedice la coppa di vino avvelenato che si rompe miracolosamente nelle mani del monaco che gliela offriva; 9) Accoglie nel monastero Mauro e Placido, due fanciulli patrizi romani (fra le molte persone dipinte, una con un pennello in mano che gli studiosi avrebbero identificato nel Solario stesso coi collaboratori; 10) Benedetto libera un monaco dalla tentazione; sovrasta l'immagine una lunetta con la Vergine e il Bambino tra S. Severino e Sossio; 11) Richiesto dai confratelli dei monasteri collocati sulla cima del monte, fa scaturire l'acqua da un'arida rupe; 12) Riunisce al manico il ferro di un falcastro che un goto ha fatto cadere nel lago; 13) Mauro cammina sull'acqua per salvare Placido caduto nel lago; 14) Benedetto, nel cenacolo coi confratelli, comanda al corvo di raccogliere un pane avvelenato, inviatogli da un certo Fiorenzo e di gettarlo nella foresta; 15) Benedetto giunto a Cassino predica ai pastori e si avvia verso il monte, ove fa costruire un monastero e istituisce l'ordine dei monaci d'occidente; 16) Scaccia via il demonio che impedisce il trasporto di un grosso macigno per la costruzione del cenobio; 17) Rimprovera un monaco che, trasgredendo il voto di digiuno, ha mangiato durante il viaggio; 18) Fa risuscitare un fanciullo morto sotto un muro cadutogli addosso per opera del demonio; 19) Riconosce sotto simulate spoglie Rigo, scudiere di Totila, che gli era stato inviato per provare se egli avesse il dono della profezia; 20) Incontro tra Totila e S. Benedetto che lo solleva e gli predice nuove conquiste e il tempo della morte.

Fig. 27 –Atrio Capasso (o Atrio Secondo) del complesso dei SS. Severino e Sossio.

Foto S. Scandurra.

di San Gregorio Magno[88]. In origine l'Atrio era caratterizzato da un sottile peristilio aperto, reggente un corpo superiore anch'esso a loggia con archi aperti, come tipicamente accade nei chiostri toscani e lombardi[89].
Nel 1715 il corpo dell'Atrio fu sopraelevato e nel corso dell'800 le arcate dei primi due livelli furono tompagnate per rinforzo, aprendo delle

I critici d'arte attribuiscono allo Zingaro i primi tre affreschi, alla sua scuola i primi nove, ad influenze fiamminghe i successivi cinque ed al XVI secolo gli ultimi due. v. MAZZOLENI, 1964.

[88] Gregorio Magno fu Papa Gregorio I dal 509 al 604. Fu un sostenitore e promotore della regola Benedettina poiché fu colpito dall'incontro con San Benedetto nei primi anni di diffusione del già menzionato ordine. I suoi *Dialoghi* sono un resoconto biografico della vita di numerose personalità ecclesiali italiane, tra cui emerge il racconto di San Benedetto.

[89] Tra il 1450 e il 1463 ci fu infatti un alternarsi di maestranze toscane e lombare, come riportato nel libro dei *Cunti* del Monastero conservato presso l'Archivio di Stato di Napoli. v. *Il Grande Archivio di Napoli Monumento/Documento.*

Fig. 28 – Affreschi di Antonio di Giovanni di Pietro da Solario detto *Lo Zingaro* nei corridoi dell'Atrio del Platano.

Foto S. Scandurra.

finestrature; le colonnine furono inglobate nei particolari pilastri in piperno a forma di candelabro ancor oggi presenti[90].

L'*Atrio quarto* è l'*Atrio dei Marmi* (Fig. 29; Fig. 30; Fig. 31), collegato al Secondo e al Terzo attraverso un vestibolo detto *Atrio delle Statue*[91]. Realizzato tra il 1598 ed il 1623 (ROSANOVA, 1999) come ricorda

[90] MAZZOLENI, 1964

[91] *Tutto il quadrilatero risentì dell'attività degli architetti, degli scultori e dei pittori che tra la fine del sec. XVI e tutto il sec. XVII impostarono i nuovi corpi (…) L'espressione più bella dell'edificio in questo periodo ci è data sempre dal vestibolo che, partendo dai tre primi atri porta a destra alla Sala Capitolare* [attuale Sala del Catasto] *e a sinistra, sorpassando il cinquecentesco portale (…) immette nella meravigliosa Sala del Refettorio* [Sala Filangieri]. *Nei due ampi saloni costeggianti a destra e a sinistra il quadrilatero del chiostro marmoreo* [Sala Catasto e Sala Filangieri] *le vaste volte a botte ribassate con unghie ripetono lo stile rinascimentale riprodotto in tutto l'edificio* (MAZZOLENI, 1964).

Fig. 29 – Atrio dei Marmi, dettaglio.
Foto S. Scandurra.

l'iscrizione *Peristilium hoc anno MDXCVIII extructum*[92], presenta una sintassi architettonica tipica del periodo rinascimentale, dalla forte caratterizzazione geometrica. È infatti considerato un importante e raro esempio di tardo Rinascimento a Napoli.
I bracci del chiostro sono coperti da volte a crociera le cui arcate laterali si impostano, nella parte di fondo, su peducci modanati in marmo e, dall'altro lato, su colonne in marmo bianco di Carrara (sette per lato). Diversa la campata d'angolo, coperta da una volta a catino molto ribassato su pennacchi definiti in alto da sottili modanature in stucco e poggiata su un grande piedritto ad L sui cui lati si addossano due semicolonne. L'ingrossamento del pilastro angolare è tipicamente rinascimentale e permette di aumentare l'appoggio nel punto in cui viene scaricato il maggiore peso strutturale.

[92] *Peristilium hoc anno MDXCVIII extructum*. Questo è stato realizzato nel 1618.

Fig. 30 – Atrio dei Marmi, dettaglio.
Foto dell'autrice.

Fig. 31 – Atrio dei Marmi.
Foto S. Scandurra.

Le colonne presentano un capitello dorico con l'aggiunta di un collarino e fiori scolpiti e una base modanata poggiata su un dado anch'esso modanato e in marmo. I dadi poggiano su un gradino rivestito di marmo. In realtà, in prossimità degli angoli ad ovest, la caduta delle lastre in marmo evidenzia la presenza di un'originale base in piperno, probabilmente rivestita in marmo in un momento successivo (Fig. 32).
Tra un dado e l'altro vi era originariamente una balaustra in marmo, sostituita nel 1857 da una ringhiera in ferro e poi eliminata del tutto ad inizio '900[93].
La parte scoperta è resa a giardino e occupa uno spazio quadrato di circa 31,00m x 31,00m.
Al di sopra delle arcate, i fronti dell'Atrio si innalzano ad est ed ovest per un solo livello e sono caratterizzati da finestre ad arco con cornice e sopracornice scolpite a triglifi e fiori. Anche il fronte Nord si innalza per un solo livello, ma presenta finestre quadrangolari con cornice e sopracornice in modanature semplici. Il fronte sud invece si innalza per due livelli, di cui il primo è caratterizzato da finestre quadrangolari simili al fronte nord, mentre il secondo ha finestre quadrangolari con cornice

[93] *Il Grande Archivio di Napoli Monumento/Documento.*

semplice e davanzale, ma prive di sopracornice. Gli ulteriori livelli del complesso prospicienti *l'Atrio dei Marmi* sono invece arretrati.
Tutti i fronti terminano con cornicioni modanati, mentre un'alta cornice marcapiano definisce il limite superiore delle arcate.
L'ultimo grande restauro che ha interessato l'intero complesso risale all'opera terminata nella seconda metà del '900 dall'architetto napoletano Sergio Rosanova, in accordo con la Soprintendenza per i Beni Architettonici ed Ambientali[94].
Tutte le vicissitudini hanno comportato una complessa stratificazione di stili, tant'è che nell'attuale configurazione è leggibile la compresenza di valori storico-architettonici derivanti da diverse epoche e che rendono il complesso un manufatto di indiscutibile interesse.

Fig. 32 – Dettaglio del gradino che costeggia il giardino dell'Atrio dei Marmi: individuazione dell'originale gradino in piperno ricoperto dalle lastre marmoree.

Foto S. Scandurra.

4.1.1 Trasformazioni nel tempo

Le fonti storiche inerenti al Grande Archivio Napoletano e i riferimenti archivistici a cui rimandano (GALANTE 2004; CELANO, 1858; MAZZOLENI, 1964; ROSANOVA, 1999), testimoniano al IX secolo la fondazione del primo nucleo del complesso dedicato ai Santi Severino e Sossio, nell'area di confine della collina del Monterone, presso l'allora vico del Messo; si trattava in particolare di una piccola chiesa, costruita dove alcune fonti indicano abbia vissuto S. Severino Vescovo di Napoli intorno al 300 d.C.[95].
Le prime tracce della conformazione del sito sono evidenti nella Tabula topografica di Napoli dell'XI secolo (Fig. 33; Fig. 34) che, sebbene non consenta di derivare informazioni di dettaglio, riporta i nomi delle strade

[94] Il manufatto è rientrato tra gli interventi del *Grande Progetto Centro Storico di Napoli, valorizzazione del sito Unesco*, nell'ambito del POR – Programma operativo Regionale – FESR Campania 2007-2013, Asse 6 (Sviluppo urbano e qualità della vita) avente come obiettivo la riqualificazione del centro storico di Napoli. Ad oggi però (2018), alla sede archivistica i lavori UNESCO sono ancora in fase di avvio.

[95] Il Vescovo Attanasio II (876 - 898) fece raccogliere un collegio di 15 monaci sotto la regola di S. Benedetto (Galante, 2004, p. 150) e, rispettivamente nel 902 e nel 920, vi accolsero le reliquie di San Severino dal Castrum Lucullanum e di S. Sossio portato da Miseno.

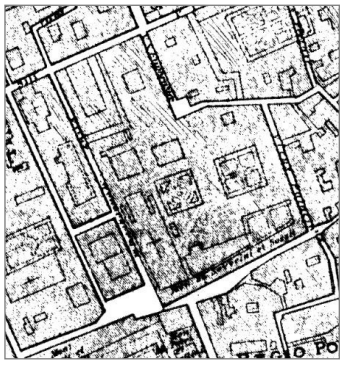


Fig. 33 – Tabula topografica di Napoli del XI secolo, ad opera di Bartolomeo Capasso.

Fig. 34 – Dettaglio della Tabula Topografica di Napoli del XI secolo.

limitrofe, tra le quali si legge il vico Monachorum, ex vico del Messo ed attuale vico S. Severino.
Il primo impianto dell'originario monastero aveva probabilmente orientamento nord-sud (PESSOLANO, 1978), tra quelli che oggi sono il Chiostro del Platano e la Chiesa inferiore, con accesso dal prolungamento del vico Figurari, successivamente inglobato nelle costruzioni. Di quest'epoca, rimane ad oggi la traccia delle arcate gotiche a quota del giardino, tamponate nella costruzione della Chiesa inferiore.

Tra l'XI ed il XII secolo, a seguito dei contrasti venutisi a determinare tra i sovrani di Capua e di Napoli, l'intera area fu abbandonata e saccheggiata. Solo al ritorno della comunità di religiosi, furono avviati lavori di ricostruzione e ampliamento[96] per dar nuova vita alla Chiesa e al monastero. L'epoca aragonese fu tra le più importante per il complesso, poiché i regnanti ne favorirono la crescita.

Nel XV secolo (MAZZOLENI, 1964) i monaci avevano ormai operato l'allargamento verso oriente per i nuovi dormitori e quello verso occidente, sul vico S. Severino per ospitare la nuova Chiesa[97]. Di questo periodo è anche la costruzione degli Atrii del Noviziato (atrio Secondo) e del Platano. Le vicende politiche susseguitesi negli anni determinarono il lungo protrarsi dei lavori, così come è accaduto in particolare per la Chiesa Nuova la cui costruzione iniziata con Alfonso II d'Aragona nel 1494, terminò solo nel 1570.
Attraverso l'analisi e il confronto con la cartografia storica della città di Napoli è stato possibile derivare alcuni ampliamenti, come ad esempio

[96] *Nel governo di Sergio III* – arcivescovo Sergio III 1179-1190) – *fu restaurato il monastero dei ss. Severino e Sossio, in quella parte che le soldatesche del principe di Capua Pandolfo v'avevano messo in fiamme, quando asediarono e presero Napoli al MXXVII*" (p. 458, Stanislao D'Aloe, Storie della Chiesa di Napoli: provata con monumenti, libri cinque)

[97] La Chiesa Nuova fu sovvenzionata da Alfonso II d'Aragona nel 1494, affinché fosse realizzata in corrispondenza del succorpo della più antica, secondo il progetto ed il gusto rinascimentale dell'Architetto Giovanni Donadio da Mormanno detto Francesco (n.1482 – m.1522).

quello relativo al giardino-orto a sud, contiguo alla rampa di accesso alla Chiesa Nuova, evidente nell'incisione di Nicolò Van Aelst del 1590 (Fig. 35) o ancora la nuova delimitazione del quadrilatero del quarto atrio nella veduta di Antonio Lafrery del 1566 (Fig. 36) (MAZZOLENI, 1964).

Tra il XVI e il XVII, grazie al diritto di fare insula degli ordini monastici promosso dalla Controriforma, i benedettini acquistarono i terreni e le proprietà attigue, realizzando il cortile di più recente impianto dell'intero complesso, detto *Atrio del Marmo*, in stile tardo-rinascimentale e l'Atrio primo, con ingresso principale su vico S. Severino e passo carraio da vico Pietà (ROSANOVA, 1999).
La conformazione del complesso a metà '600 appare parzialmente documentata nella veduta di Giovan Giacomo de Rossi del 1649 (Fig. 37) e in quella di Bastiaen Stopendaal del 1653 (Fig. 38), dove si notano il muro di cinta del lato sud e la scala di accesso alla nuova chiesa.

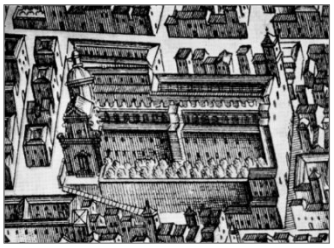
Nel XVIII secolo il monastero continua a crescere, divenendo una sorta di cittadella. È in questo periodo che vengono realizzate le sopraelevazioni dei corpi che costeggiavano gli Atrii e del prospetto prospiciente vico Pensieri[98], oltre che la balaustra in marmo antistante la Chiesa Nuova e raffigurata in una *guache* ottocentesca (Fig. 40).
Nella pianta del Duca di Noja del 1775 (Fig. 39) sono chiaramente riconoscibili i quattro Atrii, la Chiesa Nuova ed i giardini.

Tra il XIII ed il XIX secolo il monastero visse anni di declino, in gran parte dovuto al sentimento anticlericale della società borbonica.

Fig. 35 – Incisione di Nicolò Van Aelst, 1950.

Fig. 36 – Veduta di Antonio Lafrery, 1566.

[98] *(…) l'aumento della struttura architettonica in altezza sul lato prospiciente il Vico Pensieri. L'edificio conventuale ha già compiuto quindi una duplice sopraelevazione sugli atri, ha aumentato celle, dormitorii, sale di raccolta e di studio, collegando i lunghi corridoi dalle ampie volte su cui si aprivano gli ambienti con le larghe scale di piperno che riallacciavano tutte le divisioni dell'edificio col corpo principale della fabbrica, cioè allo scalone che dall'Atrio di Marmo arrivava al limite delle arcate prospicienti sui giardini e sui poggi di pietra e scendeva al piano del Vico Pensieri. Certo non tutto l'edificio aveva conservato integra l'architettura* (MAZZOLENI, 1964).



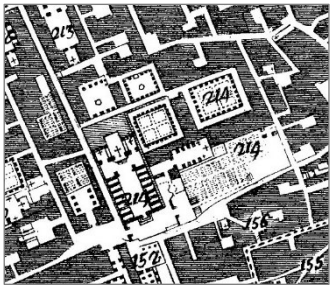


Fig. 37 – Veduta di Giovan Giacomo de Rossi, 1649.

Fonte: MAZZOLENI, 1962.

Fig. 38 – Veduta di Bastiaen Stopendaal, 1653.

Fonte: MAZZOLENI, 1962.

Fig. 39 – Pianta del Duca di Noja, 1775.

Nel 1799, durante i giorni della Repubblica Napoletana, le truppe assediarono il monastero e cacciarono i monaci che solo nel 1804 ebbero la possibilità di ritornare nel complesso, oramai devastato dalle occupazioni e in uno stato di totale degrado.
Nel periodo di dominazione francese, a seguito del decreto di Giuseppe Bonaparte che aboliva gli ordini di S. Benedetto e di S. Bernardo, i monaci vennero nuovamente allontanati dal monastero, cambiando nuovamente il complesso la sua destinazione d'uso e divenendo sede dell'Accademia di Marina e, successivamente, il Real Istituto di Marina[99].

Al ripristino del governo borbonico, Ferdinando II di Borbone, nel 1835, destinò il complesso a sede del Grande Archivio del Regno, commissionando il progetto di adeguamento ad Ercole Lauria (n.1805-m.1877), che diresse i lavori tra il 1835 e il 1864.
Trinchera[100] scrive che *al tempo in cui il governo borbonico, (…) destinava la soprascritta vastissima Badia per nuova sede del Grande Archivio, l'aspetto di essa, per volger di lunghi secoli, per negligenza degli uomini e per loro vandaliche distruzioni era divenuto assai miserabile. Vedevansi infatti screpolate le mura e le volte delle più vaste sale, secchi i giardini, spezzate le colonne, rotti i pavimenti, scialbati gli affreschi del Corenzio, e coperti di polvere, di fango e di muffa, guasti e quasi scancellati quelli dello Zingaro. Vi bisognarono perciò somme ingenti, anzi favolose pel ristauro, ed anche per la rifazione di molte parti del sontuoso edifizio, sotto l'indirizzo di valente e chiaro architetto (Una tanta opera venne meritamente affidata al solerte e valente architetto Ercole Lauria napolitano), che lo facesse risorgere a più bella luce, per meglio servire al nobilissimo uffizio, cui veniva destinato.*
Secondo Russo[101] il progetto di Lauria fu probabilmente inadeguato in quanto, nonostante i numerosi consolidamenti e i rinforzi strutturali

[99] In questa occasione, le reliquie dei S.S. Severino e Sossio furono rimosse e portate a Frattamaggiore.

[100] TRINCHERA, 1872.

[101] RUSSO, 1993.

Fig. 40 – Guache ottocentesca raffigurante la Chiesa Nuova.

Fonte: R. di Poce, *La balaustra che guarda il mare dei Santi Severino e Sossio*, Corriere del Mezzogiorno, 05 aprile 2018.

previsti, il peso degli incartamenti rese necessarie, negli anni a seguire, continue integrazioni e modifiche[102]. Nell'ottica di non alterare la conformazione originaria del monastero, Lauria ridistribuì gli ambienti, scegliendo di destinare ad archivio le sale prospicienti gli atri e ad uffici le sale del fronte sud ed accorpò gli spazi meno significativi, come le celle dei monaci, per ricavare sale più ampie. Al di sopra dell'Atrio dei Marmi le sale accorpate diedero spazio alla Biblioteca e alla Scuola di Paleografia.

Nel 1889, durante il Risanamento, la fabbrica subì nuovi stravolgimenti per la riorganizzazione del sistema urbano circostante. Una porzione del giardino a sud fu destinata alla creazione di via Bartolomeo Capasso per il collegamento con via Duomo, mentre fu allargato vico Pensieri, realizzando quella che ancor oggi è la via del Grande Archivio. Per fare ciò furono abbattute alcune delle costruzioni adiacenti, determinando sensibili danni all'edificio, in mancanza delle spinte laterali degli edifici preesistenti.

[102] I lavori di rafforzamento furono realizzati ad opera del Genio Civile (1870-1900).

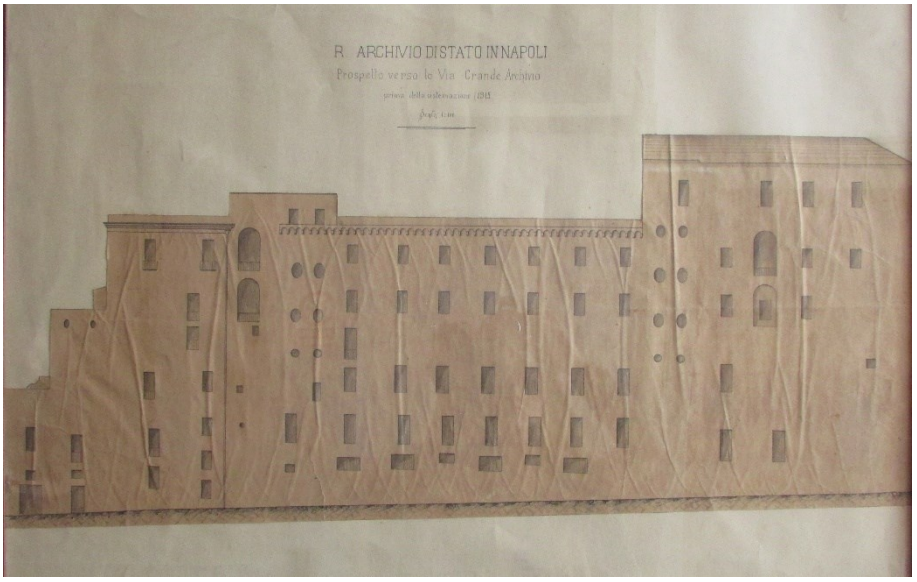


Fig. 41 – Prospetto del complesso sull'ex vico Pensieri (oggi Via del Grande Archivio), prima del rifacimento.

Fonte: Archivio di Stato di Napoli.

Il Ministero dell'Interno avviò dunque ingenti lavori di consolidamento strutturale[103] e, in risposta a desideri più volte espressi dai direttori dell'Archivio, si decise anche di spostare l'accesso principale al complesso dal vico Sanseverino (dov'era dal 1845), nella nuova grande via a est, laddove nel 1903 fu posta la fontana del Pendino, originariamente della Selleria, datata 1630[104].

[103] (…) *pilastri di sostegno dovettero spingersi fino a 22 metri sotto il livello stradale e sino ad un metro sotto l'acqua del mare per trovare terreno solido* (MAZZOLENI, 1964)

[104] *E solo a deplorare che l'accesso al medesimo Grande Archivio per un vicoletto angusto, d'ordinario ingombro d'immondizie, sporchissimo, fetidissimo accusi la colpevole incuria del Municipio Napolitano, massime di quanti ne furono a capo dal 1860 in sino ad oggi. Niun nostro reclamo, niuna nostra raccomandazione, niuna nostra preghiera potè finora scuotere la sua inerzia , o la sua indifferenza, perché una buona volta badasse al decoro di questo sontuoso monomento che è l'Archivio, al quale con vero scandalo de' riguardanti da quasi mezzo secolo si veggono appoggiate le travi che puntellano un ignobilissimo muro con larghe screpolature al tergo del Conservatorio di S. Filippo e Giacomo , che spiomba a dritta e a manca, e che se non altro, per tutelarvi la pubblica igiene, potrebbe e dovrebbe diroccarsi da cima a fondo, per ivi aprirsi una spaziosa e comoda piazza ornata di piante.* TRINCHERA, 1872.

L'apertura ufficiale del nuovo accesso avvenne solo negli anni '20 del '900, a causa dei numerosi lavori di cui necessitò il fronte[105].
Per motivi strutturali e di alleggerimento, il blocco edilizio tra il nuovo prospetto prospiciente la via del Grande Archivio e l'Atrio dei Marmi fu totalmente svuotato dai solai e dalle mura interne, formando due grandi vuoti che furono definiti *pozzi*, alti circa 30 m a partire dal piano stradale (ROSANOVA, 1999).
Negli spazi al di sopra della Sala del Capitolo (attuale Sala Catasti, ad ovest dell'Atrio dei Marmi) fu realizzata la Sala della Sommaria, mentre dal 1935 furono avviati i lavori per la realizzazione del salone (oggi Archivio di Casa Reale) al di sopra della sala del Refettorio (attuale Sala Filangieri, a nord dell'Atrio dei Marmi), il cui solaio venne distaccato dalla volta sottostante per motivi strutturali. Nello stesso anno iniziò anche la costruzione della sala degli Archivi Privati (Sala della Principessa di Cellamare, al di sopra della sacrestia della Chiesa) terminata nel 1937, e la sistemazione delle sale di studio attorno all'atrio di Marmo.
I lavori proseguirono fino al 1940, ma lo scoppio della Seconda guerra mondiale determinò un nuovo periodo di stasi, oltre che perdite di documenti e parziali danneggiamenti all'edificio.

Successivamente alla guerra, la Soprintendenza si occupò di puntuali ed urgenti interventi, fino al restauro di Sergio Rosanova (Fig. 43), grazie al quale è stato riorganizzato il sistema distributivo in coerenza con le varie funzioni, sono state incrementate le capacità di deposito in considerazione delle norme vigenti e, soprattutto, si è risolta la situazione dei *pozzi* ove è stata realizzata una nuova struttura del tutto indipendente da quella preesistente e capace di sostenere il peso di un gran numero di fasci.

[105] (…) *l'entrata sarebbe venuta a trovarsi ad un livello assai più basso rispetto alla sala di studio. Questa, dal 1878, era stata collocata al piano dell'atrio di marmo; di conseguenza, l'accesso degli studiosi provenienti da via grande Archivio poteva risultare poco agevole. (…) ma già nel 1923 se ne chiedeva la chiusura, in attesa dell'impianto di un ascensore. (…) Fu così che il vecchio e vituperato accesso su vico Sanseverino riprese le sue funzioni fino a quando, nel novembre 1930, potè essere trionfalmente inaugurato l'ascensore.* ROSANOVA, 1999.

Fig. 42 – Sintesi delle evoluzioni storiche.

Elaborazione S. Scandurra.

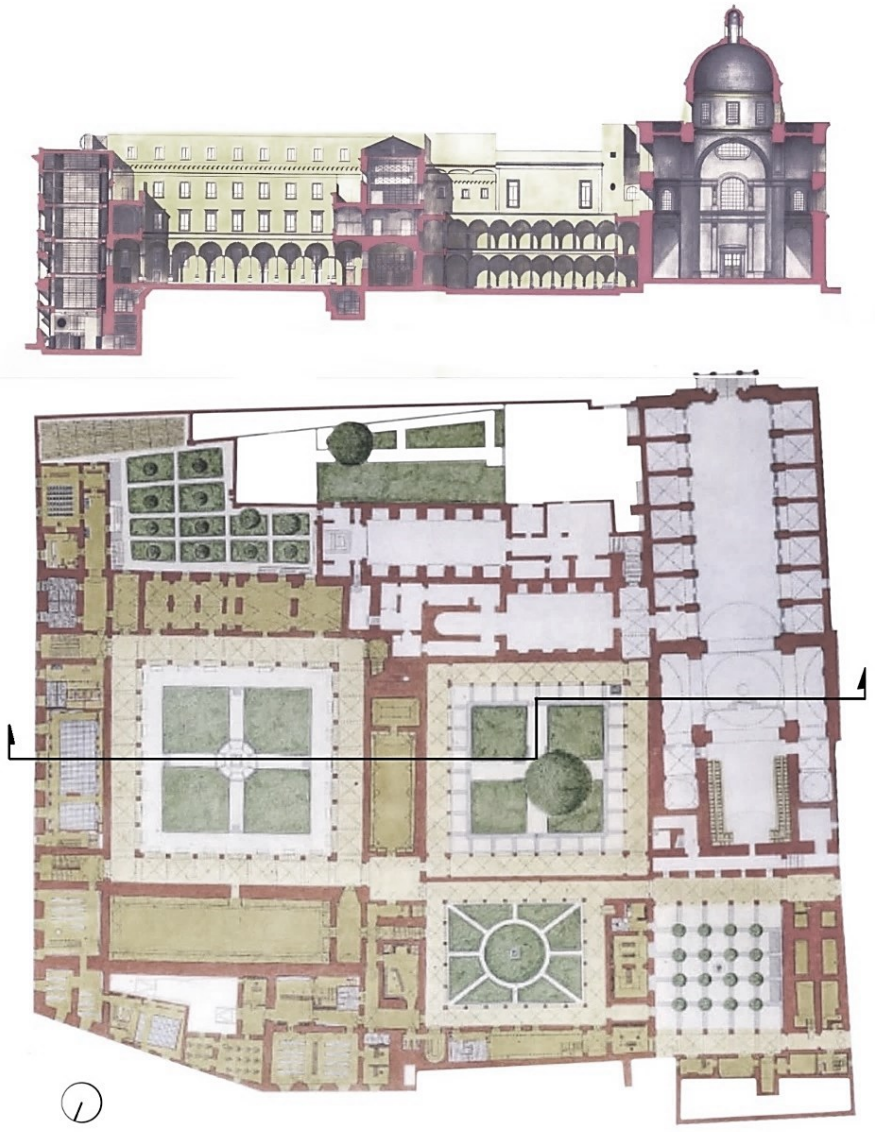


Fig. 43 – Sezione e pianta di progetto ad opera dell'Arch. S. Rosanova.

Fonte: ROSANOVA, 1999.

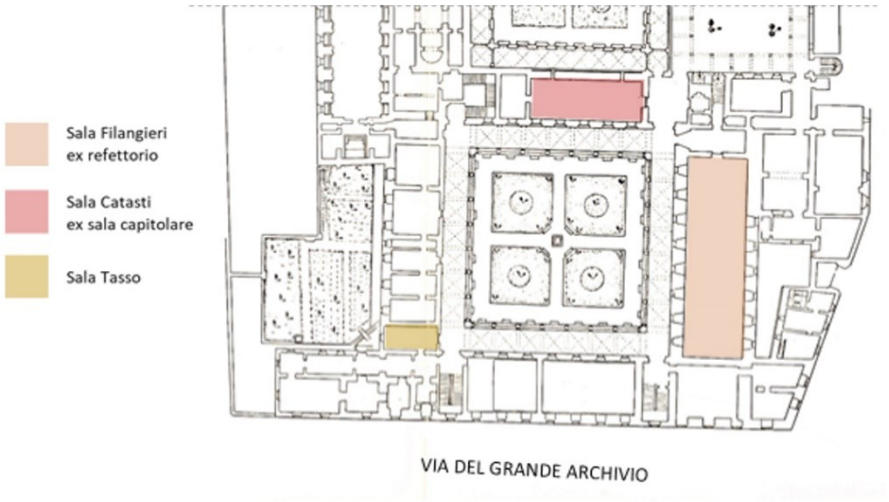


Fig. 44 – Individuazione planimetrica delle Sale che costeggiano l'Atrio dei Marmi.

Elaborazione di S. Scandurra su grafico di pianta presente in MAZZOLENI, 1964.

4.2 Definizione dell'area di studio: l'Atrio dei Marmi

L'Atrio dei Marmi è la parte più rappresentativa del complesso monastico dei Santi Severino e Sossio, sia per il significato legato alla storia delle trasformazioni, sia per le caratteristiche architettoniche che lo specificano. Si connota quale fulcro dell'intero sistema fungendo quale crocevia degli ambienti più significativi: le grandi sale che tutt'oggi lo costeggiano (Fig. 44) erano infatti un tempo destinate al refettorio (attuale *Sala Filangieri*, verso nord), alla sala capitolare (attuale *Sala Catasti*, verso ovest) e allo *scriptorium*, la biblioteca (originariamente posta nei corpi a nord dell'Atrio dei Marmi). Attualmente, le sale conservano un gran numero di fascicoli d'archivio, organizzate in prestigiosi arredi in legno intarsiato.

In particolare, dall'Atrio dei Marmi è possibile accedere alla *Sala Filangieri*[106] (36,25 m x 10,85 m x (h)12,43 m) caratterizzata da una copertura a volta a

[106] L'ex refettorio prende oggi il nome di Sala Filangieri, in onore di Riccardo Filangieri, soprintendente generale del Grande Archivio dal 1934 al 1956.

Fig. 45 – Sala Filangieri.
Foto S. Scandurra.

botte ribassata con lunette e teste di padiglione (Fig. 45), interamente affrescata di bianco con stucchi in rilievo ad opera di Gennaro Aveta[107]. Per accedere alla sala è necessario attraversare un piccolo vestibolo coperto da una volta a botte il cui ingresso è contrassegnato da un portale posto nell'angolo nord-ovest dell'Atrio dei Marmi. Nella parete di fondo della sala è conservato un grande affresco seicentesco ad opera di Belisario Corenzio (9,25 m x 5,00 m) raffigurante il miracolo della moltiplicazione dei pani e dei pesci e, simbolicamente, la moltiplicazione dell'ordine Benedettino[108].

[107] Il busto in marmo di Ferdinando II di Borbone è attribuito a Tito Angelini e risale al 1847, per volere del soprintendente generale degli archivi Antonio Spinelli di Scalea.

[108] L'opera di Belisario Corenzio è ispirata all'analoga tela dipinta per Montecassino dal pittore detto Bassano (MAZZOLENI 1964). È realizzata in soli quaranta giorni e raffigura ben centodiciassette figure. L'intera composizione è fortemente simbolica, con l'obiettivo di esaltare l'ordine monastico dei Benedettini. In alto Gesù moltiplica il pane e il pesce e, sullo stesso asse in basso c'è San Benedetto che distribuisce il pane rappresentativo della regola benedettina, da un lato (a destra) alla Chiesa, poiché si riconoscono gli abbati ed il Papa benedettino, dall'altro (a sinistra) al regno, rappresentato dal conte di Monterey viceré dal 1631 al 1637.

Fig. 46 – Sala Catasti.
Foto S. Scandurra.

Le scaffalature sono in abete, impiallacciate in legno di mogano e sono suddivise in tre ordini, con camminamenti lignei protetti da ringhiere in ferro di Gerolamo Schmidt[109]

La *Sala Catasti* o *Catasto Onciario* (Fig. 46) è a pianta rettangolare, di dimensioni pari a 20,12 x 7,50 m. La sala è coperta da una volta a botte lunettata con teste di padiglione anch'esse lunettate, alta circa 7,25 metri in chiave e 5,18 metri all'imposta ed è interamente affrescata da Bellisario Corenzio con parabole del Vangelo[110] atte a ricordare ai monaci i principi

[109] Il grande Archivio di Napoli Monumento/Documento, pubblicazione realizzata nell'ambito del POR Campania FESR 2007/2013 o. op. 1.9.

[110] *Le storie raffigurate nel mezzo sono: il paralitico calato dal tetto alla presenza di Gesù, l'adultera, i ciechi, la trave e la festuca nell'occhio, la parabola del buon samaritano, altra scena evangelica. Esse sono inquadrate in cornici, di stucco, con fasce dorate; tra di esse sono inseriti due piccoli ovati. Nella curva della volta, interrotta dalle insenature delle lunette, il pittore aggiunse immagini artistiche simboleggianti le diverse virtù, fra cui ad esempio la Carità di particolare bellezza. In quattordici tondi sono affrescati dei piccoli angeli con i simboli della Passione di Gesù Cristo e negli spazi tra lunette altre figure simboliche* (MAZZOLENI 1964).

Fig. 47 – Sala Tasso.
Foto S. Scandurra.

Fig. 48 – Sala Tasso, dettaglio degli affreschi della volta.
Foto S. Scandurra.

della regola benedettina. La sala è stata realizzata contestualmente agli ampliamenti realizzati tra la fine del XVI e gli inizi del XVII secolo. Le scaffalature lignee progettate per ospitare il fondo dei Catasti onciari, sono divise in due livelli con corridoio superiore a 2,65 m raggiungibile da scale a chiocciola. L'ingresso alla sala avviene dall'Atrio delle Statue posto nell'angolo nord-ovest dell'Atrio dei Marmi, come ambiente di collegamento tra quest'atrio e gli Atrii del Platano e Capasso. La parete sinistra della sala affaccia nel braccio ovest dell'Atrio dei Marmi mentre è cieca la parete destra, confinante con una delle pareti affrescate dell'Atrio del Platano. Sul fondo, si apre una porta tra le scaffalature che collega la sala ad un ulteriore piccolo ambiente destinato anch'esso alla conservazione dei fascicoli d'Archivio. Ai piani superiori, fino agli anni '20 del '900, erano ospitati due ulteriori piani con le celle dei monaci di cui,

Più complesso è decifrare e interpretare l'identità delle figure allegoriche intervallate dagli angeli. Secondo l'Iconografia di Cesare Ripa, in queste figure – tutte femminili, tranne la prima – si possono riconoscere, nell'ordine: lo Zelo della religione, la Mansuetudine, l'Ordine, la Confidenza, la Provvidenza, la Fermezza d'amore, la Fecondità, la Pudicizia, la Carità (Il grande Archivio di Napoli Monumento/Documento, pubblicazione realizzata nell'ambito del POR Campania FESR 2007/2013 o. op. 1.9).

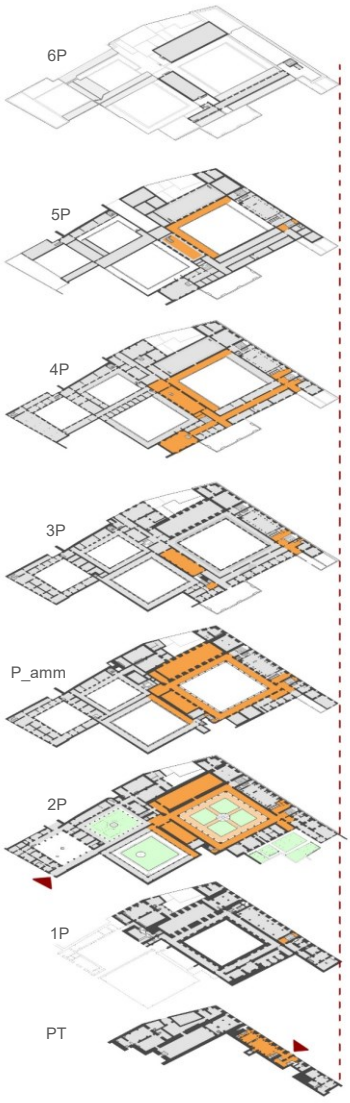


Fig. 49 – Piante del Grande Archivio con evidenziazione (in arancione) degli ambienti acquisiti con laser scanner.

Elaborazione S. Scandurra.

nell'ambito di lavori di consolidamento, nell'ottica di salvaguardare la volta, sono stati demoliti tutti i muri e i solai interni per sostituirli con un'unica grande sala dalla struttura indipendente, la Sala della Sommaria, che affaccia su una delle terrazze dell'Atrio dei Marmi.

Altra sala significativa nell'ambito dell'Atrio dei Marmi è la *Sala Tasso* (Fig. 47; Fig. 48), un ambiente di dimensioni modeste rispetto alle precedenti (9,75 m x 4,25 m), che affaccia sull'orto degli aranci a sud ed è definito da una volta a botte con lunette, affrescata con motivi floreali tipicamente neoclassici. Le panche in legno che corrono lungo le tre pareti della sala e due tavoli espositori sono i soli arredi presenti. Il nome della sala deriva dal soggiorno del poeta Torquato Tasso nel 1594. L'accesso alla sala avviene dall'angolo sud-est dell'atrio dei Marmi o da una porta secondaria ad est, attraverso gli ambienti dedicati ad ufficio del personale.

Per quanto il rilievo abbia interessato l'intero complesso si è ritenuto opportuno operare un approfondimento specifico sull'Atrio dei Marmi, in virtù dei caratteri architettonici che lo connotano e della varietà compositiva degli ambienti voltati che lo circondano. In particolare, nei paragrafi successivi vengono descritte le relative fasi di acquisizione e di processamento dei dati.

4.2.1 Acquisizione e processamento dei dati metrici acquisiti con procedure *reality based*

Acquisizione dei dati: Il primo sopralluogo finalizzato ad una preliminare lettura a vista del complesso, accompagnata da un rilievo fotografico, è stato indispensabile per definire il progetto di rilievo.

È stato infatti necessario valutare la tipologia di spazi da acquisire, al fine di scegliere le procedure, gli strumenti e i parametri di rilievo da impiegare in considerazione delle dimensioni, delle forme e della percorribilità degli spazi. È infatti vero che l'accuratezza e la risoluzione del dato possono influire notevolmente sulla conseguente interpretazione metrica e geometrica.

Nello specifico, si è scelto di procedere con un rilievo tridimensionale tale da poter ottenere un dato sufficientemente dettagliato a corto e lungo raggio per la resa geometrica anche degli elementi di dettaglio. Si è quindi optato per un rilievo di tipo TLS – *Terrestrial Laser Scanner*, utilizzando lo scanner laser *Faro Focus 3D s120* fornito dal laboratorio TIR del DiArc[111].
Si è scelto uno strumento *range-based* poiché, come è noto, consente di ottenere dati metrici indipendentemente dalla luce che investe la scena acquisita[112].
Il sistema di misurazione utilizzato dallo strumento *Faro Focus 3D s120* è a *modulazione di fase*, ovvero la distanza di ogni punto è restituita dalla differenza tra l'onda emessa dallo strumento e quella riflessa dalle superfici rilevate[113]. In particolare, il *range* di acquisizione, in condizioni ottimali, va da 0.8 m a 120 m, con un angolo di presa di 360° sul piano orizzontale e 300° sul piano verticale[114] ed un'accuratezza dell'ordine di ± 2 mm su 25 m.
Poiché la tecnologia di acquisizione è di tipo *statico*, è stato innanzitutto necessario programmare i punti di stazionamento lungo il percorso di acquisizione, facendo attenzione ad evitare eccessive zone d'ombra. Inoltre, sono stati apposti *target sferici* e *a scacchiera* nella scena[115], per l'allineamento delle scansioni in fase di post-processamento.

---

111 Laboratorio di Tecniche e Tecnologie Innovative per il Rilievo e la Rappresentazione, presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

112 I sistemi ottici attivi non si servono della luce presente nella scena affinché il dato metrico possa essere acquisito. Ovviamente condizioni di illuminazione particolarmente sfavorevoli possono ugualmente disturbare la misurazione in luce codificata, generando una percentuale – seppur minima – di imprecisione o inaccuratezza.

113 Cfr. Cap. 2.

114 In verticale il campo visivo dello strumento è limitato a 300° poiché elimina la posizione di sé stesso dalla scena.

115 Dal punto di vista matematico, sarebbero stati sufficienti tre riferimenti in comune tra due scansioni successive. In realtà il compensatore biassiale integrato nello strumento acquisisce dati di inclinazione che utilizza ugualmente come riferimento, rendendo

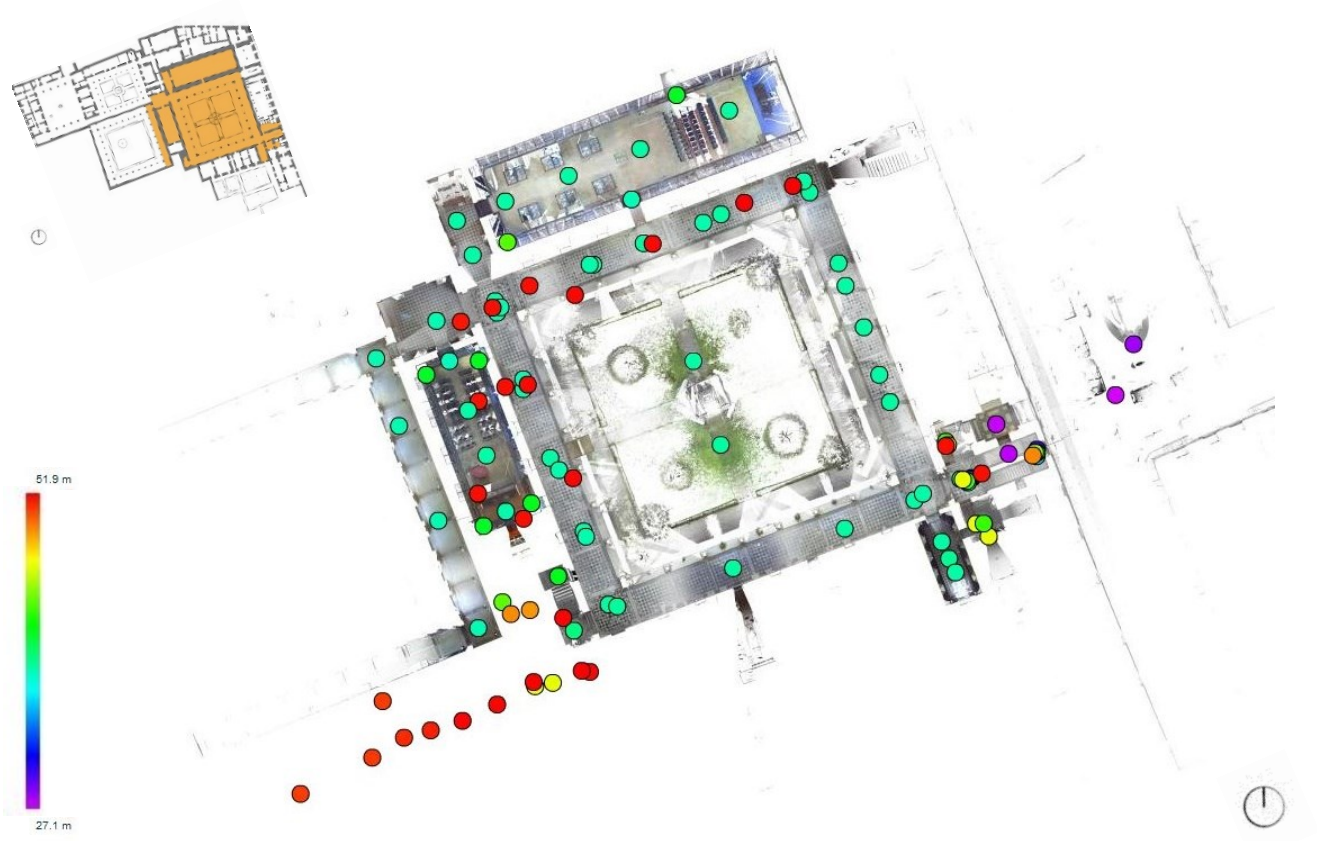


Fig. 50 – Porzione acquisita con laser scanner (in arancione) al piano secondo. Individuazione dei punti di stazionamento con le differenti quote altimetriche in un'immagine elaborata da S. Scandurra col software *SCENE Web-Share*.

L'atrio di ingresso e il vano scala sono stati rilevati da 22 punti di stazionamento, scegliendo la posizione di scansione e le impostazioni dei parametri in modo tale da ottenere un grado di infittimento medio e ottimizzare i tempi. Nonostante lo strumento sia dotato di camera digitale integrata utile all'acquisizione del colore, per gli ambienti relativi ai collegamenti verticali si è scelto di registrare esclusivamente i dati metrici e il valore di riflettanza.

necessari solo due *target*. Ciononostante, un numero maggiore di riferimenti tra due scansioni consente di ridurre la percentuale di errore. Sempre al fine di ottimizzare il processo ed i risultati, nell'apposizione dei *target* si è cercato di distribuirli in maniera tale da non risultare equidistanti dallo strumento né allineati.

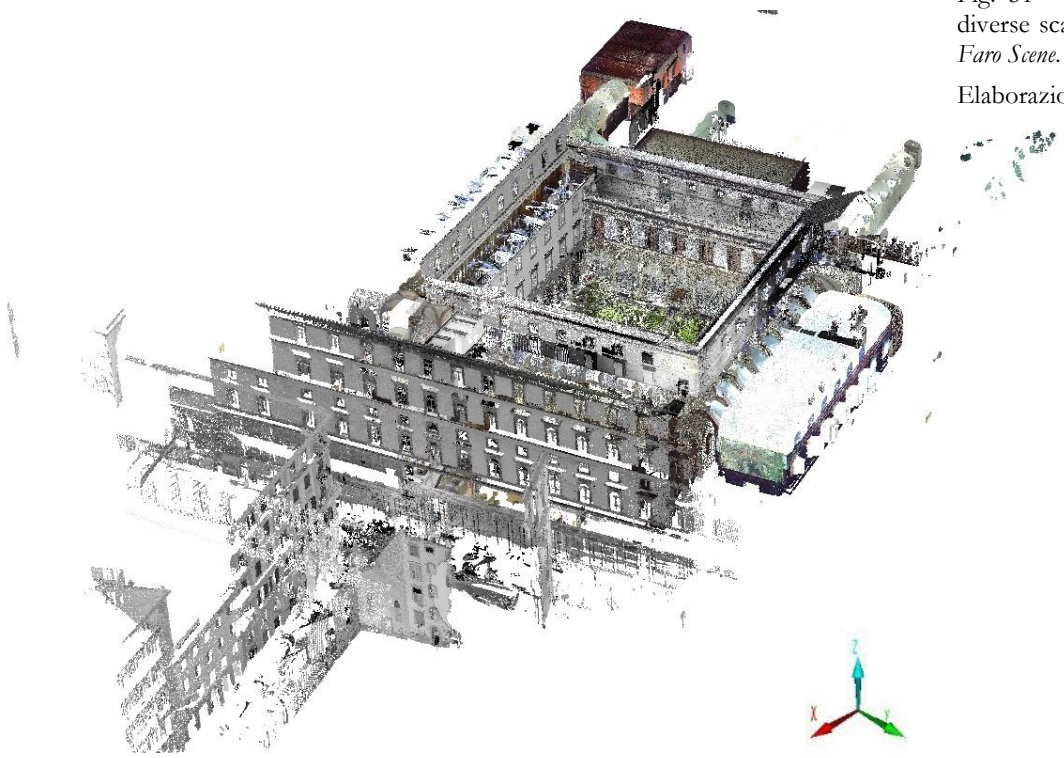


Fig. 51 – Allineamento delle diverse scansioni nel software *Faro Scene*.

Elaborazione S. Scandurra.

I prospetti interni del chiostro dell'Atrio dei Marmi e delle sale prospicienti sono stati invece rilevati con una risoluzione maggiore e contestualmente al dato fotografico.

In totale sono state effettuate 96 scansioni[116], muovendosi lungo percorsi chiusi per ricalibrare eventuali errori negli allineamenti in fase di processamento.

[116] Sono state effettuate 2 scansioni all'esterno, 20 scansioni nelle scale, 39 scansioni nell'atrio dei marmi e negli ambienti ad esso adiacenti, 9 scansioni sulle terrazze affacciate nell'Atrio dei Marmi, 7 scansioni nella scala di piperno posta nell'angolo sud-ovest dell'Atrio dei Marmi e 19 scansioni in ambienti attigui all'Atrio dei Marmi.

Fig. 52 – Errore generato dal software nel riconoscimento automatico dei *target*.

Elaborazione S. Scandurra.

I parametri[117] di acquisizione sono stati impostati in modo tale da acquisire un punto ogni 6 mm a distanze di 10 m, a meno delle scansioni effettuate nei collegamenti verticali, dove si è scelto di diminuire la risoluzione fino ad ottenere un punto ogni 12 mm a 10 m.

Processamento dei dati: I dati acquisiti sono stati inizialmente suddivisi per gruppi, ognuno relativo ad uno specifico ambiente (scale di accesso, scale in piperno, Atrio dei Marmi, Sala Tasso, Sala Filangieri, Sala Catasti, Atrio delle Statue) al fine di snellire gli oneri computazionali e renderne più agevole la gestione. Le nuvole di ciascun gruppo sono state processate col software proprietario *Faro Scene*[118], sfruttando la funzionalità di allineamento basata sul riconoscimento automatico dei *target* distribuiti nella scena. La fase successiva è stata quella dell'allineamento e dunque della rototraslazione delle singole scansioni per un riposizionamento, sulla base dei *target*, in esatta corrispondenza rispetto ad una prima nuvola scelta

[117] I parametri impostati per la scansione riguardano la scelta di acquisire il colore, il valore di qualità ed il valore di risoluzione. Questi definiranno il numero di volte di acquisizione dello stesso punto, il numero di punti di cui è composta la singola nuvola e i tempi di acquisizione.

[118] https://www.faro.com/it-it/prodotti/design-del-prodotto/faro-scene/

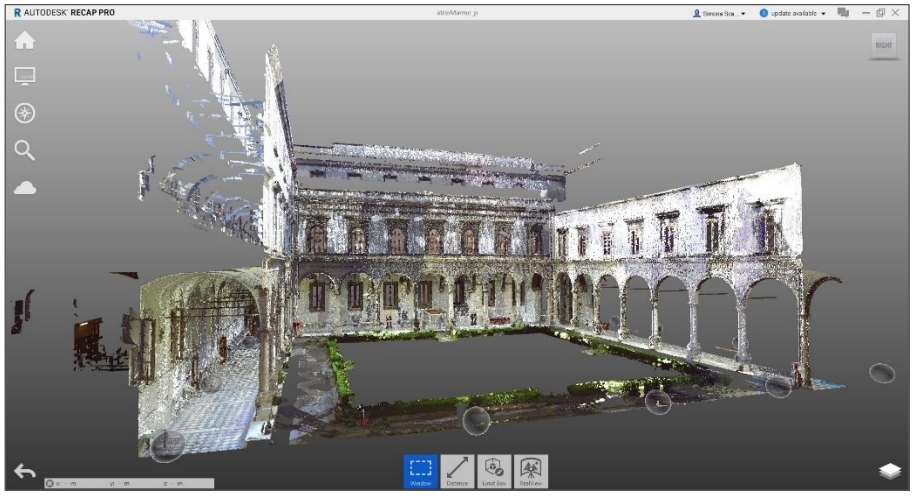


Fig. 53 – La pulizia delle nuvole di punti è avvenuta in *Autodesk ReCap*.

Elaborazione S. Scandurra.

come riferimento. In alcuni casi sono stati necessari accorgimenti dovuti alla particolare pavimentazione marmorea – composta da lastre quadrate alternate in bianco e nero – che caratterizza gli ambienti dell'Atrio dei Marmi e della scala di accesso, poiché il software ha erroneamente associato *target a scacchiera* in corrispondenza delle fughe della pavimentazione. Ciò ha richiesto un intervento puntuale di individuazione e di eliminazione manuale del dato errato (Fig. 52).

I diversi gruppi sono stati successivamente concatenati tra loro affinché la nuvola di punti complessiva fosse coerentemente allineata e montata in un unico sistema tridimensionale.

L'osservazione attenta del dato ha evidenziato la presenza di *rumore,* dipendente in gran parte dal passaggio di persone durante le acquisizioni o in corrispondenza dei punti acquisiti attraverso le finestrature, per cui è stata necessaria una fase di *filtraggio* con *Autodesk Recap* per la manipolazione del dato puntiforme.

Pertanto, le nuvole sono state esportate nei singoli gruppi e ciascuno di essi è stato aperto e *pulito* attraverso *selezioni a lazo* o *rettangolari*. Tale procedura non ha generato alcuna perdita relativamente al dato di posizione relativa tra i gruppi di scansione. Non si è ritenuto necessario procedere con elaborazioni *mesh* poiché non direttamente importabili

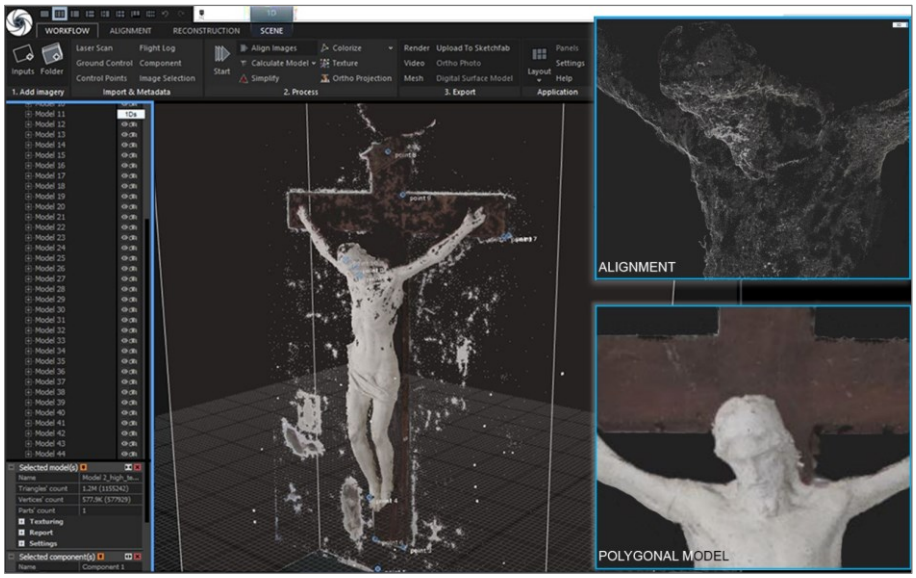


Fig. 54 – Rilievo *image based* della scultura del Cristo posta nelle scale in piperno dell'Atrio dei Marmi.

Elaborazione S. Scandurra.

all'interno del software utilizzato per la modellazione HBIM (*Autodesk Revit*), così come verrà specificato nei prossimi capitoli.

Acquisizioni image based: Per alcuni elementi è stato necessario procedere con un infittimento del dato puntiforme integrando il rilievo *range based* con un rilievo di tipo *image based*. Questo è il caso degli elementi scultorei posti in numerosi ambienti dell'Archivio di Stato (Fig. 54) e delle superfici ricche di affreschi e strucchi. Il dato fotografico ha consentito infatti di ottenere una resa grafica più affine al reale in termini di verosimiglianza cromatica e texturizzazione.

Per le statue sono stati effettuati set fotografici con scatti ad asse convergente (DE LUCA, 2011), muovendosi lungo un percorso circolare attorno all'oggetto ed acquisendo più volte dal basso verso l'alto, in modo da poter restituire l'opera nella sua interezza. La fotocamera utilizzata per l'acquisizione è di tipo *bridge*[119], mentre il processamento è stato effettuato col supporto del software *Reality Capture* in modo da poter utilizzare automaticamente e contestualmente la relativa porzione di nuvola di punti

[119] Canon SX500is.

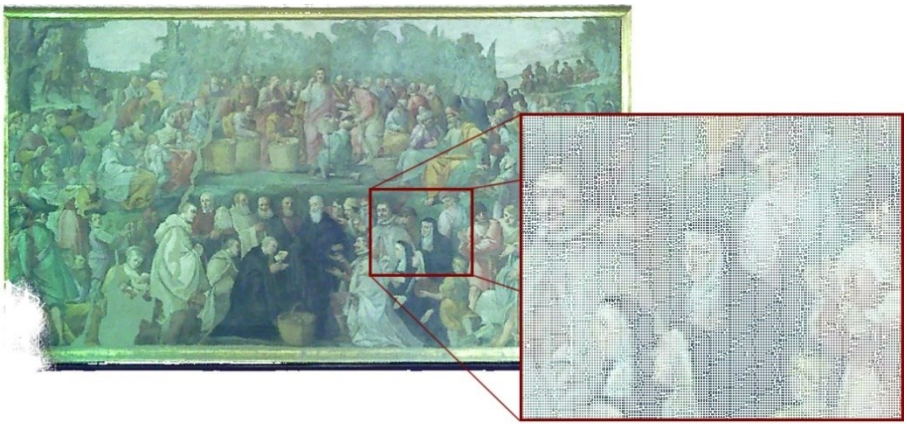


Fig. 55 – Rilievo *image based* dell'affresco presente nella Sala Filangieri.

Elaborazione S. Scandurra.

laser scanner come riferimento per le dimensioni e l'orientamento corretto dell'elemento. Affinché l'elaborato potesse essere letto in *Autodesk Revit*, per l'esportazione è stato necessario estrarre i vertici del modello poligonale a mo' di nuvola di punti *densa*[120].
Per le grandi superfici affrescate l'acquisizione è avvenuta con la medesima fotocamera, effettuando però scatti ad assi paralleli integrati con scatti finali ad assi convergenti verso il centro dell'elemento acquisito. Trattandosi di superfici vaste, per lo più prive di discontinuità plastiche, si è scelto di elaborare il dato con il supporto del software *Metashape* in modo da poter ottenere una nuvola densa sufficientemente fitta, tralasciando la costruzione del modello poligonale. In questo caso la messa in scala e l'orientamento sono stati controllati misurando ed individuando manualmente *punti naturali* adeguatamente riconoscibili nel dato laser e nel dato fotogrammetrico.

Estrazione di viste bidimensionali: A partire dalla nuvola di punti, si è scelto di estrarre ortofoto delle viste di piante dell'area rilevata per effettuare un confronto con la documentazione grafica di archivio reperita

[120] In *Autodesk Revit* non è stato possibile leggere il modello poligonale prodotto dalla nuvola di punti, per cui si è scelto di trasformarlo in modello puntiforme denso attraverso la lettura dei vertici della *mesh*.

nella prima fase di studio e dalla cui sovrapposizione sono emerse alcune incongruenze in particolare relative agli spessori murari.
Le ortofoto di viste in sezione sono state utilizzate per lo studio dei prospetti dell'Atrio dei Marmi e per l'estrazione di profili di dettaglio in corrispondenza delle colonne, delle volte e delle modanature[121], con l'obiettivo di comprenderne i rapporti geometrici e la sintassi compositiva.

[121] Cfr. capitolo 5 e capitolo 7.

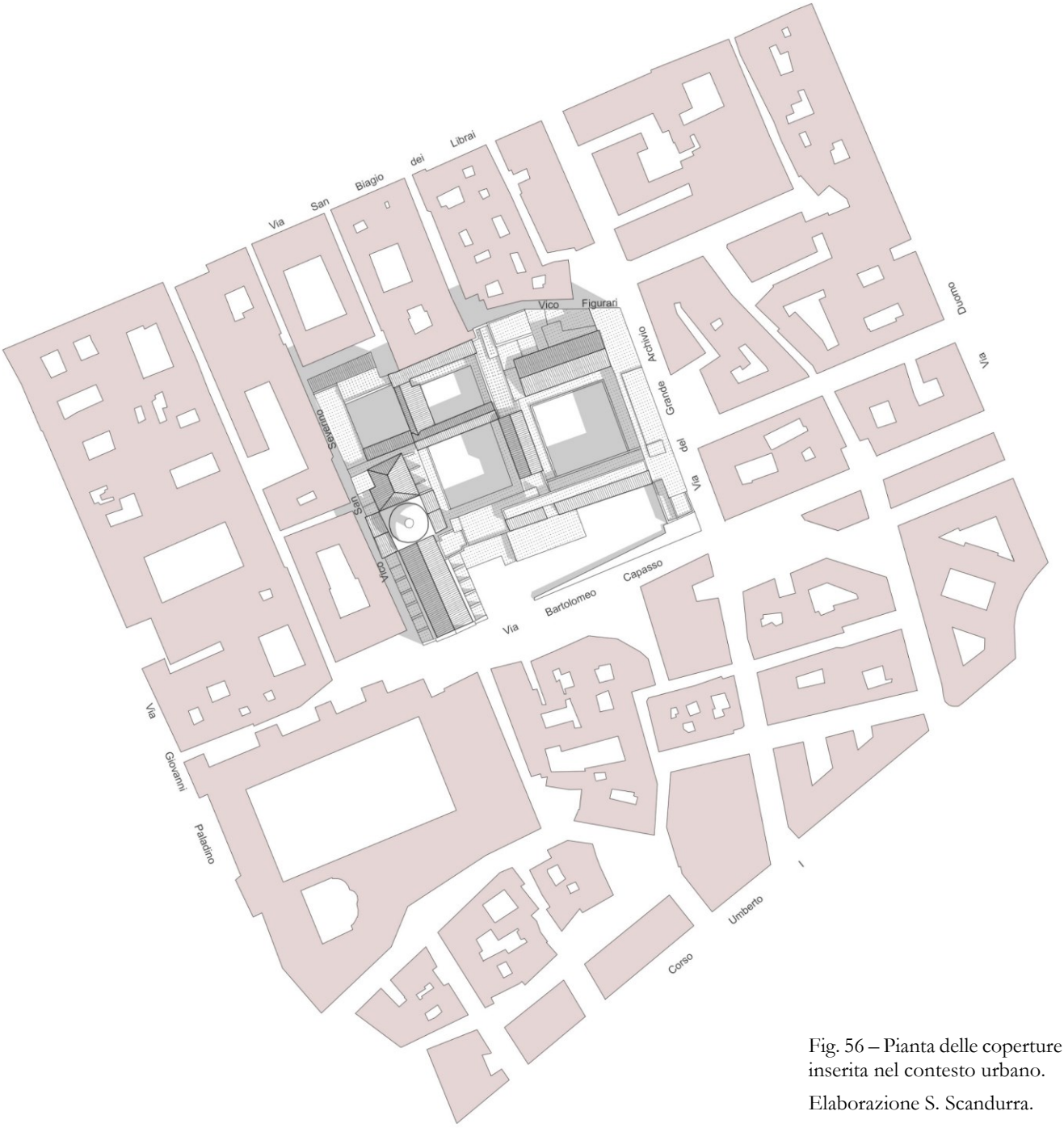


Fig. 56 – Pianta delle coperture inserita nel contesto urbano.

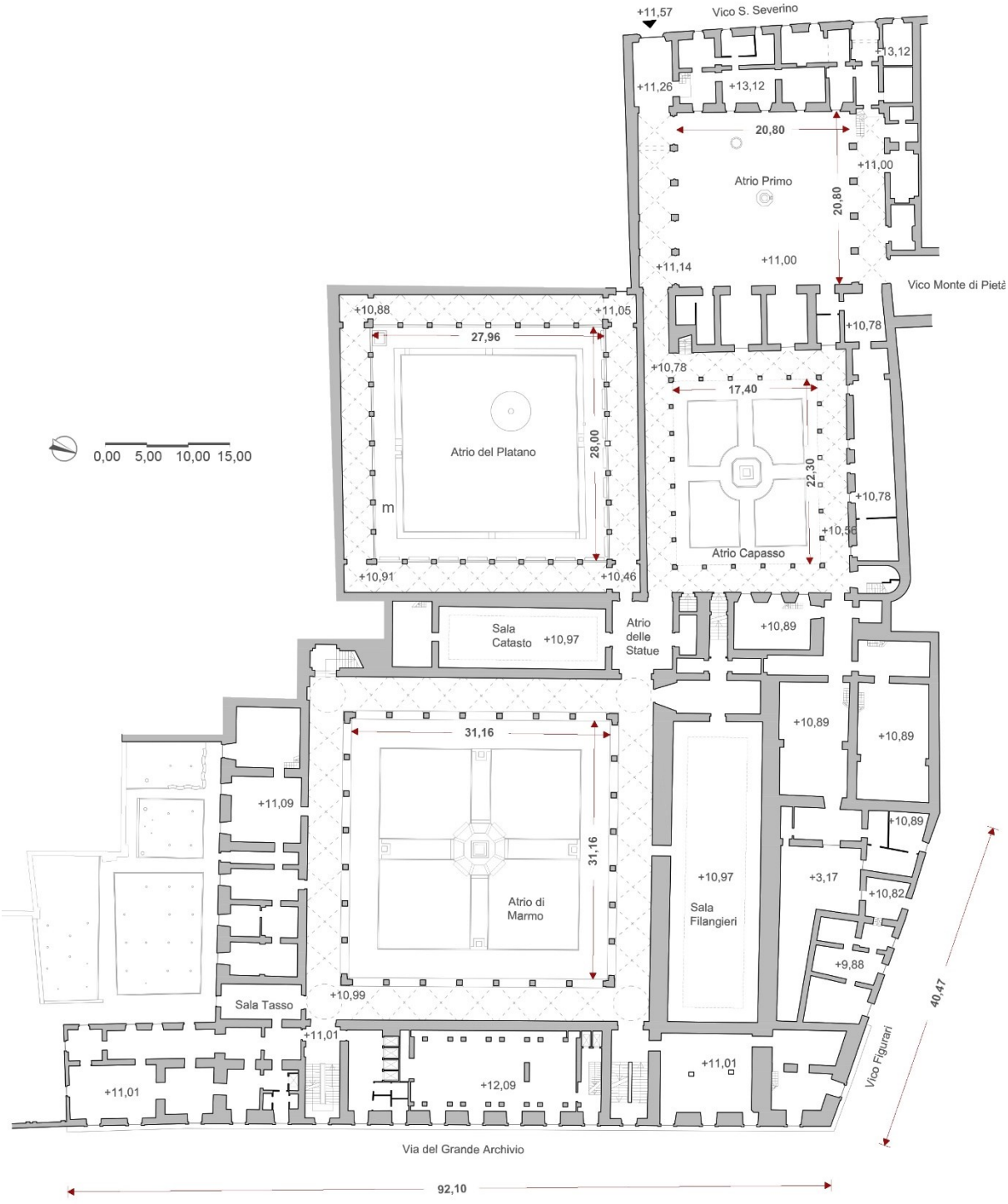
Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 57 – Pianta del piano terra e prospetto principale su Via del Grande Archivio.

Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 58 – (pagina successiva) Pianta del piano secondo, corrispondente al piano degli Atrii.

Elaborazione S. Scandurra.


+11,57
Vico S. Severino
+13,12
+11,26
+13,12
20,80
+11,00
Atrio Primo
20,80
+11,14
+11,00
Vico Monte di Pietà
+10,88
+11,05
27,96
+10,78
+10,78
17,40
Atrio del Platano
28,00
22,30
+10,78
m
+10,56
Atrio Capasso
+10,91
+10,46
Sala
Catasto
+10,97
Atrio
delle
Statue
+10,89
31,16
+10,89
+10,89
+11,09
+10,89
31,16
Atrio di
Marmo
+10,97
Sala
Filangieri
+3,17
+10,82
+9,88
40,47
Sala Tasso
+10,99
+11,01
+11,01
+11,01
+12,09
Vico Figurari
Via del Grande Archivio
92,10
0,00 5,00 10,00 15,00

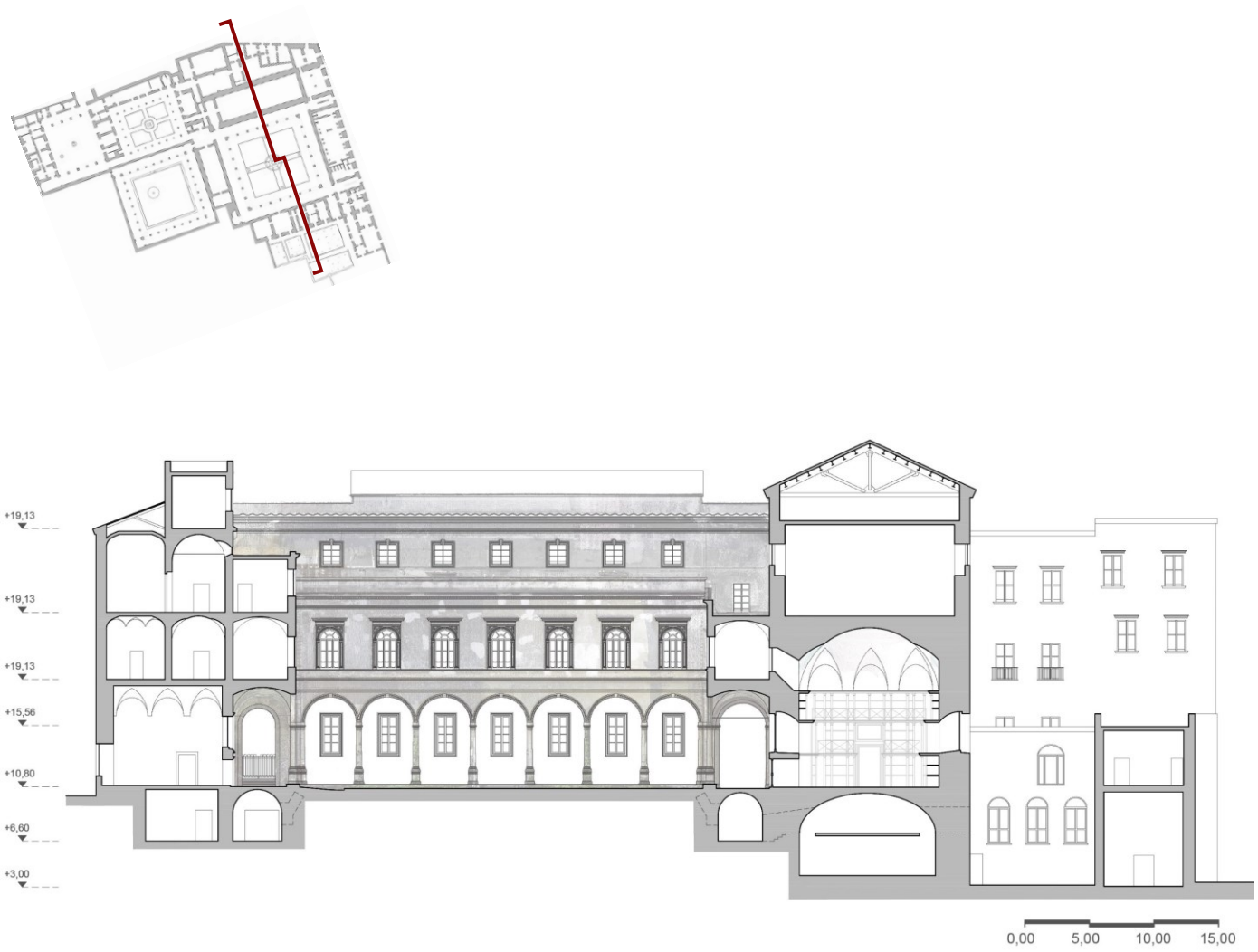
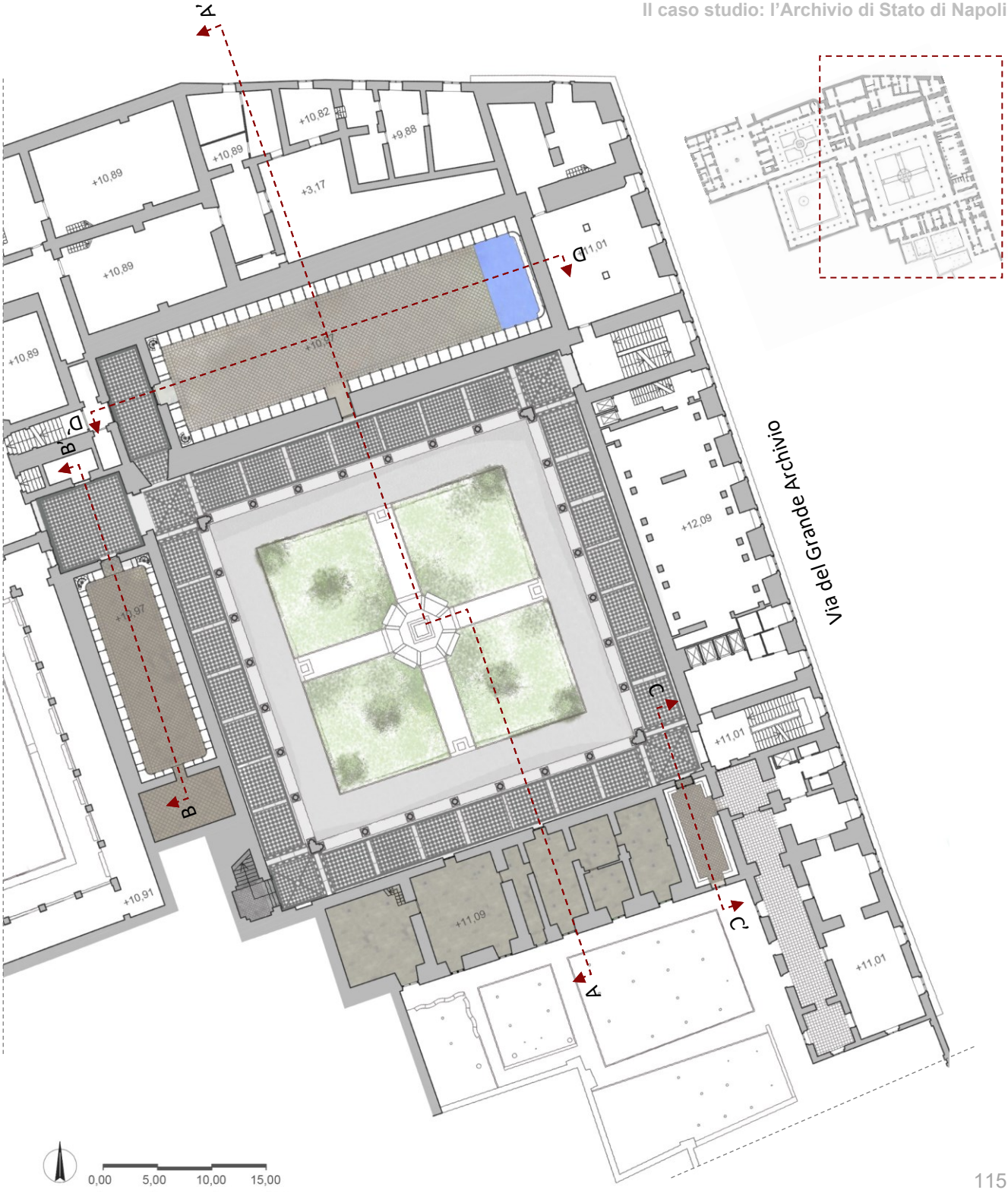


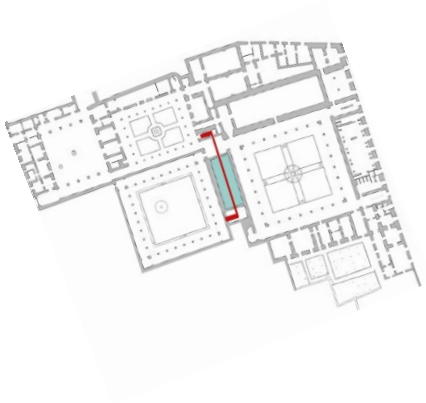
Fig. 59 – Sezione-prospetto A-A'.

Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 60 – (pagina successiva) Ingrandimento della pianta del secondo piano con dettaglio della pavimentazione delle aree di studio.

Elaborazione S. Scandurra.


A'
D
B
C
A
+10,89
+10,89
+10,89
+10,89
+10,82
+9,88
+3,17
+11,01
+12,09
+11,01
+11,09
+11,01
+10,91
+11,97
Via del Grande Archivio
0,00
5,00
10,00
15,00



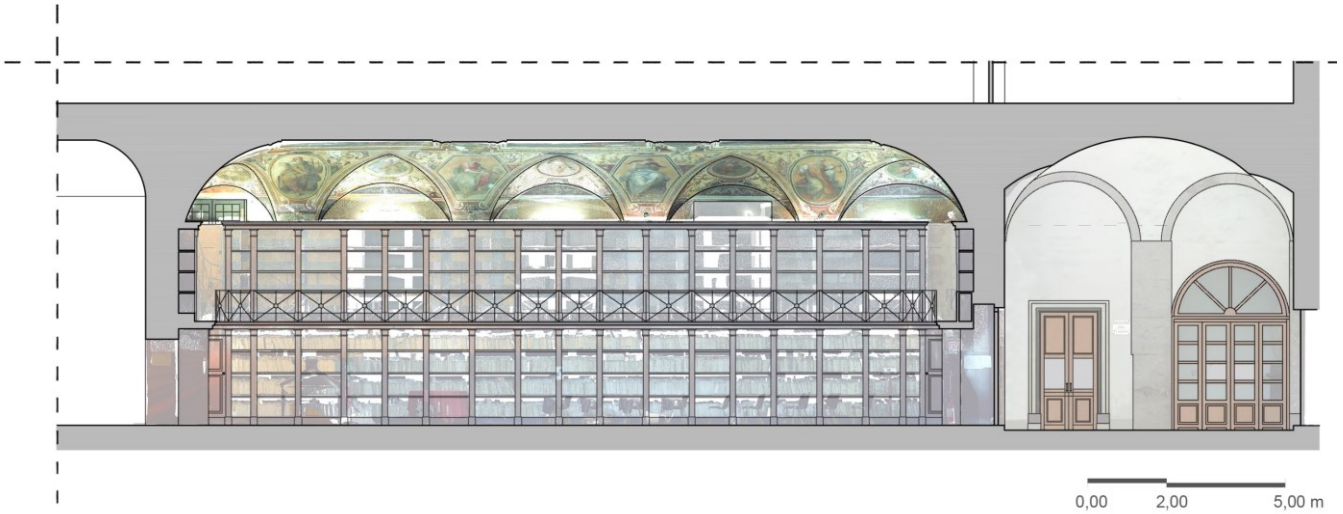


Fig. 61 – Sezione longitudinale della Sala Catasti B-B'.

Elaborazione S. Scandurra.

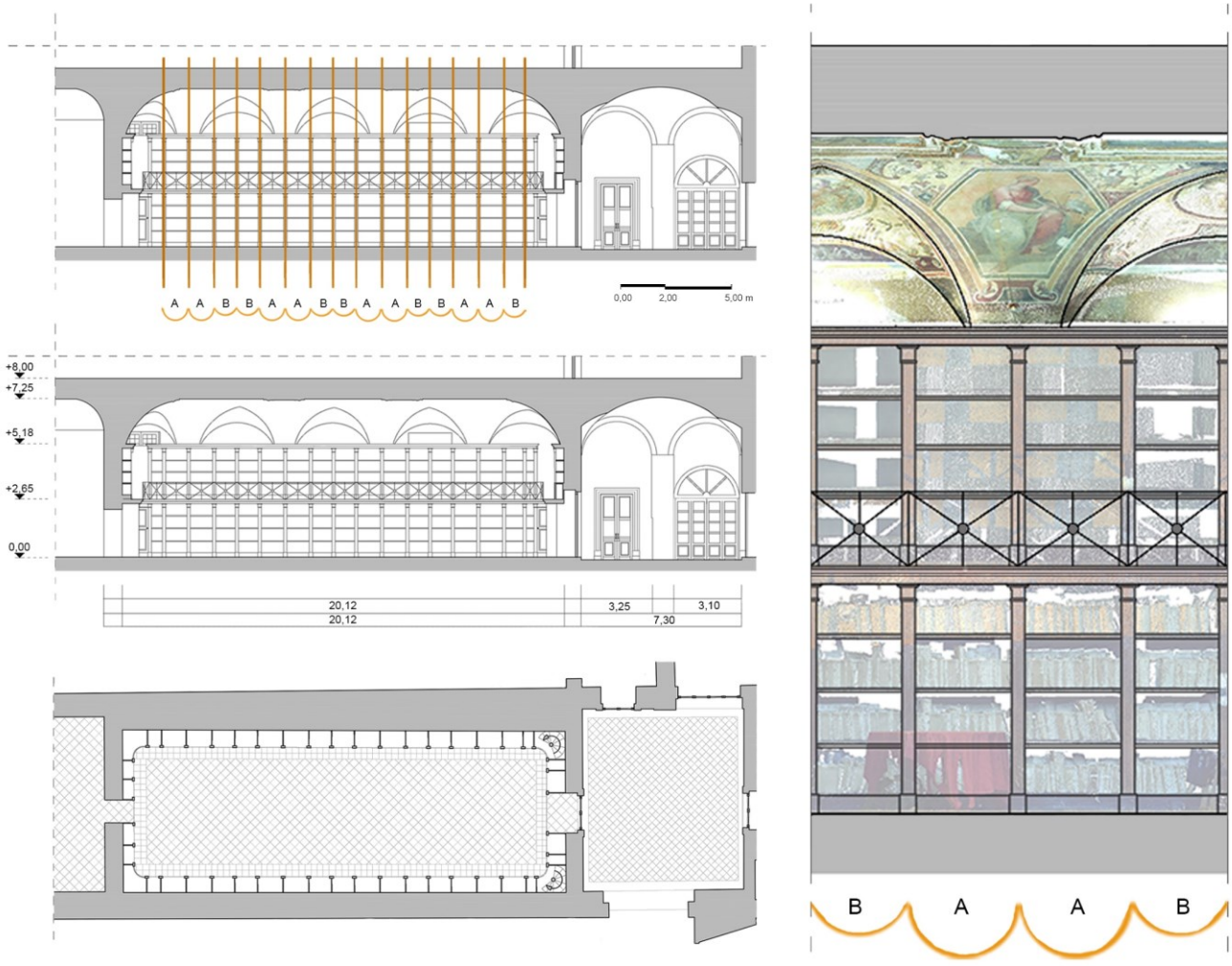


Fig. 62 – Dettaglio della scaffalatura della Sala Catasti.

Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 63 – Sezione longitudinale della sala Tasso C-C'.

Elaborazione S. Scandurra.

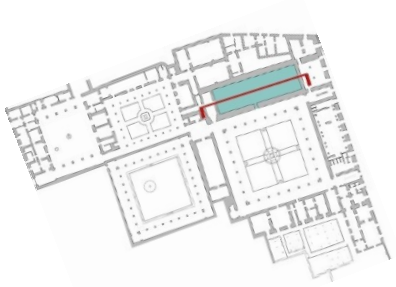


Fig. 64 – Sezione longitudinale della Sala Filangieri D-D'.

Elaborazione S. Scandurra.

CAPITOLO QUINTO

La modellazione HBIM dell'Archivio di Stato di Napoli

5.1 *Framework* di progetto

L'applicazione della metodologia HBIM agli ambienti dell'Archivio di Stato di Napoli è stata operata con l'obiettivo di sperimentare su un caso studio di particolare interesse la realizzazione di un documento informativo tridimensionale, tale da rendere fruibili i dati metrici e geometrici nonché le informazioni storico-artistiche raccolte durante la ricerca.
Come già specificato, l'approccio all'HBIM è diverso da quello proprio del BIM, per cui alcune soluzioni sono state adottate in base alle specifiche esigenze del caso, verificando volta per volta la possibilità di adattare gli strumenti disponibili nella piattaforma *Autodesk Revit* scelta per la sperimentazione o di integrare l'elaborazione con software esterni. È necessario, infatti, operare valutazioni critiche di circostanza per lavorare con dispositivi digitali che all'occorrenza rispondano al meglio. alle specifiche circostanze[122]. Ogni elemento è stato quindi valutato in via

[122] In M. Franceschetti, Modellazione del complesso e consapevolezza dell'errore, in *BIM Nation* n.2/2019, l'autore racconta della scelta di modellare i binari della linea ferroviaria con l'oggetto *Ringhiera* del software *Autodesk Revit* che, pur non corrispondendo alla

preliminare, affinché il comportamento dell'oggetto digitale potesse essere rispondente al comportamento reale, nonostante le limitate categorizzazioni semantiche previste dalla piattaforma.
Particolare attenzione è stata posta alla restituzione affinché fosse il più possibile aderente allo stato di fatto[123], sia per quanto riguarda la conformazione di insieme, sia in riferimento ai singoli dettagli.
In considerazione della normativa italiana vigente, per l'area di studio dell'Archivio di Stato, il LOD di riferimento è stato considerato variabile a seconda delle specifiche modellazioni: trattandosi di un edificio esistente e considerando che i dati reperiti non consentivano un adeguato livello informativo delle caratteristiche non superficiali, il LOD è variato tra B (*oggetto generico*), C (*oggetto come definito*) e D (*oggetto dettagliato*).

I dati principali di *input* per la modellazione sono stati le nuvole di punti acquisite nel corso della ricerca, insieme alle elaborazioni vettoriali 2D da esse derivate (piante e sezioni), alle immagini *raster* di rilievi pregressi (piante e sezioni) e alle informazioni storiche sull'evoluzione del complesso.
L'organizzazione preliminare dei dati è stata di fondamentale importanza in vista di un processo efficiente ed efficace. I dati raccolti sono stati innanzitutto catalogati secondo le proprie specificità, distinguendoli in rilievi, foto, disegni e testi, successivamente analizzati e confrontati per categorie, cosicché l'informazione importata fosse già verificata e priva di sovrapposizioni. In particolare, il confronto dei disegni di archivio con le

categorizzazione reale, fornisce una soluzione di gestione della forma ed un comportamento dell'elemento rispetto al suolo più simile al comportamento reale.
In Scandurra et al., 2017 gli autori scelgono di modellare il manto bugnato della facciata di ingresso nidificando la famiglia *Facciata continua* del software *Autodesk Revit* affinché la soluzione finale fosse non troppo onerosa in termini di modellazione e rispondente alle esigenze di interrogabilità e particolarizzazione delle diverse bugne.

[123] Non si è tenuta considerazione degli aspetti impiantistici.

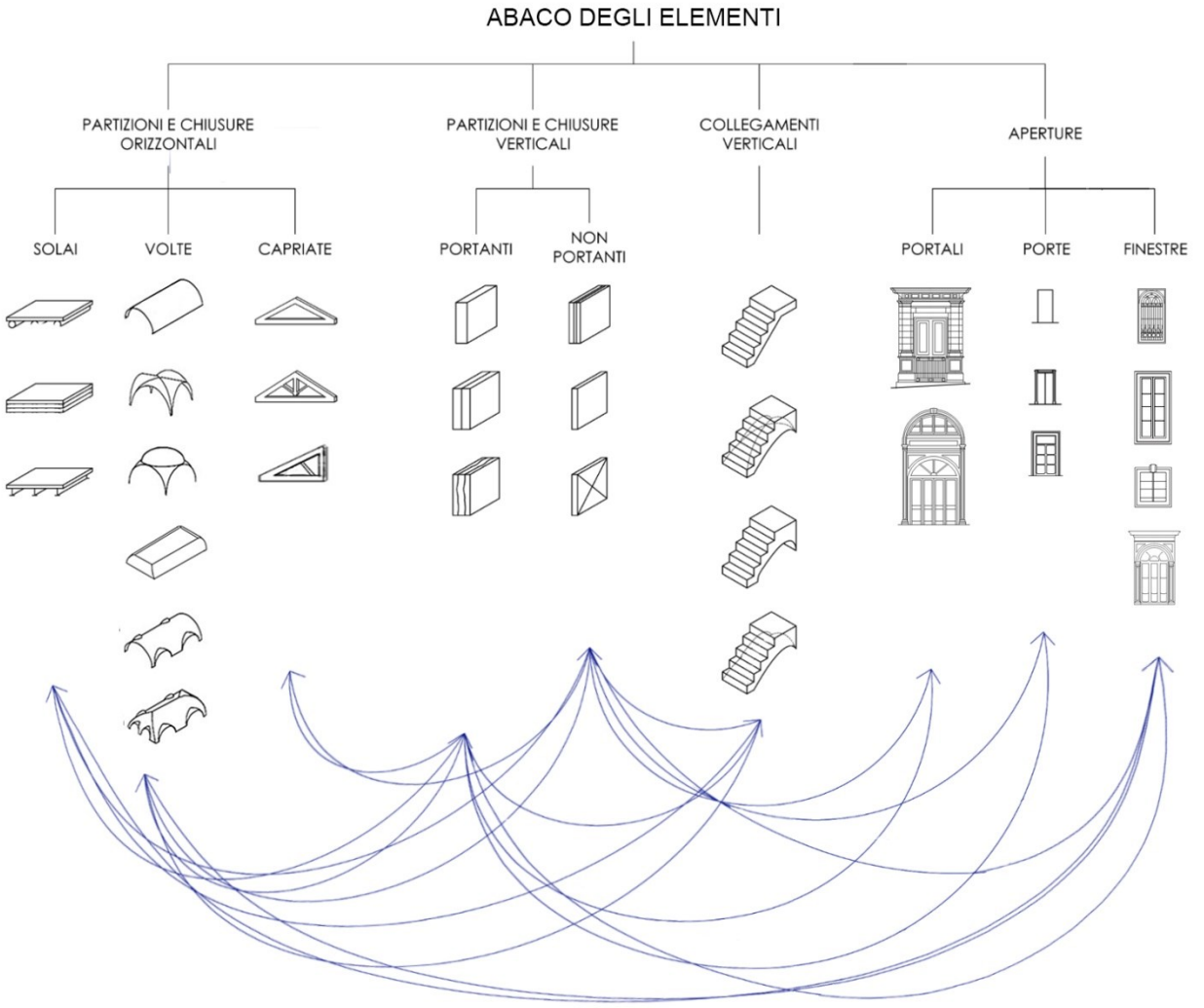


Fig. 65 – Abacatura con individuazione delle principali categorie di elementi costituenti il manufatto indagato e delle relazioni reciproche.

Elaborazione S. Scandurra.

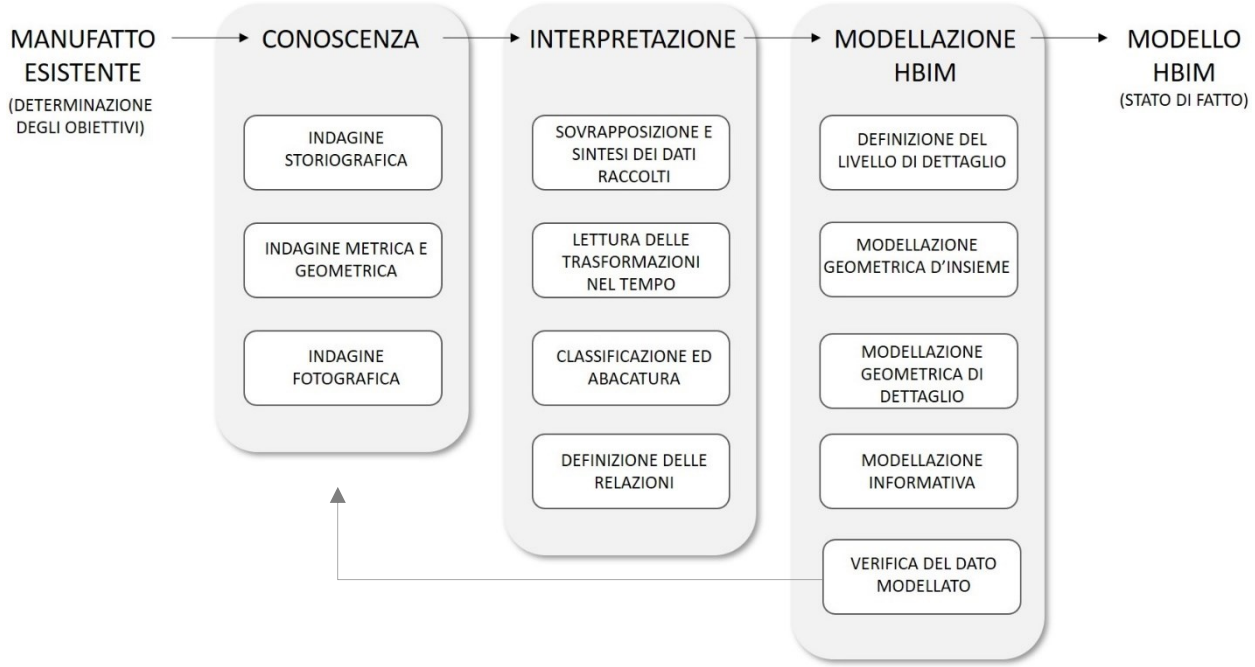


Fig. 66 – Workflow HBIM. Elaborazione S. Scandurra.

nuvole di punti ha dato luogo alla redazione dei disegni CAD che sono stati una prima base per la lettura dei rapporti geometrici e per il completamento del dato laddove non sono state impiegate le tecnologie laser scanner o fotogrammetriche.

Inoltre, insieme con l'osservazione diretta del manufatto, tali dati hanno reso possibile la strutturazione di una preliminare abacatura delle componenti, nell'ottica di stilare una prima ipotesi delle tipologie di *smart object* da modellare (Fig. 65).
Un'efficace gestione delle informazioni in tre dimensioni per qualsiasi edificio storico deve infatti prendere in considerazione tre aspetti principali: segmentazione ontologica, strutturazione delle relazioni gerarchiche e arricchimento semantico. Per quanto riguarda la fase di segmentazione, l'identificazione delle diverse componenti architettoniche nelle nuvole di punti è di primaria importanza (SAYGI & REMONDINO, 2013), purché sia chiaro il ruolo e il significato attribuito ad ognuna di esse. Al fine di comprenderne la sintassi, tale operazione consiste nello

scomporre la realtà attraverso precise leggi costitutive, dando luogo alla categorizzazione dei singoli elementi che la compongono, a partire dal generale, fino al dettaglio.
L'abacatura preliminare si è pertanto limitata alla classificazione delle componenti del sistema tecnologico rappresentativo del manufatto analizzato, queste ultime calibrate secondo le corrispondenti categorizzazioni previste nel motore di *Autodesk Revit*[124]. A tal proposito, va detto che dal punto di vista gerarchico e semantico, i sistemi BIM ragionano su una struttura di elementi estremamente chiara e approssimabile al reale, poiché indipendentemente dalla tecnica di modellazione, l'oggetto finale non è identificato attraverso la propria astrazione geometrica ma, piuttosto, attraverso regole di interazione e aggregazione predeterminate. La trasposizione di questa logica alla documentazione del costruito storico non è immediata, perché mentre sono previsti elementi tipici dell'architettura contemporanea, è lasciato all'operatore l'onere di immaginare la strutturazione geometrica e comportamentale di elementi *altri*. Ciò accade spesso nell'approcciarsi a modellazioni di tipo HBIM, poiché a elementi come capitelli, sistemi voltati, lesene e paraste, che sono chiaramente identificabili, non corrispondono dei cloni virtuali nelle librerie di oggetti BIM predefiniti. Inoltre, anche elementi come le finestre, spesso caratterizzate da cornici riccamente modanate, devono essere modellate *ex novo* richiedendo l'operazione lunghe tempistiche, oltre che la definizione di complesse strutture relazionali.
In altre parole, l'arricchimento semantico di un modello dell'esistente storico comporta un impegno rilevante sia in termini di categorizzazione che di modellazione.

[124] Cfr. cap. 3.

5.2 Fasi di Lavoro

Il progetto è stato suddiviso in più fasi che, a partire dall'organizzazione del dato, hanno portato all'esplicitazione del modello HBIM prefigurato. In particolare, il lavoro ha seguito il seguente *workflow*:

- Operazioni preliminari: collegamento delle nuvole di punti, individuazione dei riferimenti di base ed organizzazione del *browser di progetto*, collegamento dei dati CAD;
- Modellazione tridimensionale informativa: strutturazione delle componenti d'insieme (*famiglie di sistema*) e di dettaglio (strutturazione e posizionamento delle *famiglie caricabili*);
- Implementazione dei dati: associazione delle informazioni acquisite e della documentazione aggiuntiva;
- Estrazione del dato: elaborazione di viste tridimensionali, viste bidimensionali e abachi.

5.2.1 Operazioni preliminari

Collegamento delle nuvole di punti: Per il modello del caso studio è stata seguita una logica Cloud-to-BIM, ovvero il dato di rilievo, sotto forma di nuvola di punti, è stato il riferimento principale della modellazione geometrica e metrica.
Ciò ha comportato la preventiva lavorazione del dato puntiforme per essere adeguatamente letto all'interno della piattaforma di modellazione prescelta. In *Metashape* sono state elaborate le acquisizioni fotogrammetriche di alcuni elementi puntuali mentre in *Faro Scene* sono state processate le nuvole di punti d'insieme, acquisite con laser scanner. Queste ultime sono state raggruppate secondo gli ambienti di scansione e ognuno dei gruppi è stato esportato nel formato dati *.rcp* in *ReCap*, applicativo della *Autodesk*.
In *ReCap* è stato possibile leggere in differenti *layer* le diverse posizioni di scansione costituenti il singolo gruppo, con il vantaggio di accenderle o spegnerle all'occorrenza. Inoltre, in *ReCap* è stato possibile creare delle *regioni* di nuvola, ovvero spostare porzioni di punti – come gli arredi – in

un sottogruppo per poterne avere una gestione indipendente e non appesantire il dato architettonico durante la modellazione. Il salvataggio delle nuvole è avvenuto nel formato proprietario *.rcp*, direttamente collegabile all'interno dello spazio di progetto di *Autodesk Revit*. Le specifiche funzionalità del software *Revit* hanno consentito di gestire le nuvole sia rispetto al gruppo, sia rispetto alle singole scansioni, manipolandole per lo più in termini di posizione e visualizzazione, ovvero spostando/ruotando, collegando/scollegando, caricando/scaricando, spegnendo/accendendo il dato puntiforme[125].

In particolare, collegando le nuvole per gruppi è stato possibile caricare, nel corso della modellazione, solo gli ambienti ritenuti necessari, alleggerendo le risorse *hardware* necessarie alla manipolazione del file. In fase di collegamento, si è scelto di mantenere l'orientamento originale della nuvola cosicché il modello puntiforme fosse correttamente disposto nello spazio digitale. Ciononostante, per favorire le operazioni di modellazione, si è scelto di lavorare con un *nord di progetto* differente dal *nord reale*,

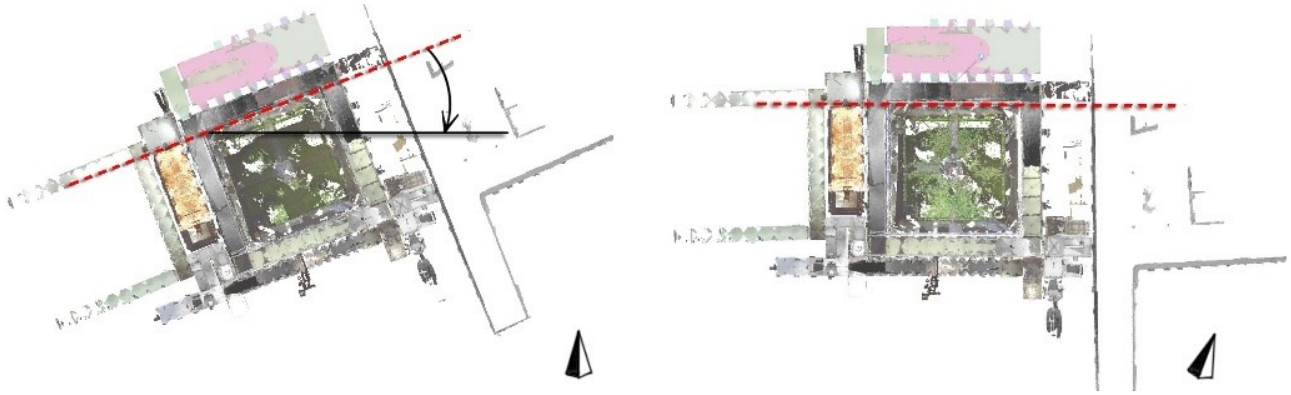


Fig. 67 – Trasformazione della vista in pianta da *nord reale* a *nord di progetto*.

Elaborazione S. Scandurra.

[125] C'è una differenza sostanziale tra collega/scollega, carica/scarica e accendi/spegni: collegare una nuvola significa importarla all'interno del progetto *Revit*, singolarmente o in gruppo; scaricare una nuvola in *Revit* significa rimuovere temporaneamente il gruppo di nuvole collegato, alleggerendo l'intero file di progetto, ma senza perderne il percorso affinché possa essere in qualunque momento ricaricata; accendere o spegnere una nuvola significa operare sulla sola visibilità grafica del dato all'interno della specifica vista di progetto attiva e scegliendo di operare sull'intero gruppo o sulla singola posizione di scansione appartenente al gruppo.

Fig. 68 – Nuvola dell'Archivio con individuazione dei livelli in una vista di sezione del progetto Revit.

Elaborazione S. Scandurra.

disponendo come riferimento orizzontale nelle viste in pianta la parete nord-ovest dell'Atrio dei Marmi (Fig. 67), così da poter più volte sfruttare le direzioni principali nel posizionamento degli oggetti digitali. L'operazione consiste in un'apparente rotazione della nuvola nelle viste in pianta, poiché in realtà conserva l'informazione del *nord reale* cambiando solo il punto di vista dell'operatore, con la possibilità di sostituire in qualunque momento l'impostazione per fornire viste e dati nell'orientamento opportuno.

Individuazione dei riferimenti di base e organizzazione del *browser di progetto*: Trattandosi di un processo Cloud-to-BIM, i livelli di riferimento, ovvero i piani orizzontali rispetto ai quali posizionare i diversi elementi del modello, sono stati scelti sulla base della nuvola di punti. Nello specifico caso, si è scelto di impostare i livelli rispetto ai piani di calpestio riconosciuti in una vista di sezione della nuvola in corrispondenza della scala di accesso (Fig. 68), disegnandoli direttamente con lo *snap* ai punti

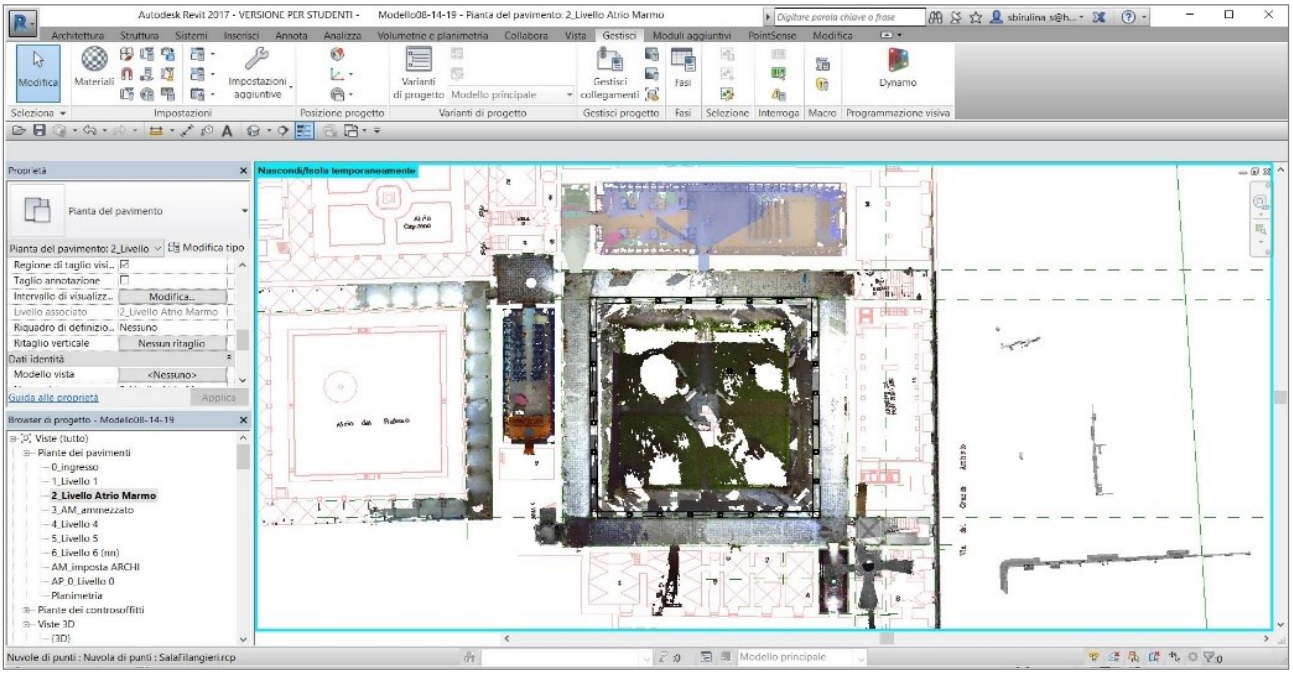


Fig. 69 – Inserimento degli elaborati CAD (in rosso) come supporto per la modellazione e completamento delle aree non interessate dalla nuvola di punti.

Elaborazione S. Scandurra.

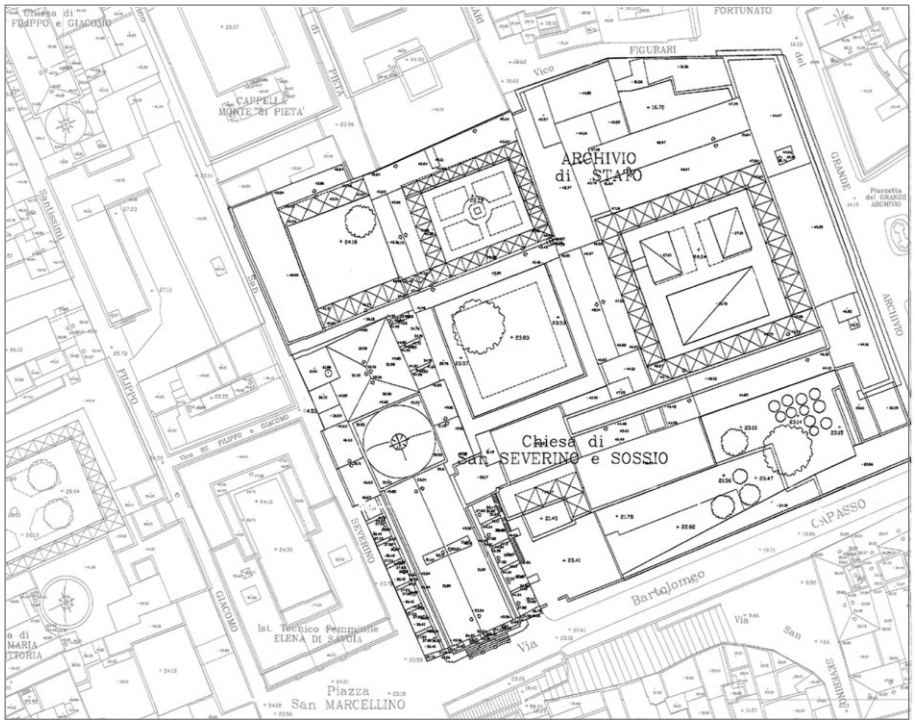
della nuvola stessa. Si è scelto poi di nominarli a partire dal piano terra dell'ingresso fino al sesto, considerando – per semplificare le operazioni di posizionamento degli oggetti del modello – il calpestio del piano dell'Atrio dei Marmi a quota 0,00 m. In questo modo si è esplicitata anche l'informazione relativa alle quote dei diversi piani del complesso rispetto al piano degli Atrii e contemporaneamente, nel *browser di progetto*, sono state create le viste di pianta relative ad ognuno dei livelli impostati.

Aggiunta dei dati CAD: I livelli sono stati importanti anche per l'importazione delle piante CAD e delle immagini. Queste infatti sono state disposte nelle *viste di livello* corrispondenti al piano della pianta stessa ed orientate in *ambiente di progetto* sulla base della nuvola di punti, ovvero utilizzando come riferimento gli ambienti comuni. Considerando che l'aggiunta del dato CAD può avvenire in *Revit* secondo modalità diverse, si è scelto di lavorare attraverso collegamenti poiché, rispetto alle importazioni, hanno consentito una più agevole gestione

Fig. 70 – Insula dell'Archivio di Stato nella Carta dei tetti, 1992, Soprintendenza di collegamento, Napoli.

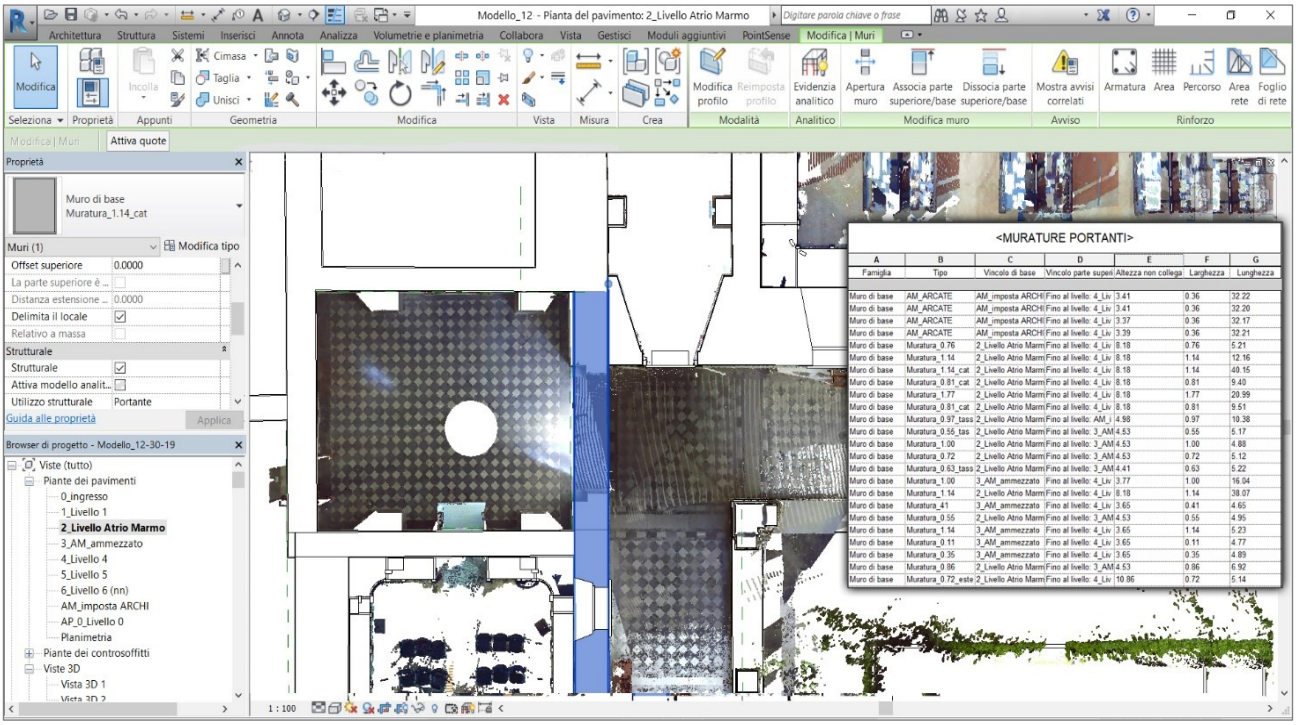
Fig. 71 – (pagina successiva) Inserimento dei muri in riferimento alla nuvola di punti.

Elaborazione S. Scandurra.



dell'obsolescenza[126]: la gestione dell'*intervallo di visualizzazione* della nuvola di punti ha evidenziato infatti alcune differenze non chiaramente percepite nella fase di lavoro relativa alla calibrazione del dato CAD sulla base delle ortofoto di nuvola precedentemente estrapolate. Il percorso di alcuni muri, ad esempio, è risultato irregolare nel proprio sviluppo, per cui è stato necessario effettuare diverse correzioni in corso d'opera sui file in ambiente *AutoCad*. Con il collegamento ci si è assicurati pertanto un aggiornamento automatico in tempo reale anche della loro visualizzazione in ambiente *Revit* (Fig. 69).

[126] In *Autodesk Revit* i file CAD possono essere importati o collegati Il collegamento di un file CAD in un modello di Revit è una sorta di link, ovvero si mantiene la connessione con il file originale, utilizzato in *Revit* come elemento di riferimento o incluso nella documentazione edilizia. L'importazione invece perde il collegamento al file originale, per cui qualunque modifica su di esso non costituisce un aggiornamento della documentazione in *Revit*.



5.2.2 Modellazione tridimensionale informativa

La realizzazione complessiva di un modello HBIM non si differenzia molto da un modello BIM. Ciò che varia in maniera sostanziale è il fatto di dover rappresentare qualcosa che di per sé parte da un momento intermedio della vita del manufatto.

Ben sappiamo che nonostante la fase dell'acquisizione dello stato di fatto, soprattutto dal punto di vista metrico e geometrico, riesce a clonare la realtà attraverso le tecnologie *reality based*, non esistono sistemi capaci di tradurre automaticamente ed in totale indipendenza tali dati in modelli HBIM. È per questo che, anche nella modellazione degli elementi di base come i muri e solai, non solo per le irregolarità geometriche, ma anche per l'enorme variabilità delle parti, è risultato prioritario stabilire sin dall'inizio il modo di operare, per la coerenza interna e la trasmissibilità del modello.

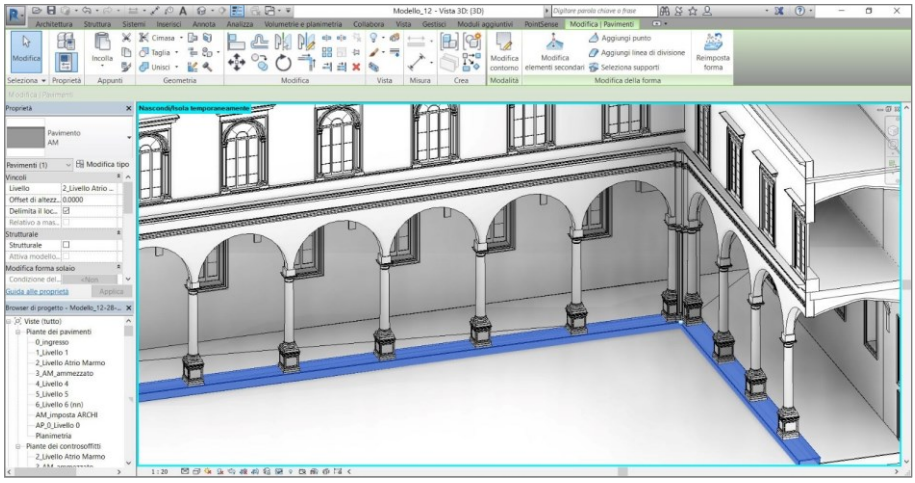


Fig. 72 – Modello HBIM in fase di elaborazione: dettaglio del gradino che circoscrive l'Atrio dei Marmi.

Elaborazione S. Scandurra.

Strutturazione delle componenti d'insieme: Nella modellazione dell'Archivio di Stato, si è scelto di approfondire con una *modellazione per oggetti* l'area dell'Atrio dei Marmi. La strutturazione delle componenti di insieme si è soffermata sulla traduzione in oggetti BIM di muri, solai e scale.

Per la modellazione dei *muri* è stata operata preliminarmente una lettura attenta della nuvola di punti importata (Fig. 71), al fine di distinguere le tipologie di muri acquisiti in base alle caratteristiche dimensionali e materiche. Tale operazione ha reso nota la presenza di lievi irregolarità nello sviluppo orizzontale e verticale delle murature, in ogni caso ritenute irrilevanti per la definizione del corrispondente elemento digitale. Inoltre, laddove le differenze tra muri di stessa tipologia[127] consistevano in pochi centimetri[128], si è scelto di accorparne le variazioni all'interno di precisi intervalli, generalizzando l'elemento e assimilandolo a un'unica categoria di oggetto digitale, affinché potesse essere più immediata l'interrogazione

[127] Gli ambienti sui quali si è scelto di sperimentare la modellazione, sono costituiti per lo più da murature in tufo intonacate, talvolta affrescate, e murature in laterizio intonacate in corrispondenza di tramezzature di epoca più recente.

[128] Il range è stato considerato da 1 a 5 cm.

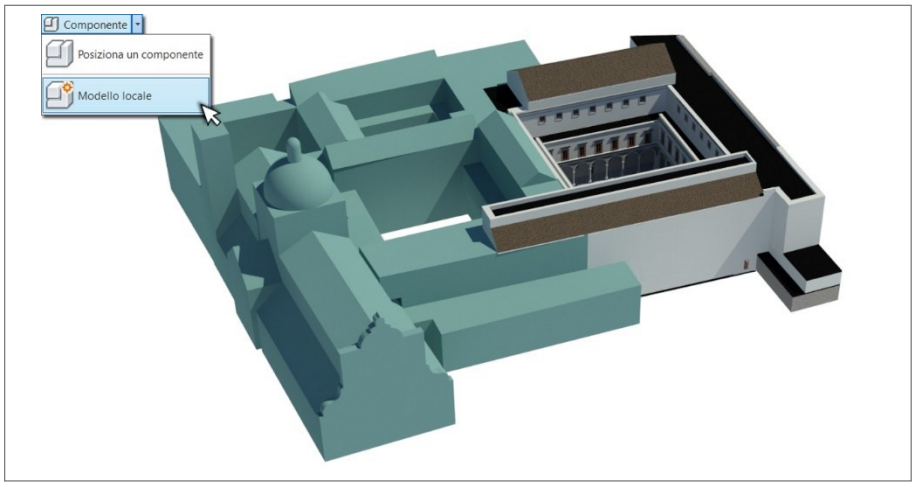


Fig. 73 – Modello HBIM in fase di elaborazione: l'area verde è modellata con volumi semplici, privi di dettaglio, esclusivamente indicativi degli ingombri.

Elaborazione S. Scandurra.

tramite abacatura. Ciò è stato valutato anche sulla base della conoscenza del manufatto che, in ogni caso, non ha consentito un livello informativo tale da poter aspirare ad una riproduzione *as-built* in scala 1:1.

Operativamente, sono state sfruttate le *famiglie di sistema*[129] e, per il posizionamento dei muri il più possibile in aderenza con il dato della nuvola, si è scelto di utilizzare il *plugin PointSense* della *Faro* che ha aggiunto in *Revit* funzioni specifiche per il lavoro sulle nuvole di punti. Inoltre, rispetto alle murature, *Point Sense* ha consentito di sfruttare una sorta di dettaglio ortografico della nuvola in pianta affinché potesse essere più immediata l'individuazione dello spessore delle murature oltre che l'estensione planimetrica del singolo *tipo* individuato. In altri casi, ci si è serviti dello *snap* ai punti della nuvola e ai collegamenti CAD per misurarne con accuratezza le dimensioni e posizionarne in aderenza gli oggetti BIM. L'inserimento dei *muri* è avvenuto con il supporto delle viste di pianta, più affini alle rappresentazioni tradizionali, per quanto gli oggetti inseriti fossero tridimensionali. Per il dato dimensionale relativo alle altezze, si è

[129] Si ricorda che in Revit le *famiglie di sistema* consentono di modellare muri, pavimenti, tetti e scale.

Fig. 74 – Sovrapposizione nuvola e modello in stile visualizzazione *nascosto*.

Elaborazione S. Scandurra.

scelto di ancorare la base dei muri ai *livelli* di inserimento e la sommità ai *livelli* superiori, verificandone puntualmente la conformità al reale.

In questa fase, oltre agli oggetti *muro*, sono stati modellati gli oggetti *pavimento* relativi ai solai piani, anch'essi disegnati in pianta, definendone i contorni in corrispondenza dei muri e agganciandosi ai livelli prescelti, facendo attenzione a far aderire le superfici alla nuvola di punti. In alcuni casi, come per il corridoio che caratterizza l'Atrio dei Marmi, è stato necessario operare puntualmente con valori di *offset* rispetto ai livelli.

Oltre alle aree a giardino e a quelle esterne, i solai piani degli ambienti esaminati sono risultati essere ad intonaco nella parte intradossale e in cotto o marmo nella parte estradossale.

Si è scelto di far rientrare nella categoria *pavimenti* anche il gradino che circoscrive l'Atrio dei Marmi al di sotto delle basi delle colonne, operando con l'aggiunta di *bordi solaio* opportunamente sagomati per rappresentarne al contempo le fattezze originali in piperno e le lastre marmoree di rivestimento (Fig. 32, Fig. 72).

In un successivo capitolo della ricerca si è approfondito il caso dei solai voltati, poiché è stato necessario individuare soluzioni puntuali dal

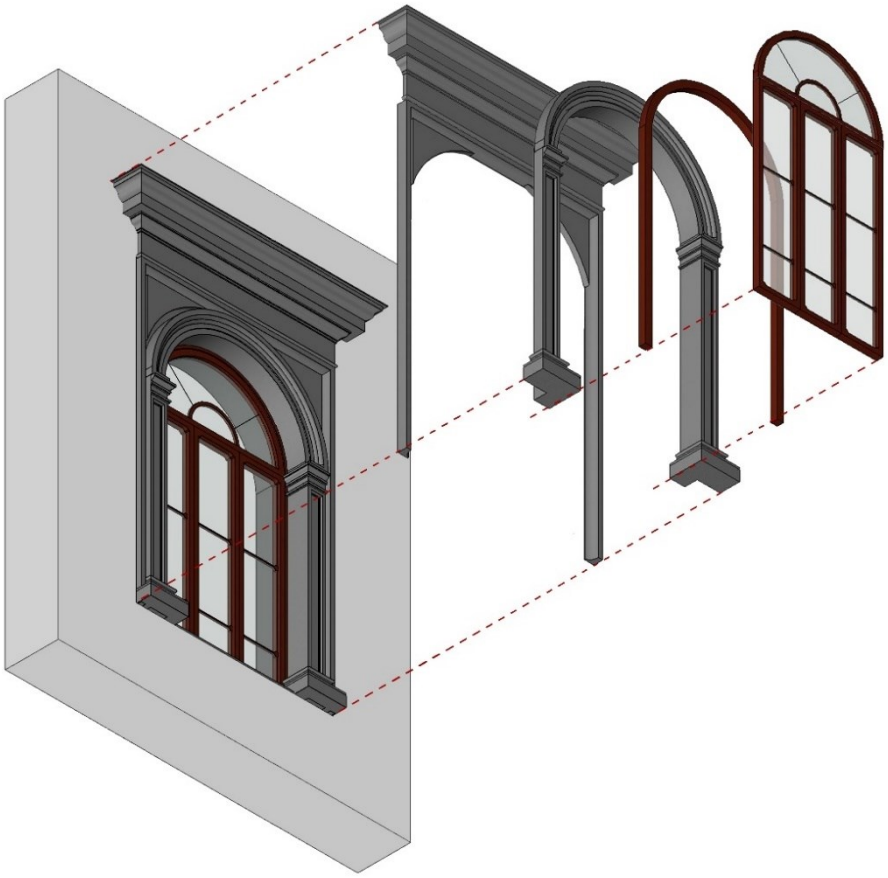


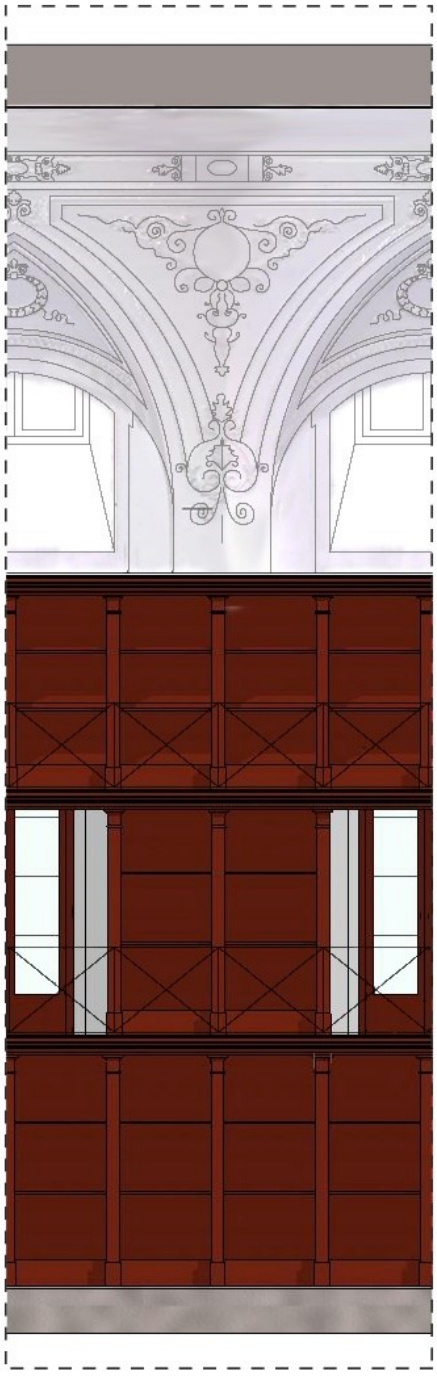
Fig. 75 – Ricomposizione in *famiglia nidificata* delle parti modellate per una delle finestre dell'Atrio dei Marmi.

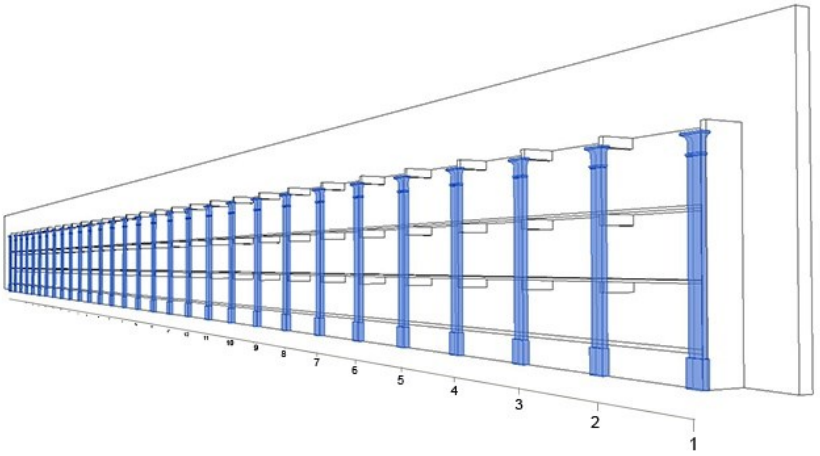
Elaborazione S. Scandurra.

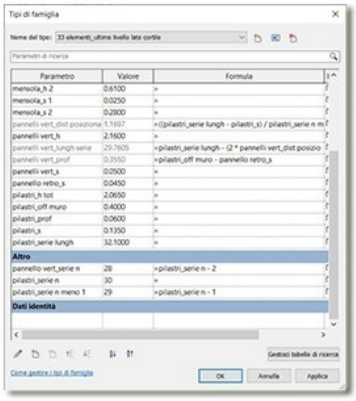
momento che tali elementi non sono presenti nelle categorie di *famiglie* standard.

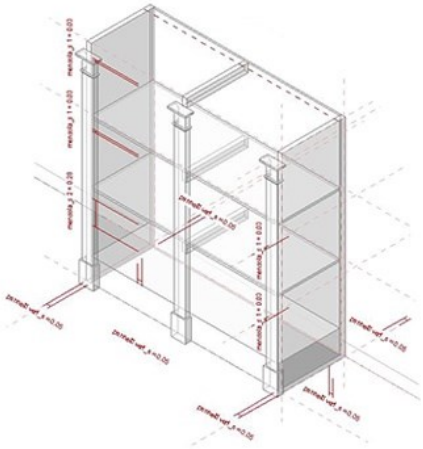
Per quanto riguarda le coperture, sono state acquisite con scansione laser quelle relative ai terrazzamenti che affacciano al quinto piano dell'Atrio dei Marmi per le quali si è potuto procedere similmente ai *pavimenti*. Per le terrazze superiori e i tetti a falda, invece, si è scelto di riferirsi alla documentazione grafica di archivio e alle tavole grafiche (Fig. 70) indicanti le quote dei tetti della città di Napoli.

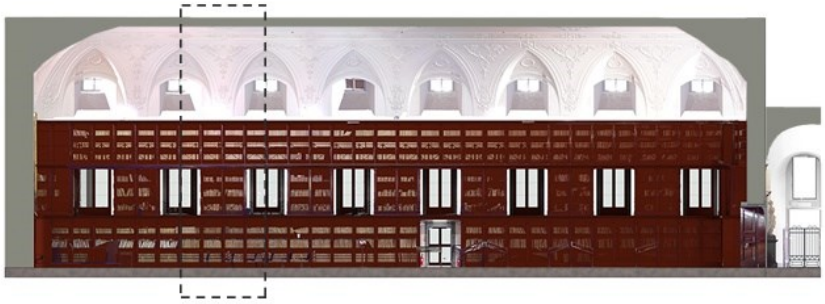
In riferimento alla nuvola sono state disegnate le scale rifacendosi ai bordi esterni delle singole pedate nelle viste di pianta, a partire dalla quota di

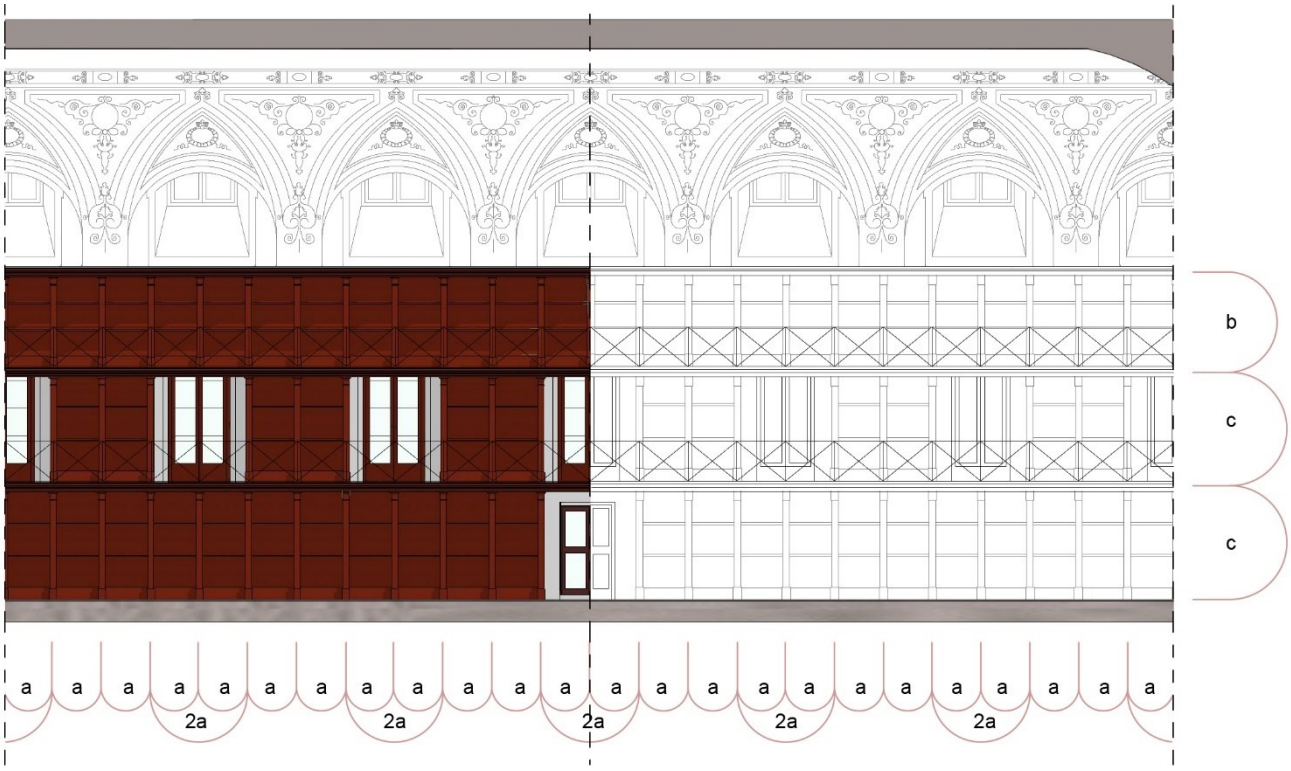



11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1


Tipi di famiglia
Nome del tipo: 33 elementi_ultimo livello lato cortile
Parametri di ricerca
Parametro | Valore | Formula
mensola_h 2 | 0.6700 | =
mensola_s 1 | 0.0250 | =
mensola_s 2 | 0.2800 | =
pannelli vert_dist posiziona | 1.1697 | =((pilastri_serie lungh - pilastri_s) / pilastri_serie n m
pannelli vert_h | 2.1600 | =
pannelli vert_lungh serie | 29.7605 | =pilastri_serie lungh - (2 * pannelli vert_dist posizio
pannelli vert_prof | 0.3550 | =pilastri_off muro - pannello retro_s
pannelli vert_s | 0.0500 | =
pannello retro_s | 0.0450 | =
pilastri_h tot | 2.0650 | =
pilastri_off muro | 0.4000 | =
pilastri_prof | 0.0600 | =
pilastri_s | 0.1350 | =
pilastri_serie lungh | 32.1000 | =
Altro
pannello vert_serie n | 28 | =pilastri_serie n - 2
pilastri_serie n | 30 | =
pilastri_serie n meno 1 | 29 | =pilastri_serie n - 1
Dati identità
Gestisci tabelle di ricerca
Come gestire i tipi di famiglie
OK
Annulla
Applica







ingresso in via del Grande Archivio, fino all'ultimo piano della porzione di complesso analizzata, ancorando la quota di inizio e fine rampa alla quota dei livelli preimpostati e facendo aderire i pianerottoli intermedi al dato di rilievo.

Tutte le *famiglie di sistema*, così come previsto dalla piattaforma BIM, sono state relazionate e vincolate tra loro costituendone legami di aderenza, continuità e congruenza.

Per fornire un risultato che tenesse conto del rapporto dell'Atrio dei Marmi con la restante parte del complesso, si è scelto di modellare, con l'ausilio di volumi semplici, la conformazione dell'intero complesso, con un livello di dettaglio notevolmente più basso (Fig. 73). Per riferirci alla normativa italiana, tale scelta ricade infatti nel LOD di tipo A (*oggetto simbolico*).

Fig. 76 – (pagina precedente) Dettaglio della scaffalatura della Sala Filangieri, sviluppo in serie degli oggetti digitali, vincoli e parametri assegnati alle parti e sovrapposizioni della nuvola per la verifica delle dimensioni.

Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 77 – Scaffalatura della Sala Filangieri: individuazione dei moduli utilizzati per la realizzazione del modello.

Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 78 – Modello delle scaffalature della Sala Catasti.

Elaborazione S. Scandurra.

Strutturazione delle componenti di dettaglio: Data l'unicità e la particolarità, per le componenti di dettaglio che configurano l'Archivio di Stato, non potendo riscontrare similitudini con gli oggetti delle librerie esistenti, si è proceduto con la modellazione *ex novo*, discretizzando ogni elemento reale nelle sue parti costitutive. In particolare, sono stati analizzati elementi quali le finestre, i vani di passaggio, alcuni arredi fissi e i profili modanati presenti in facciata.

Per la scomposizione di ognuno di essi si è tenuto conto della specifica logica aggregativa e, al contempo, delle relazioni esistenti tra le singole parti, individuandone i comportamenti reciproci.

Per quanto riguarda le finestre, ognuna delle tipologie individuate è stata scomposta in parti (davanzale, telaio mobile con vetro, telaio fisso, cornice e sovracornice) modellando i singoli profili e ricomponendo il tutto all'interno di *famiglie* significative, utilizzando la *nidificazione* delle componenti (Fig. 75). Tale soluzione si è mostrata particolarmente appropriata in quanto, da un lato, ha consentito di rappresentare i singoli dettagli in cui si articola ogni parte e,

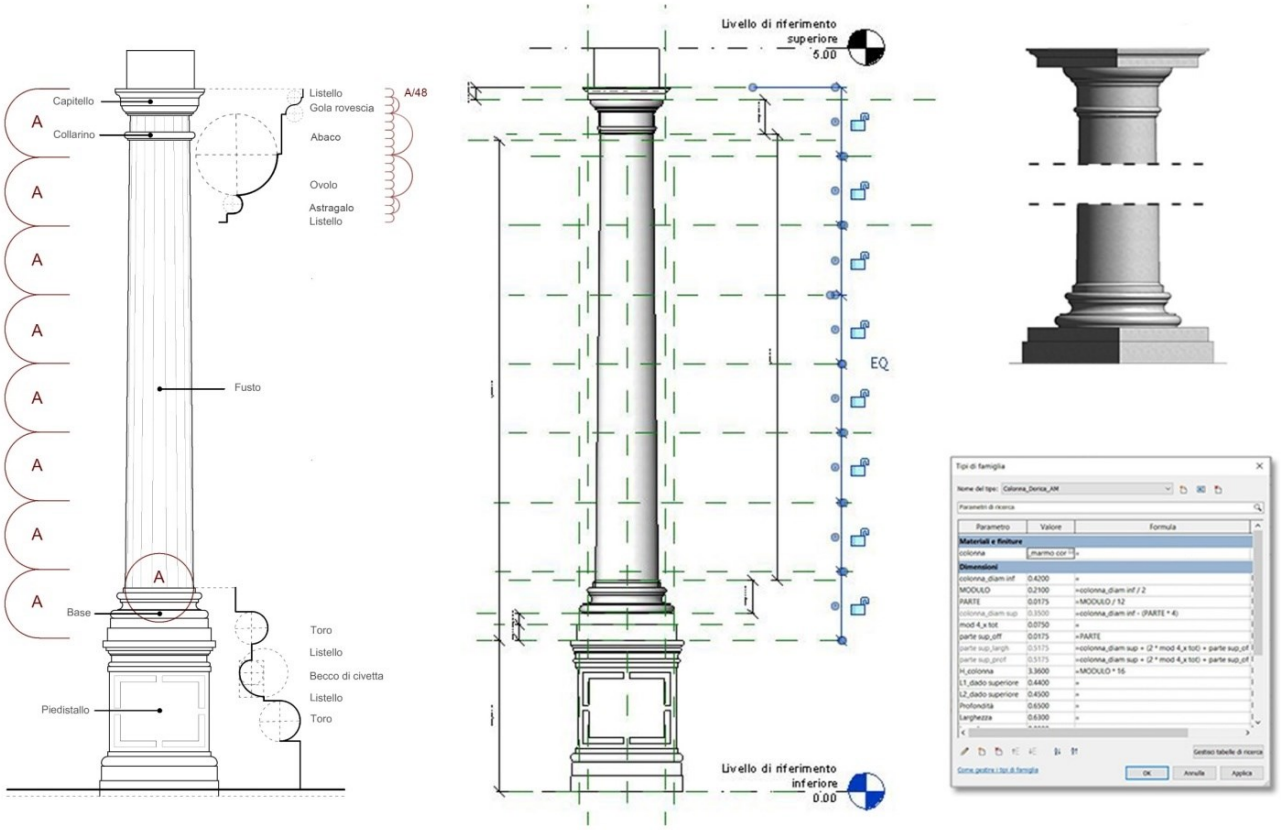


Fig. 79 – Studio e modellazione delle colonne dell'Atrio dei Marmi.

Elaborazione S. Scandurra.

dall'altro, ha permesso di ricomporre il tutto in un elemento dotato di significato nella sintassi complessiva. Inoltre, considerando che si è trattato di una modellazione parametrica, l'approccio adottato è stato facilmente declinabile per la realizzazione di oggetti digitali analoghi, seppur con dimensioni differenti, e la scomposizione in parti ha consentito di riproporre l'insieme secondo combinazioni diverse, con la possibilità dunque di non perdere di vista il dettaglio, sebbene all'interno di un sistema generalizzato e riscontrabile anche in altri elementi del complesso. Ciò si è dimostrato utile soprattutto in riferimento alle ante dei telai mobili, ai profili di cornice e ai profili di sovracornice, comuni nella caratterizzazione di più elementi finestrati e di alcuni vani di passaggio, velocizzando le operazioni di modellazione e di abacatura.

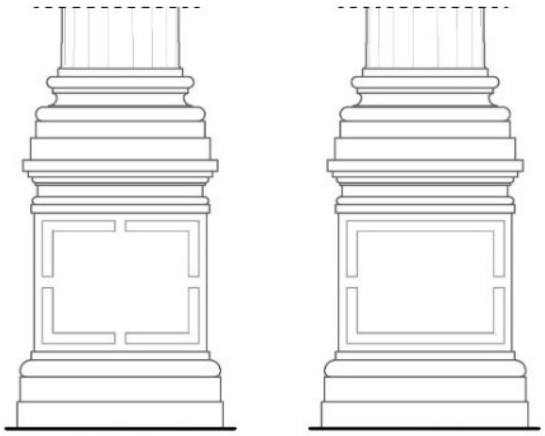


Fig. 80 – Dettaglio dei piedistalli delle colonne dell'Atrio dei Marmi.

Elaborazione S. Scandurra.

In altre parole, la schematizzazione logica utile alla disgregazione e alla parametrizzazione è stata necessaria affinché ogni parte potesse acquisire un proprio significato, creandone di nuovi nella successiva combinazione nidificata.

Questa soluzione è stata riproposta per tutti gli elementi individuati, con la differenza che per i profili di cornici e cornicioni si è lavorato sul piano bidimensionale riproponendo le costruzioni geometriche delle diverse modanature di cui si compongono.

La parametrizzazione e la modularità sono stati criteri particolarmente efficaci nel caso degli arredi fissi e del colonnato che caratterizza l'Atrio dei Marmi.

In tal modo, per la scaffalatura lignea della Sala Filangieri (Fig. 76; Fig. 77), si sono riproposti i rapporti modulari e lo sviluppo in serie che ne hanno caratterizzato l'originaria progettazione. Come per le finestre, anche in questo caso si è partiti dalla modellazione delle singole parti per poi progettarne la *serialità* e la *nidificazione* al fine di conformare lo *smart object* finale. Nello specifico, la scomposizione ne ha preso in considerazione le diverse parti (profili del pilastro, pilastro, mensola e reggimensola), successivamente *nidificando* il tutto in una *famiglia* subordinata ad un'ulteriore *famiglia host*. In questo caso, si scelto infatti di far dipendere l'oggetto scaffalatura dall'oggetto *muro* mediante la parete di fondo, in

Fig. 81 – Modellazione delle finestre secondo più gradienti di dettaglio.

Elaborazione S. Scandurra.

analogia a ciò che avviene nella realtà per la specifica tipologia di elemento. I tre moduli verticali sono stati vincolati ai camminamenti di accesso alle scaffalature superiori, realizzati con oggetti *solaio* in legno e rifiniti con appositi profili modanati. La modularità e la parametrizzazione geometrica delle diverse parti dell'oggetto digitale, oltre che i vincoli tra esse e con gli elementi in adiacenza, sono stati progettati affinché la composizione complessiva si adattasse facilmente alle dimensioni della sala e alle variazioni dimensionali presenti tra i tre piani di sviluppo in verticale, oltre che nell'ottica di sveltire la modellazione, fermo restando la continua verifica di rispondenza con il reale.

Dopo un preliminare confronto delle similitudini e delle variazioni, la scaffalatura così modellata è stata facilmente riutilizzabile e adattabile nella riproduzione della scaffalatura presente invece nella Sala Catasti (Fig. 78). Le colonne dell'Atrio dei Marmi invece, sono state scomposte in accordo con le formulazioni teoriche del trattato del Vignola[130] e differenziate rispetto alle diverse parti (Fig. 79). Studiandone le proporzioni e i dettagli con il supporto di un'ortofoto della nuvola, si è confermata l'ipotesi della

[130] *Regola delli cinque ordini d'architettura,* J. B. Vignola, Roma, 1562.

Fig. 82 – Porzione di modello HBIM: prospetto interno all'Atrio dei Marmi con dettaglio basso (sinistra) ed alto (destra).

Elaborazione S. Scandurra.

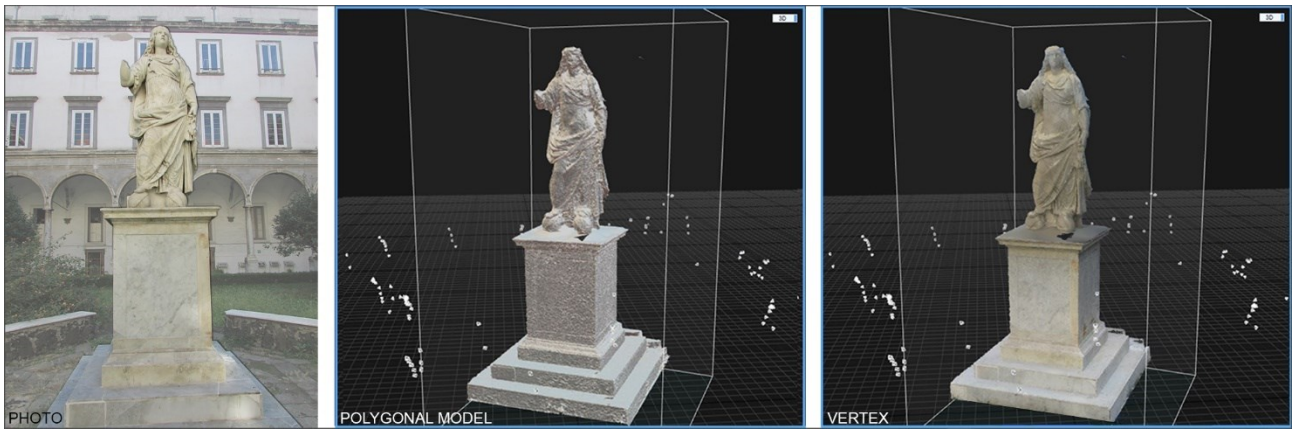


Fig. 83 – Elaborazione del modello puntiforme della Statua della Teologia al centro del giardino dell'Atrio dei Marmi, col supporto del software *Reality Capture*.

Elaborazione S. Scandurra.

Mazzoleni[131] secondo cui il capitello e le dimensioni complessive della colonna corrispondono al proporzionamento dell'ordine dorico, contrariamente a quanto indicato da altri studiosi[132] in riferimento all'ordine tuscanico.

Riproponendo nella modellazione le proporzioni tra le parti previste dall'ordine dorico, si è assegnata una precisa identità all'oggetto digitale tenendo però conto delle eccezioni riscontrate nelle proporzioni e nei profili della base della colonna e del piedistallo, scegliendo di parametrizzare tali parti con *parametri di istanza* utili a rendere il modello adattabile al dato *point cloud*[133].

131 *"Le colonne, in marmo bianco di Carrara come il pavimento, poggiano con la base su di un dado pure di marmo che reca delle modanature. La base vera e propria di ogni colonna è costituita da due tori separati da una gola. Il capitello è simile ad un capitello dorico con l'aggiunta di un collarino e di una decorazione di fiori scolpiti",* MAZZOLENI, 1964.

132 *"(…) tra il 1598 e il 1623 viene eseguito il chiostro di Marmo, l'ultimo dei quattro, scandito da colonne tuscaniche in marmo di Carrara."* A. Gambardella in ROSANOVA, 1999.

133 Secondo J. B. da Vignola le proporzioni che compongono un ordine architettonico dipendono tutte da un modulo corrispondente al raggio di base del fusto della colonna. Secondo questa logica, la colonna di ordine dorico, comprensiva di base e capitello, è composta da 16 moduli (equivalenti ad 8 diametri di base del fusto). Il solo capitello è invece composto da 8 parti (una parte equivale ad 1/12 del modulo), divise in ½ parte

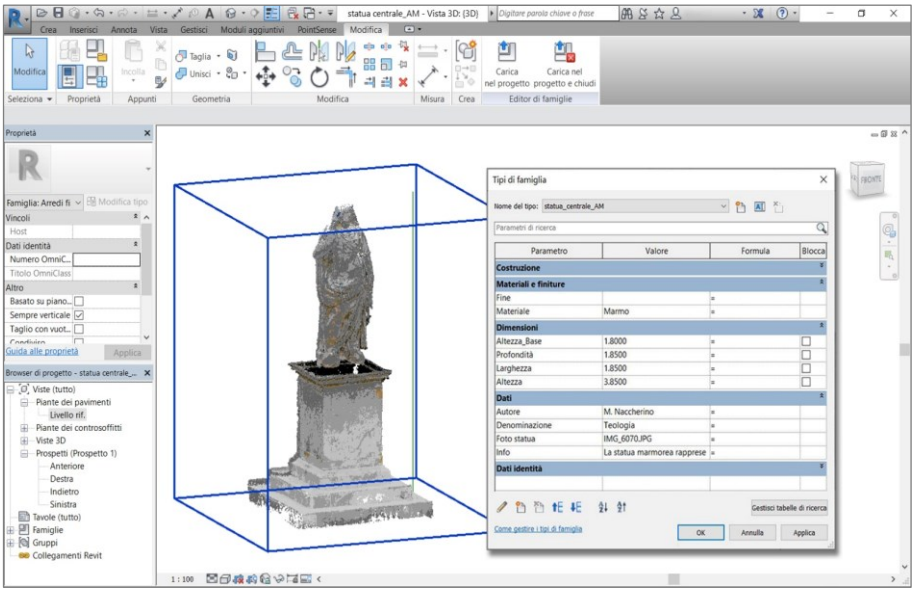


Fig. 84 – Aggiunta di parametri informativi alla Statua della Teologia trasformata in *famiglia* e categorizzata come *arredo fisso*. Elaborazione S. Scandurra.

Al contempo si è lavorato sulla visualizzazione individuando gradienti di dettaglio diversi per consentire un'estrazione dei dati sottoforma di immagine appropriata alla scala di indagine richiesta. Oltre alla modellazione sopra descritta, è stato necessario modellare più volte su sé stesse ognuna delle parti degli elementi individuati, a partire da un gradiente alto di dettaglio geometrico, fino a quello più semplificato, calibrato in base al tipo di *output* potenzialmente richiesto dallo studio (Fig. 81; Fig. 82).

Nello specifico, l'operazione si è concretizzata abbinando alla modellazione *high detail* – dalle intrinseche difficoltà legate alla riproduzione delle forme reali –, una modellazione *low detail*, pensata affinché la semplificazione delle sagome e delle rifiniture consentisse di

per il listello, 1 parte per la gola rovescia, 2 parti e ½ per l'abaco, 2 parti e ½ per l'ovolo, 1 parte per l'astragalo e ½ parte per il listello. La base invece è composta da 12 parti, divise in imoscapo (1 parte), cordoncino (1 parte), toro (4 parti) e plinto (6 parti). Il piedistallo invece, è alto 1/3 della colonna.
Confrontando le colonne dell'Atrio dei Marmi con i moduli del Vignola, si sono evidenziate delle differenze nella composizione del piedistallo e della base di colonna.

Fig. 85 – Inserimento della statua della Teologia nel modello complessivo in stile visualizzazione *realistico*.

Elaborazione S. Scandurra.

distinguere ugualmente le specifiche morfologiche dell'elemento rilevato (finestra con cornice, finestra con cornice e sopracornice, etc.).

5.2.3 Implementazione ed estrazione dei dati

Il modello dell'Atrio dei Marmi è stato implementato con una serie di oggetti digitali non modellati come HBOM – *Heritage Building Object Modeling* –, ma resi ugualmente tali, al fine di completarne l'informazione. È questo il caso degli elementi scultorei, per i quali si è ritenuto esaustivo il dato acquisito attraverso il rilievo *image based* mentre la ri-modellazione sarebbe risultata eccessivamente onerosa in termini di dispendio temporale e tale da produrre un modello derivato di nessun ulteriore vantaggio in termini informativi.

In questo caso l'importazione delle nuvole non è avvenuta quale riferimento per la modellazione, ma in quanto dato in sé, da catalogare nelle librerie degli oggetti digitali che compongono il modello. Di *default* i software BIM non prevedono tale funzione e non consentono di classificare dal punto di vista semantico le porzioni di nuvola. Per poter percorrere tale soluzione, si è allora scelto di adattare alcune funzionalità

Fig. 86 – Inserimento della statua del Cristo nel modello complessivo.

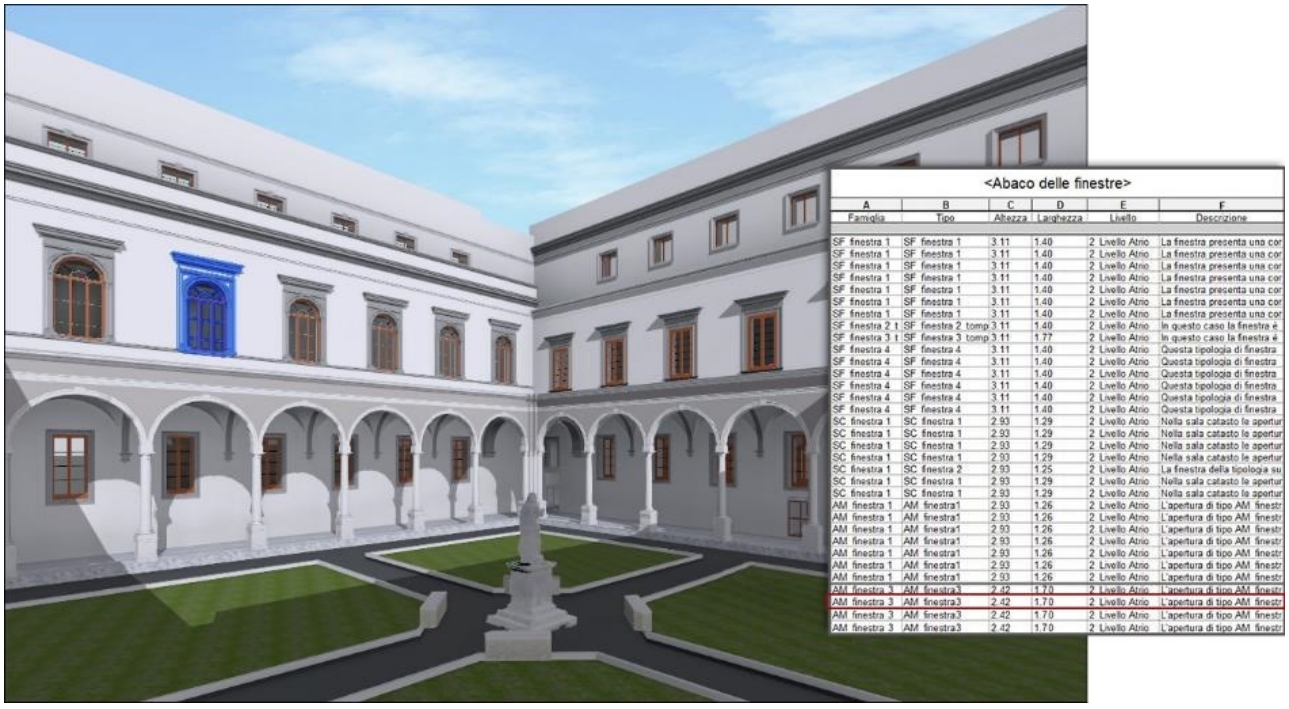
Elaborazione S. Scandurra.

del già citato *plugin PointSense*, originariamente pensato per importare porzioni di nuvola di punti *.pts* in ambiente di famiglia per essere utilizzate come impalcatura per la definizione di HBOM.

Nel caso specifico invece, si è scelto di importare la porzione di nuvola, di vincolarla, laddove necessario, a specifici oggetti *host* (*muri*, *solai*, o *superfici* a seconda dei casi) e di categorizzarla direttamente come *smart object*. Si è infatti implementato il dato puntiforme agganciandovi i parametri inerenti le dimensioni principali, il materiale, l'autore, l'epoca, la denominazione, la descrizione e un'immagine fotografica dell'opera. È questo il caso della statua marmorea rappresentante la Teologia[134] posta al centro del giardino dell'Atrio dei Marmi (Fig. 83; Fig. 84; Fig. 85) e della scultura del Cristo[135] posta all'imbocco della scala in piperno (Fig. 86).

[134] La statua della Teologia è opera dello scultore marmoraro Michelangelo Naccherino da Firenze (n.1550 – m.1622).

[135] La statua è una copia del Cristo scolpito da Michelangelo Naccherino.



<Abaco delle finestre>

A	B	C	D	E	F
Famiglia	Tipo	Altezza	Larghezza	Livello	Descrizione
SF_finestra 1	SF_finestra 1	3.11	1.40	2 Livello Atrio	La finestra presenta una cor
SF_finestra 1	SF_finestra 1	3.11	1.40	2 Livello Atrio	La finestra presenta una cor
SF_finestra 1	SF_finestra 1	3.11	1.40	2 Livello Atrio	La finestra presenta una cor
SF_finestra 1	SF_finestra 1	3.11	1.40	2 Livello Atrio	La finestra presenta una cor
SF_finestra 1	SF_finestra 1	3.11	1.40	2 Livello Atrio	La finestra presenta una cor
SF_finestra 1	SF_finestra 1	3.11	1.40	2 Livello Atrio	La finestra presenta una cor
SF_finestra 1	SF_finestra 1	3.11	1.40	2 Livello Atrio	La finestra presenta una cor
SF_finestra 2 t	SF_finestra 2_tomp	3.11	1.40	2 Livello Atrio	In questo caso la finestra è
SF_finestra 3 t	SF_finestra 3_tomp	3.11	1.77	2 Livello Atrio	In questo caso la finestra è
SF_finestra 4	SF_finestra 4	3.11	1.40	2 Livello Atrio	Questa tipologia di finestra
SF_finestra 4	SF_finestra 4	3.11	1.40	2 Livello Atrio	Questa tipologia di finestra
SF_finestra 4	SF_finestra 4	3.11	1.40	2 Livello Atrio	Questa tipologia di finestra
SF_finestra 4	SF_finestra 4	3.11	1.40	2 Livello Atrio	Questa tipologia di finestra
SF_finestra 4	SF_finestra 4	3.11	1.40	2 Livello Atrio	Questa tipologia di finestra
SF_finestra 4	SF_finestra 4	3.11	1.40	2 Livello Atrio	Questa tipologia di finestra
SC_finestra 1	SC_finestra 1	2.93	1.29	2 Livello Atrio	Nella sala catasto le apertur
SC_finestra 1	SC_finestra 1	2.93	1.29	2 Livello Atrio	Nella sala catasto le apertur
SC_finestra 1	SC_finestra 1	2.93	1.29	2 Livello Atrio	Nella sala catasto le apertur
SC_finestra 1	SC_finestra 1	2.93	1.29	2 Livello Atrio	Nella sala catasto le apertur
SC_finestra 1	SC_finestra 2	2.93	1.25	2 Livello Atrio	La finestra della tipologia su
SC_finestra 1	SC_finestra 1	2.93	1.29	2 Livello Atrio	Nella sala catasto le apertur
SC_finestra 1	SC_finestra 1	2.93	1.29	2 Livello Atrio	Nella sala catasto le apertur
AM_finestra 1	AM_finestra1	2.93	1.26	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr
AM_finestra 1	AM_finestra1	2.93	1.26	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr
AM_finestra 1	AM_finestra1	2.93	1.26	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr
AM_finestra 1	AM_finestra1	2.93	1.26	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr
AM_finestra 1	AM_finestra1	2.93	1.26	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr
AM_finestra 1	AM_finestra1	2.93	1.26	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr
AM_finestra 3	AM_finestra3	2.42	1.70	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr
AM_finestra 3	AM_finestra3	2.42	1.70	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr
AM_finestra 3	AM_finestra3	2.42	1.70	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr
AM_finestra 3	AM_finestra3	2.42	1.70	2 Livello Atrio	L'apertura di tipo AM_finestr

Fig. 87 – Atrio dei Marmi ed abaco delle finestre.

Elaborazione S. Scandurra.

Resa *famiglia* a tutti gli effetti e categorizzata come *arredo fisso*, l'oggetto è stato inserito all'interno del progetto complessivo[136].

Tutti quanti gli oggetti digitali realizzati per il modello del caso studio sono stati implementati con una serie di altre informazioni rispetto a quelle relative alle dimensioni e alla geometria.
In particolare, ognuno degli oggetti è stato dotato di un parametro relativo al materiale, riproposto graficamente nella *texture* di renderizzazione.
Laddove reperito, è stato aggiunto alle abacature, un parametro descrittivo della tecnica costruttiva, insieme al collegamento in *cloud* alla relativa fonte del dato. I *link* alla documentazione esterna sono stati utilizzati anche per allegare al progetto i grafici di rilievo e di progetto presenti negli archivi e

[136] Per completezza, si segnala che le famiglie composte esclusivamente da nuvole di punti, non sono visualizzate in viste renderizzate o in *raytrace* poiché non costituite da materiali riconosciuti dal software.

nella bibliografia consultata, oltre che le foto dell'elemento reale affinché l'informazione modellata potesse essere in qualunque momento confrontabile.
Per oggetti digitali quali porte e finestre si è registrato il posizionamento nel modello complessivo, ovvero il livello di appartenenza e l'ambiente ove sono collocati.
A partire dal modello si è scelto di estrarre viste bidimensionali analoghe alle rappresentazioni tradizionali ed abacature specifiche per ognuna delle categorie di elementi modellati.
Poiché gli oggetti elencati nelle abacature sono direttamente collegati alla relativa rappresentazione grafica, l'aggiunta di informazioni di tipo diverso sono state aggiornate automaticamente e in tempo reale nel modello (Fig. 87).

CAPITOLO SESTO

La modellazione HBIM per la rappresentazione del tempo

6.1 La *quarta dimensione*

Le indagini sulla storia dell'Archivio di Stato, integrate con lo studio delle fonti grafiche e cartografiche, hanno delineato gli attributi utili a descrivere le trasformazioni dell'edificio nel corso dei secoli, anche nell'ottica di comprenderne la conformazione attuale. Si è pertanto previsto di definire un modello di ricostruzione delle fasi storiche, trasponendo l'operazione in ambiente BIM, nell'ottica di volerne documentare la *quarta dimensione*[137] e cioè il tempo.
In BIM, la gestione della *quarta dimensione* è pensata come evoluzione digitale del tradizionale *diagramma di Gantt*[138], per documentare e

[137] La modellazione BIM è definita multidimensionale, poiché va oltre le tipiche rappresentazioni 2D e 3D, aggiungendovi dimensioni che afferiscono ad informazioni differenti. In particolare, la dimensione 4D fa riferimento al tempo, la 5D alle quantità ed ai costi, la 6D e la 7D interessano la sostenibilità ed il facility management, poiché includono gli aspetti sociali economici ed ambientali, la 8D riguarda invece le analisi preventive dei rischi, dal cantiere alla manutenzione.

[138] Nel 1917 l'ingegnere Henry Lowrence Gantt ideò il diagramma omonimo per agevolare le operazioni di gestione nel tempo in ogni ambito progettuale. Il diagramma si compone di due assi, uno verticale e l'altro orizzontale; sull'asse orizzontale sono stabiliti dei range temporali (ore, giorni, settimane, …), mentre sull'asse verticale sono disposte le attività da svolgere. Delle barre orizzontali in corrispondenza di ogni attività le collocano nel tempo, rendendone possibile la segnalazione di una successione cronologica o anche uno svolgimento in parallelo.

organizzare le fasi di costruzione durante il cantiere, la manutenzione nell'intero ciclo di vita del manufatto o le eventuali varianti al progetto, permettendo l'esportazione dei relativi dati in applicativi di *management*.
Nei processi HBIM, la *quarta dimensione* può riguardare allo stesso modo la documentazione, l'organizzazione e la gestione del manufatto dal momento del rilievo e nei tempi a seguire, ma anche e soprattutto può descrivere il processo a ritroso, esplicitando le trasformazioni avvenute nel corso dei secoli.
Uno degli obiettivi della ricerca è stato dunque quello di sperimentare le potenzialità del metodo HBIM non solo per la documentazione metrica e geometrica del patrimonio architettonico esistente, ma anche per la narrazione della *quarta dimensione* e delle fasi temporali che ne hanno caratterizzato la conformazione. Si ricorda a tal proposito che un modello BIM è un modello aperto ed è pertanto utilizzabile in vista di scopi diversi, senza perderne, né vincolarne le possibilità di utilizzo alle informazioni già assegnate.
È stato pertanto necessario calibrare il dato relativo al tempo rispetto al *livello di conoscenza* delle informazioni raccolte, dichiarandone l'accuratezza e l'affidabilità[139].
Dal punto di vista metodologico, è stato utile determinare una preliminare classificazione temporale. Considerando che ogni categorizzazione deve includere il maggior numero di variazioni, è stata definita un'ampia casistica, tale da poter determinare fattori di scala dell'informazione acquisita, associandovi specifiche modalità di graficizzazione per la definizione dello sviluppo nel tempo del manufatto.
Per l'applicazione al caso studio, è stato necessario stabilire delle regole nella personalizzazione del metodo, sia dal punto di vista grafico che concettuale, al fine di garantire un risultato coerente con il livello informativo, anche in vista della fruizione del dato. Graficamente infatti, con le dovute accortezze nella gestione degli automatismi offerti dai

[139] Per i concetti di affidabilità e trasparenza in BIM cfr. BIANCHINI & NICASTRO, 2018 e BRUSAPORCI, 2017b.

software, i modelli HBIM possono fornire risultati tali da permettere di evidenziare immediatamente l'appartenenza di ciascun elemento alla relativa epoca di realizzazione, fornendo viste tematiche di collocazione temporale capaci di rendere esplicita l'evoluzione storica di un manufatto nel suo insieme e nei diversi elementi che lo connotano.

6.1.1 Modalità di attribuzione del dato temporale secondo i livelli di conoscenza della specifica informazione

Soffermandosi nell'ambito della rappresentazione, è stata individuata una casistica delle modalità più comuni di attribuzione del dato relativo alle trasformazioni nel tempo dei manufatti del patrimonio storico, in termini di esplicitazione dell'informazione attraverso un modello grafico del manufatto e in funzione dei diversi livelli di conoscenza che più frequentemente si riescono a raggiungere per tale dato.
Procedendo dunque in analogia con le rappresentazioni tradizionali e tenendo conto del fatto che in ambito BIM il tempo è un parametro da associare alla modellazione, sono allora state individuate delle modalità di esplicitazione del dato tali da poter essere applicate in ambito HBIM.
Attraverso le casistiche più ricorrenti, sono state individuate quattro scale di dettaglio differente relativi all'attribuzione del parametro temporale alle porzioni del manufatto indagato, dipendenti dai livelli di conoscenza:

1. Attribuzione del dato temporale ai singoli elementi costituenti il manufatto secondo una logica di tipo *parametro-oggetto*;
2. Attribuzione del dato temporale ad intere porzioni del manufatto digitalizzato, secondo una logica di tipo *parametro-porzione di modello*;
3. Attribuzione del dato temporale all'intero manufatto digitalizzato, secondo una logica di tipo *parametro-intero modello*;
4. *Nessuna conoscenza di un dato temporale specifico*.

In particolare:
1. Attribuzione di tipo *parametro-oggetto*: la distanza temporale che separa un manufatto dalle fasi della sua costruzione iniziale non sempre consente il riconoscimento puntuale delle trasformazioni che le singole parti possono aver subito in un dato momento storico; solo quando tali informazioni

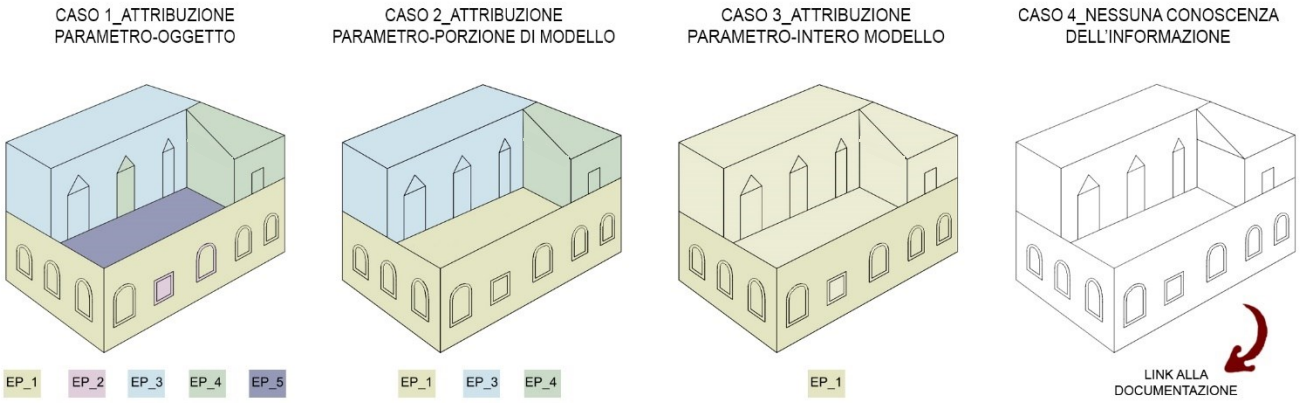
sono reperibili, l'assegnazione è possibile secondo un criterio di tipo *parametro-oggetto*.
2. Attribuzione di tipo *parametro-porzione di modello*: le informazioni sono tali da permettere l'individuazione di porzioni di manufatto realizzate in una specifica epoca, in una classificazione per macro-aree che non ha contezza di eventuali trasformazioni dei singoli elementi che vi appartengono;
3. Attribuzione di tipo *parametro-intero modello*: risulta individuata l'epoca di costruzione a cui risale il manufatto nel suo insieme;
4. *Nessuna conoscenza di un dato temporale specifico*: nei casi in cui non si ha alcun dato certo relativo all'epoca di costruzione, né sulle trasformazioni subite, si può solo accuratamente documentare lo stato di fatto al momento del rilievo, allegando eventuale documentazione sulle epoche in cui se ne testimonia la presenza o sulle ipotesi ricostruttive.
Le categorie indicate, intese quindi pari a differenti livelli di conoscenza dell'informazione temporale, suggeriscono la necessità di individuare diverse modalità di rappresentazione del dato in HBIM, valutando gli utilizzi degli strumenti disponibili nei software, nell'ottica di fornire una modellazione coerente con i requisiti richiesti dall'indagine.

6.1.2 Organizzare il tempo nelle piattaforme di modellazione BIM

Nel software *Autodesk Revit*, una specifica sezione è stata dedicata alla gestione della *quarta dimensione*. Analizzando la modalità con cui è stata progettata l'associazione del dato al modello, si può notare che non avviene secondo momenti cronologicamente successivi, ma attraverso un sistema qualitativo fatto di *fasi*, intese come configurazioni del manufatto in un determinato istante T. È noto che le *fasi* sono pensate nell'ambito del progetto per il nuovo, con la finalità di organizzare il modello secondo i tempi di cantierizzazione e di gestione. Ma è interessante il modo in cui il sistema consente di confrontare le variazioni tra due fasi successive[140]

[140] In Autodesk Revit ogni Fase è confrontabile con quella immediatamente successiva o precedente ma non con fasi non consecutive, poiché ogni stato del manufatto è inteso come somma/conseguenza degli stati precedenti.

LOGICA DI ATTRIBUZIONE DEL DATO (in base al livello di conoscenza)	DESCRIZIONE	MODALITA' DI ASSEGNAZIONE DELL'INFORMAZIONE AL MODELLO (software considerato: *Autodesk Revit*)
1 *parametro-oggetto*	Per ogni elemento del modello è chiara l'appartenenza ad una specifica epoca.	FILTRO DELLE FASI
2 *parametro-porzioni di modello*	Si conoscono le evoluzioni che il manufatto ha subito nel tempo per macro-aree.	FILTRI GRAFICI
3 *parametro-intero modello*	Si conosce l'informazione temporale relativa alla prima realizzazione del manufatto.	PARAMETRO DI PROGETTO
4 *nessuna conoscenza*	Non si hanno notizie precise relative alle evoluzioni temporali del manufatto.	LINK ALLA DOCUMENTAZIONE RACCOLTA



EP_*n* = Epoca *n*

Fig. 88 – A seconda del livello di conoscenza acquisito in riferimento al dato di evoluzione nel tempo, si è stabilita una specifica modalità di assegnazione dell'informazione sul modello grafico elaborato in *Autodesk Revit*.

Elaborazione S. Scandurra.

	Nome del filtro	Nuovo	Esistente	Demolito	Temporaneo
1	Comparativa	Sostituito	Per categoria	Sostituito	Non visualizzato
2	Mostra tutto	Per categoria	Sostituito	Sostituito	Sostituito
3	Stato di Fatto	Non visualizzato	Per categoria	Non visualizzato	Non visualizzato
4	Stato di Progetto	Per categoria	Per categoria	Non visualizzato	Non visualizzato
5	Nessuno	Per categoria	Per categoria	Per categoria	Per categoria

Fig. 89 – Filtri delle Fasi presenti di *default* in un *template di progetto Architettonico* di *Autodesk Revit* 2017 in versione italiana.

attraverso la *vista comparativa*, poiché rende immediatamente esplicite le differenze in veste grafica.

La modalità di assegnazione del dato del tempo richiede, in questa piattaforma software, un'assegnazione puntuale dell'attributo che, riferendosi alla precedente classificazione, è di tipo 1, ovvero di tipo *parametro-oggetto*, poiché ognuna delle *istanze* presenti nello spazio di lavoro di *Revit* deve necessariamente appartenere ad una determinata *fase* (o tempo T) *di creazione*[141]. È poi discrezione dell'operatore, in base alle informazioni che possiede e che intende assegnare, l'aggiunta di ulteriori *fasi* fino all'eventuale *demolizione* dell'elemento. Ogni elemento infatti appare per la prima volta nella *fase* in cui viene *costruito*, sarà *esistente* in tutte le *fasi* che attraversa e scomparirà dal momento della *demolizione*.

Le qualità della resa grafica ed il tipo di informazione assegnata dipendono, oltre che dalla *fase*, anche dall'esplicitazione dello *stato di fase*[142] e dalla personalizzazione del *filtro delle fasi*[143].

---

[141] In *Autodesk Revit* l'operatore può scegliere di attribuire o meno un'ulteriore eventuale *fase* di *demolizione* che rappresenta l'eliminazione dell'oggetto a partire da un determinato tempo T.

[142] Lo *stato di fase* rappresenta la condizione nella quale l'elemento si trova in ognuno dei tempi che attraversa. Questo infatti potrà essere ritenuto *nuovo* – ovvero realizzato proprio al tempo T –, *esistente*, – ovvero realizzato in un tempo precedente al tempo T, ma ancora esistente al tempo T –, *demolito* – ovvero realizzato in un tempo precedente al tempo T ma non più esistente dal tempo T in poi – o *temporaneo* – ovvero realizzato e demolito nello stesso tempo T.

[143] Ognuna delle viste del modello può essere impostata in modo tale da fornire informazioni specifiche riguardanti le *fasi*, attraverso il *filtro delle fasi*.

Poiché *Autodesk Revit* applica ad uno stesso modello tutte le *fasi* temporali individuate, assumendo di volta in volta le trasformazioni relative ad ognuna di esse, il modello stesso giunge alla sua configurazione finale mantenendo memoria delle trasformazioni. Questa concezione lineare delle *fasi* esclude la possibilità di documentare più configurazioni appartenenti ad una stessa fase e, nonostante siano gestite in termini qualitativi e non quantitativi, la creazione di più *fasi* relative ad uno stesso momento storico potrebbe generare informazioni incoerenti, poiché ogni *fase* è confrontabile solo con quella che la precede o la segue nell'ordine di creazione.
In sintesi, il sistema progettato in *Revit* per la rappresentazione del tempo, così strutturato, può essere considerato adeguato solo a una casistica di assegnazione del dato di tipo 1 che, per definizione, consente l'attribuzione del dato temporale oggetto per oggetto. Non può però soddisfare le necessità di rappresentazione delle altre categorie perché se ad un intero gruppo di elementi si sceglie di assegnare una stessa *fase* per documentare l'epoca di appartenenza della porzione di manufatto a cui appartengono invece che la propria specifica informazione, il dato

I *filtri delle fasi* sono personalizzabili. Per comprenderne l'utilizzo ne può essere spiegata in via esemplificativa l'impostazione che generalmente è proposta di *default* in un *template* di *progetto Architettonico* di *Revit 2017*, in versione italiana: *nessuno, mostra tutto, comparativa, stato di fatto e stato di progetto*. Impostando il *filtro di fase* della vista su *nessuno*, si vedrà tutto ciò che è stato modellato, indipendentemente dalla propria *fase* di costruzione; impostando su *comparativa* si evidenzieranno in particolare gli elementi di *nuova costruzione* e gli elementi *demoliti* nella specifica *fase*; impostando su *mostra tutto* si visualizzeranno tutti gli elementi *esistenti* nella specifica *fase*, evidenziandone le eventuali *demolizioni* previste nella *fase* stessa; su *stato di fatto* gli elementi interessati dalla specifica *fase* saranno visualizzati con stili grafici differenti (anch'essi personalizzabili) dipendenti dallo *stato di fase*. Infine, *stato di progetto* mostrerà tutto ciò che viene realizzato nella specifica *fase* assieme a ciò che è stato realizzato in una *fase* precedente, purché non ne sia stata ancora prevista la *demolizione*.

trasmesso diviene di dubbia interpretazione, inducendo in errore i fruitori del modello[144].

6.2 La rappresentazione del tempo per il caso studio dell'Archivio

Nel corso della ricerca si è scelto di porre quale attributo del modello non il tempo in essere o in divenire – come accade per i progetti *ex novo* – ma il tempo passato, a partire dall'epoca di prima fondazione del complesso fino allo stato attuale, come conseguenza delle trasformazioni succedutesi negli anni.
Considerando le informazioni disponibili per il caso studio, l'attribuzione della *quarta dimensione* ha assunto una valenza analitica e complessa poiché ogni elemento acquisito nella campagna di rilievo è stato considerato *esistente* al tempo T_n, corrispondente al momento del rilievo stesso. Ma solo per pochissimi elementi si è rinvenuta documentazione di un tempo T_i, inteso come momento storico in cui l'*i-esimo* elemento è apparso per la prima volta[145], o di altri tempi relativi alle trasformazioni occorse negli anni fino ad oggi.
Le informazioni raccolte non hanno consentito di poter documentare puntualmente tutte le trasformazioni, ma piuttosto di riconoscere porzioni di manufatto presenti da una certa epoca in poi, rendendo possibile

[144] Si consideri ad esempio che un'intera ala di un edificio oggetto di studio sia stata realizzata in una certa epoca T_1, ma non sia dato di sapere se le finestre rilevate siano quelle originali o siano state realizzate in un tempo successivo T_2: poiché la *fase* va assegnata oggetto per oggetto, per mostrare l'intera porzione di palazzo come *nuova* al tempo T_1, anche le finestre saranno assegnate al tempo T_1, generando un'informazione che potrebbe essere non documentata.

[145] Informazione di tipo puntuale riguardano la sostituzione delle originali colonne dell'Atrio del Platano con i pilastri in piperno attualmente visibili (XVIII sec) o la costruzione della Sala Sommaria nel corpo a est dell'Atrio dei Marmi (inizio XX sec).

l'individuazione di macro-aree classificabili secondo l'epoca di appartenenza, rientrando pertanto nel tipo 2 della casistica proposta al paragrafo 6. 1.1: Attribuzione di tipo *parametro-porzione di modello*.
Nello specifico infatti, è stato possibile individuare, sulla base di ciò che è presente oggi, sette periodi storici a partire dai quali alcune porzioni del complesso sono documentate come esistenti, seppur talvolta non nella piena consapevolezza dell'esatto anno di costruzione o di fine realizzazione[146]:

a. IX sec. _Fondazione dell'antico nucleo
b. XV sec. _Atrio del Platano ed Atrio II
c. XVI sec. _Chiesa Nuova
d. XVII sec. _Atrio dei Marmi ed Atrio Primo
e. XVIII sec. _Sopraelevazione degli *Atri* e del prospetto su vico Pensieri
f. XIX sec. _Sopraelevazione sulla terrazza belvedere;
g. XX sec. _Nuovo prospetto su via del Grande Archivio, Sala della Principessa di Cellamare e nuova struttura nell'area dei *pozzi*.

Il software *Revit* applica ad uno stesso modello tutte le *fasi* temporali, richiedendone l'attribuzione di tipo *parametro-oggetto* e non consentendo la creazione di due fasi parallele. In considerazione del livello di conoscenza delle trasformazioni del manufatto dell'Archivio di Stato, si è ritenuto pertanto non adeguato il sistema di *fasi* previsto dal software. A seguito dell'assegnazione della *fase* e dell'attributo che lo classifica, ogni elemento assume infatti una precisa connotazione, in tal caso non sufficientemente giustificata dal livello di conoscenza acquisito. Si è allora preferito *bypassare* la modalità di assegnazione dei parametri ai singoli oggetti, nell'ottica di non escludere, né vincolare una eventuale conoscenza futura più approfondita.
Come anticipato, per la *fase* temporale di ognuno degli elementi modellati nel dettaglio, è stato scelto il tempo attuale, ossia il momento del rilievo,

[146] Per informazioni più dettagliate sull'evoluzione storica del manufatto si rimanda al capitolo 4.

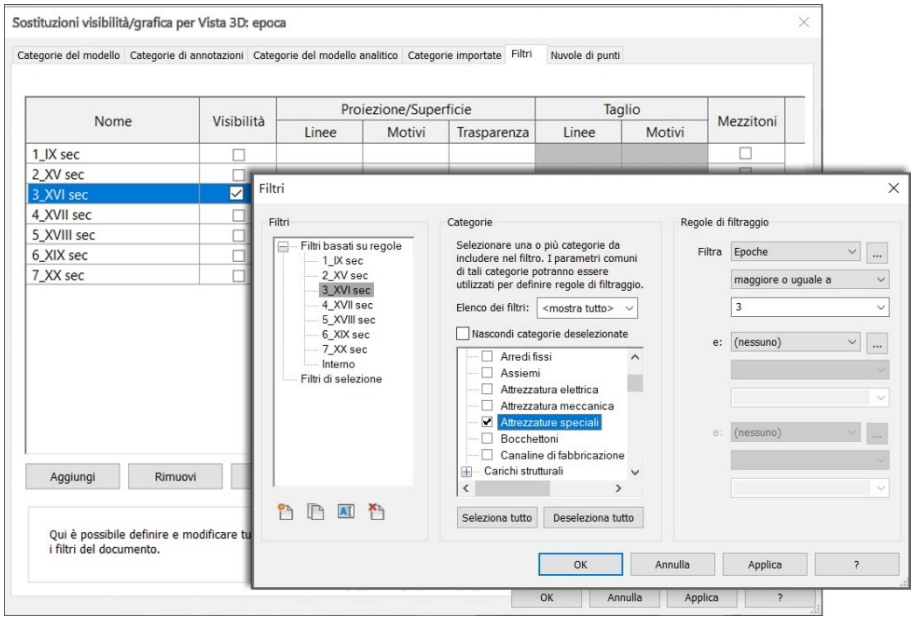


Fig. 90 – Creazione dei *filtri grafici* per le epoche in *Autodesk Revit*.

Elaborazione S. Scandurra.

assegnandovi *Rilievo 2018* come *fase di creazione*. Volendo ugualmente registrare le informazioni acquisite relativamente all'evoluzione storica, per quanto prive di una specifica puntuale (casistica 2), si è scelto di operare secondo una logica differente che consentisse di mettere a sistema le esigenze di non vincolare il modello e di fornire ugualmente l'informazione disponibile. Si è allora proceduto sfruttando le funzionalità software definite dai *filtri grafici*.

Operare sui *filtri grafici* significa stabilire delle proprietà tali che nelle impostazioni di *visibilità grafica* delle singole *viste* sia possibile visualizzare o meno determinate informazioni/caratteristiche/elementi, secondo la modalità grafica prescelta.

Dal punto di vista operativo si è innanzitutto creato un *parametro di progetto*[147] rappresentativo, delle *epoche storiche* che il complesso ha

[147] I parametri consentono di definire e modificare elementi, nonché di comunicare informazioni sul modello nelle etichette e negli abachi. I *parametri di progetto* sono contenitori di informazioni definiti e quindi aggiunti a più categorie di elementi in un

attraversato nel corso del tempo, oltre che un *filtro grafico* per ognuna delle sette *epoche storiche* che si è scelto di documentare. Si è poi messa in relazione la *regola* di attivazione del *filtro* con la *visibilità* dell'elemento a cui il *filtro* è stato assegnato. Applicando questa funzione ad oggetti semplificati, realizzati affinché fossero rappresentativi dei macro-volumi del complesso, si è ottenuta una rappresentazione dell'evoluzione sovrapposta ai dati del modello di dettaglio realizzato per oggetti.

Nello specifico, ai volumi è stato assegnato il *filtro grafico* del relativo parametro di *epoca storica* appositamente creato. Questi, nella vista prescelta (pianta, 3D, sezione o prospetto) all'occorrenza, possono essere attivati e quindi i volumi possono essere *accesi/spenti* in trasparenza ed in sovrapposizione agli elementi di dettaglio, mostrando l'appartenenza della porzione di manufatto ad un'epoca piuttosto che all'altra. Secondo questa procedura, i risultati finali sono stati resi fruibili sia graficamente che sottoforma di tabella.

I volumi relativi all'evoluzione storica sono stati modellati sottoforma di *modelli locali*, basandosi su di un livello di dettaglio grafico concettuale, seppur aderente alle masse complessive dell'edificio. In quest'occasione, il dato della nuvola e i dati CAD giustapposti nello spazio di lavoro, sono serviti esclusivamente come linee guida nella definizione dei contorni esterni dei volumi, affinché questi si sovrapponessero coerentemente al modello di dettaglio.

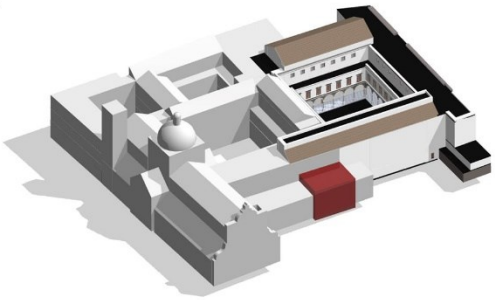
In sintesi, le scelte operate hanno permesso di svincolare il modello per oggetti di cui non si hanno informazioni sufficientemente puntuali, dalla rappresentazione del tempo, proponendo una modalità di interpretazione e di esplicitazione della conoscenza tale da raggiungere lo scopo indipendentemente dalle funzionalità specifiche proposte dallo strumento, con una rappresentazione volumetrica semplificata, secondo criteri idonei alla trasmissione del livello di informazione prestabilito.

Fig. 90 – (pagina successiva) Modelli di evoluzione temporale realizzati attraverso *filtri grafici*.

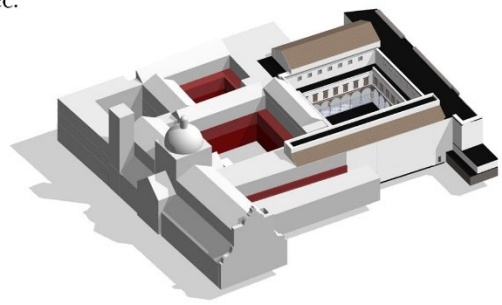
Elaborazione S. Scandurra.

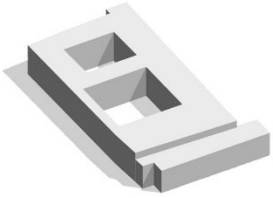
progetto. Sono specifici del progetto e non possono essere condivisi con altri progetti (Guida on line di Autodesk Revit).

a. IX sec.

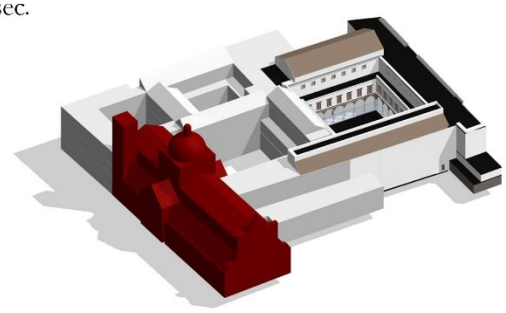


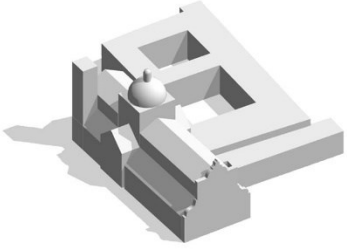
b. XV sec.



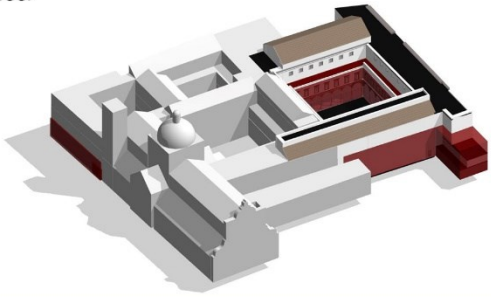


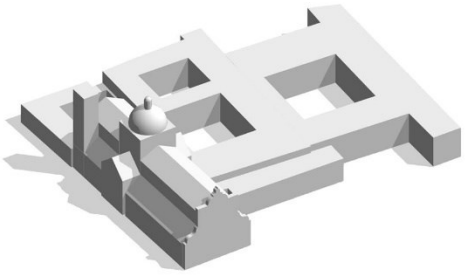
c. XVI sec.



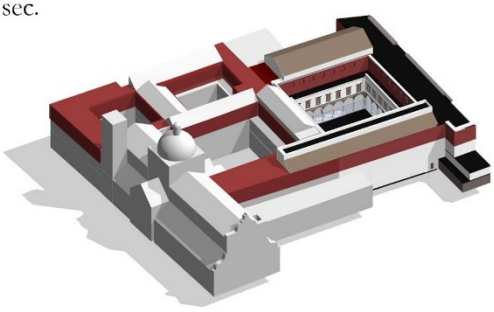


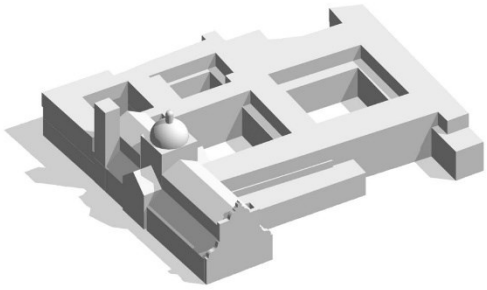
d. XVII sec.



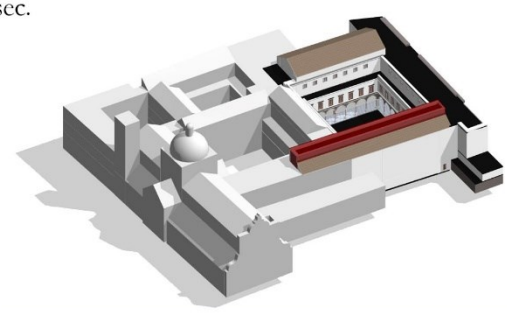


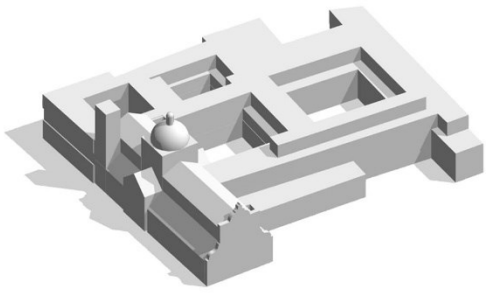
e. XVIII sec.



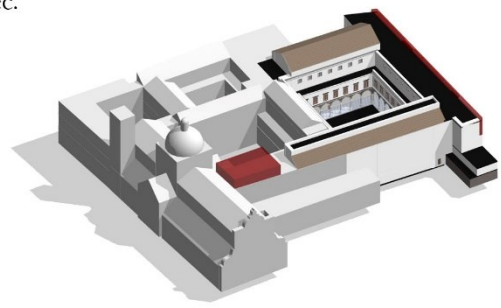


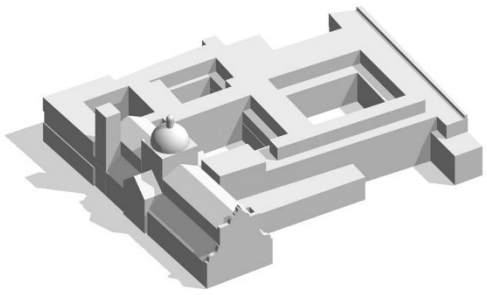
f. XIX sec.



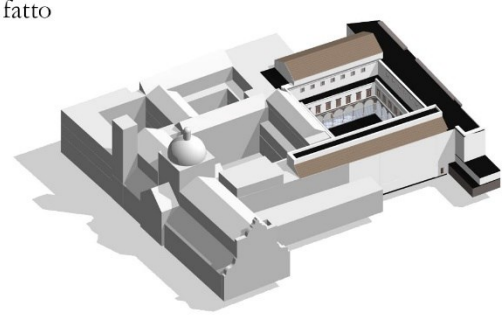


g. XX sec.





Stato di fatto



CAPITOLO SETTIMO

La modellazione HBIM degli elementi complessi: le superfici voltate

I sistemi voltati[148]. caratterizzano in modo specifico l'architettura storica[149]. Morfologicamente possono essere intesi come un particolare tipo di superficie tridimensionale, di cui almeno una delle sezioni principali è costituita da un profilo curvo (CAPONE, 2009).
Dal punto di vista statico e compositivo le volte differiscono per tipologia, sebbene nell'insieme sia possibile definirne il sistema come una struttura

[148] Ampia è la letteratura sul tema delle volte a partire dai trattatisti fino agli studi più recenti. Per brevità in questa sede si citano in particolare gli scritti A. Palladio, *I quattro libri dell'architettura* (vol.1), 1570; S. Serlio, *I sette libri dell'architettura* (vol.4), 1584; G. Guarini, *Architettura Civile*, 1737; B. A. Vittone, *Istruzioni elementari per l'indirizzo de' giovani allo studio dell'architettura civile* (libro terzo), 1760; F. Milizia, *Le Vite de' più celebri architetti d'ogni nazione e d'ogni tempo precedute da un Saggio sopra l'Architettura*, 1768; J. B. Vignola, *Regola delli cinque ordini d'architettura*, 1787; F. P. Tucci, *Della misura delle volte rette ed oblique*, 1832; G. A. Breymann, *Costruzioni in pietra e strutture murali*, 1926. Mentre tra i numerosi studi recenti si menzionano M. Docci, R. Migliari, *Scienza della rappresentazione*, 1992; C. Crescenzi, *Superfici a semplice e doppia curvatura. Le ragioni geometriche delle coperture voltate in architettura*, 1999; A. Giordano*, Cupole, volte e altre superfici*, 2002; M. Capone, *La genesi dinamica della forma*, 2009; L. Margani, *Archi e volte in muratura*, 2009.

[149] Guarini scriveva che *le volte sono la principale parte delle Fabbriche, e gli Attori che hanno scritto d'Architettura se la passano sì brevemente, che alcuni nemmeno ne parlano quando sono le più difficili non tanto da inventar, e porre in disegno, ma anche da porre in opera.* Guarino Guarini (1624 – 1683) è tra i trattatisti italiani a dedicare ampio spazio alle coperture voltate nel testo *Architettura civile*, trattato III, cap. XXVI.

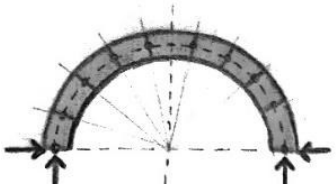


Fig. 92 – I diversi conci che costituiscono un arco scaricano il peso sui piedritti secondo le componenti verticale ed orizzontale.

Elaborazione S. Scandurra.

spingente, resistente per forma, ove i conci, tipicamente in pietra o laterizio, scaricano il peso sui piedritti secondo le componenti verticale e orizzontale[150].

Per le diverse tipologie, la curvatura delle superfici è ciò che ne caratterizza la rappresentazione. Tale forma e, in particolare, il fatto che la funzione strutturale non sia separata dalle altre componenti[151], ne rende complessa una riproduzione e scomposizione alla maniera prevista dai sistemi di tipo BIM.

I sistemi HBIM infatti sono ancora poco versatili negli strumenti e nelle modalità di resa della forma e della continuità materica dell'architettura storica, presentandosi quale campo di ricerca ancora aperto quello relativo alle procedure atte a riprodurre digitalmente i sistemi voltati attraverso la modellazione di oggetti che siano da un lato generalizzabili per tipologia, dall'altro aderenti allo specifico caso.

Nel presente studio, a partire dall'analisi delle strutture voltate, della relativa nomenclatura e conformazione geometrica, sono state sperimentate procedure relative alla modellazione parametrica in ambiente BIM delle volte presenti nelle sale dell'Archivio di Stato di Napoli, con l'obiettivo di delineare un processo operativo iterabile per la costruzione di tali forme in sistemi CLOUD-to-HBIM. Preliminarmente sono stati individuati i dati costitutivi atti ad identificare i sistemi voltati, considerando le procedure utilizzabili per la modellazione e, al contempo,

150 Gli elementi curvi mostrano una capacità portante "per curvatura" ovvero intrinseca della propria geometria e forma. Considerando per semplicità un arco, possiamo allora dire che i conci sono sostenuti dal mutuo contrasto. La sommatoria di tutte le componenti orizzontali di tali azioni determina l'insorgere di spinte orizzontali sugli appoggi. Semplificando, dividendo l'arco in due semiarchi, tale spinta può essere assimilata a quella di due puntoni inclinati di un angolo a: considerando P come peso proprio del puntone, questi eserciteranno sugli appoggi un'azione orizzontale di tipo P/2*cotg a, incrementata poi dalle masse superiori portate.

151 *La nozione di organismo architettonico si applica a un edificio, semplice o complesso, considerato nella sua globalità, cioè come "sistema", le cui funzioni fondamentali possono essere definite dalla triade vitruviana di utilitas, firmitas e venustas. Nell'organismo pre-ottocentesco queste tre funzioni (e anche le altre eventuali) non erano affatto distinte* (MARGANI, 2009).

gli strumenti offerti dalla piattaforma BIM utilizzata per l'analisi del caso studio (*Autodesk Revit*). Si è scelto di contemplare soluzioni utili a ridurre i tempi di modellazione, evitando però un'eccessiva semplificazione delle forme e, pertanto, aderendo il più possibile al dato metrico rilevato. In altre parole, si è perseguito un risultato semi-automatico, replicabile e adattabile, utile a documentare le informazioni metriche e storico-artistiche acquisite, pur senza trascurarne le relative interpretazioni geometriche e tipologiche. Dal punto di vista metodologico, mentre l'individuazione delle singole tipologie di volta e delle parti costitutive d'ognuna d'esse è servito a riconoscerne le specifiche configurazioni, la successiva scomposizione geometrica è stata la base per la definizione delle variabili del modello di tipo parametrico.
Su tale argomento molte sono le sperimentazioni condotte (LO TURCO, & SANTAGATI, 2016; CHIABRANDO, et al., 2017; MAIETTI, et al., 2018; BOLOGNESI & GARAGNANI., 2018) volte ad individuare processi univoci e condivisi, utilizzabili per la traduzione delle componenti del patrimonio storico in modelli informativi, considerando soluzioni diverse dal punto di vista tecnologico e metodologico.
La sperimentazione condotta si inserisce nel solco di tali ricerche, proponendo un approccio integrato, che tiene conto dei diversi aspetti analizzati durante la fase di raccolta informativa, graficizzabili e non, e del livello di conoscenza acquisito.

7.1 Gli elementi costitutivi di una volta

La scomposizione di una volta in sotto-elementi consente di individuarne differenti aspetti a seconda dell'obiettivo della specifica indagine, potendo analizzare dati che vanno da quelli strutturali (schema delle forze generate dai carichi e disposizione dei conci), a quelli geometrici (curve direttrici e curve generatrici), a quelli storico-artistici (mappatura delle fasi costruttive o delle raffigurazioni artistiche).

Ai fini del presente studio, l'elemento volta è stato studiato preliminarmente in relazione alla sua conformazione geometrica e, successivamente, nel rapporto con altre componenti dell'architettura.
Si è tenuto conto allora dei sotto-elementi che ne definiscono l'articolazione complessiva, da un lato ricorrendo alle specifiche presenti nei trattati di architettura, dall'altro considerando le scomposizioni semantiche alla base dei sistemi BIM. È vero infatti che la definizione di precise ontologie all'interno del dominio del *cultural heritage* può costruire quel vocabolario condiviso che consente di collegare i diversi utenti del modello HBIM, similmente a ciò che avviene per il BIM applicato all'architettura contemporanea (MAIETTI, et al., 2018).
Nell'individuare le parti della volta e i termini identificativi del relativo glossario tecnico, considerata la vastità delle soluzioni riscontrate, si è scelto di effettuare un confronto innanzitutto con la trattatistica[152] e, laddove possibile, col tesauro *AAT – Art and Architecture Thesaurus* – del *Getty Research Institute*[153], quale riferimento internazionale ampiamente consolidato.
Nell'ambito dell'*Heritage Building Information Modeling*, l'interpretazione univoca del modello e delle relative sotto parti è stato oggetto di numerosi studi e riflessioni, tra cui si segnalano in particolare i risultati ottenuti dal progetto *inception*[154]. Tra gli obiettivi di *inception* infatti ha svolto un ruolo di primaria importanza la definizione delle modalità di arricchimento

[152] Riferendosi all'architettura classica, sono infatti numerose le soluzioni che la trattatistica ci propone al fine di identificare concettualmente e graficamente i diversi elementi di un manufatto architettonico. Tra i vari si citano in particolare il *De Architettura* di M. Vitruvio Pollione, il *De Re Aedificatoria* di L. B. Alberti e la *Regola delli cinque ordini d'architettura* di J. B. Vignola che, nell'illustrare e scomporre gli ordini, forniscono indicazioni puntuali sulla nomenclatura e il ruolo di ognuna delle parti della composizione.

[153] https://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/ [ultimo accesso ottobre 2019].

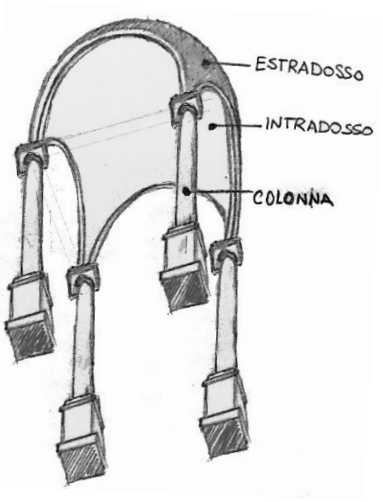
[154] www.inception-project.eu [ultimo accesso ottobre 2019].

semantico del modello documentale, inteso sia in termini di gestione, condivisione ed interrogazione attraverso procedure informatiche *open standard*, sia nella classificazione e scelta dei contenuti. L'analisi dei vocabolari e dei tesauri svolta da *inception* evidenzia da un lato la carenza di una terminologia condivisa ed esaustiva per il patrimonio culturale, dall'altro il contributo che ognuna delle fonti esistenti può fornire nell'implementazione dell'informazione. Il progetto ha scelto di riferirsi alle risorse offerte dal *Getty Research Institute* poiché conforme agli standard IT internazionali[155], controllato e coerente con le catalogazioni operate, integrando le definizioni incomplete o mancanti.
È chiaro che i dizionari e i tesauri[156] sono solo una convenzione legata ai nomi degli oggetti – ai fini di un recupero dei dati immediato – e all'esplicitazione di uno specifico concetto, declinato secondo uno o più ambiti della conoscenza. In tutti i casi, il dato testuale può completare ma non sostituirsi all'informazione ottenibile da riferimenti di tipo grafico-visuale. L'integrazione dei due dati è una delle prerogative della filosofia BIM, ancora non del tutto applicabile all'HBIM. A tal proposito, nell'ambito del progetto italiano *BIM ReCult*[157] si è proposto l'uso di #*tag* per l'associazione di vocaboli e concetti specifici al modello digitale e a tutti i contenuti allegati, per rendere più facilmente interrogabile e geriferita l'informazione associata.
L'*AAT del Getty*, oltre ad essere un vocabolario internazionalmente riconosciuto (LOPEZ, et al., 2018c), per come è strutturato non può

[155] Il *Getty AAT* è un tesauro conforme agli standard ISO e ANSI/NISO per lo sviluppo di tesauri controllati, monolingue, interoperabili con altre risorse, le cui API sono disponibili on line (LOPEZ, et al., 2018c).

[156] Mentre il dizionario è da intendere come indicazione della definizione e della pronuncia di un singolo vocabolo, il tesauro è un elenco strutturato in cui i vocaboli sono raggruppati per somiglianza semantica.

[157] BIM ReCult, il metodo BIM per il Re-cupero del patrimonio Cult-urale, progetto in collaborazione tar ACCA software, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università Federico II di Napoli, Distretto STRESS scarl (http://www.stress-scarl.com/it/innovazione/i-progetti-nazionali/bim-recult.html).



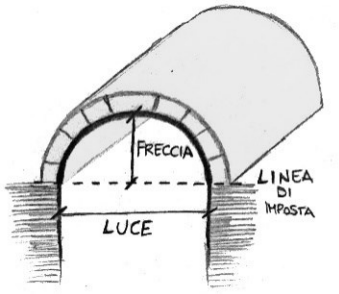


Fig. 93 – Indicazione delle parti della volta e relativa nomenclatura.

Elaborazione S. Scandurra.

essere inteso come una semplice raccolta delle definizioni degli elementi architettonici ma, piuttosto, come struttura organizzata secondo gerarchie e correlazioni tra i singoli concetti semantici espressi. Ad ogni termine è associato infatti uno specifico ID numerico che consente di recuperare con immediatezza la definizione, gli ulteriori vocaboli correlati e la relativa gerarchia.

La scelta di riferirsi all'*AAT* per le parti della volta e per tutte quelle parti del modello sfornite di identità riconosciuta nelle piattaforme BIM, deriva quindi dalla volontà di riallacciarsi alle ricerche in corso, riconoscendone gli esisti oltre che i vantaggi derivanti dalla integrazione tra un modello di tipo BIM – ovvero proiettato all'interoperabilità ed alla condivisione ampia oltre che alla conservazione delle relazioni esistenti tra più oggetti – con un tesauro che abbia i medesimi intenti.

Si riportano dunque alcune delle definizioni[158] ritenute di interesse a partire dalle sottocategorie dell'area *arch, dome or vault components dell'AAT* – di cui si riporta il relativo ID –, integrate con la terminologia presente nell'ampia trattatistica architettonica, storica e contemporanea[159]:

INTRADOSSO o imbotte: curve interne o facce di archi o volte che formano la parte inferiore concava (*intrados*, ID 300001166).

ESTRADOSSO: Le superfici esterne di volte o archi (*extrados*, ID: 300001155).

PIEDRITTO o spalla: Elementi, generalmente in muratura, che sostengono e ricevono la spinta di archi, volte o capriate (*abutment*, ID: 300000888).

COLONNA: Nella disciplina dell'architettura, si riferisce a elementi cilindrici o leggermente affusolati, verticali realizzati per dare supporto. Di

[158] La ricerca nel tesauro AAT è stata effettuata in inglese. Le definizioni riportate sono una traduzione italiana ad opera dell'autrice della presente tesi. Per la definizione originale è possibile fare riferimento al codice identificativo unico associato al termine riportato.

[159] In particolare, tra i testi più recenti si rimanda a M. Docci, R. Migliari, 1992.

solito comprendono tre sezioni: base, capitello e fusto (*column*, ID: 300001571).
FRECCIA o saetta o monta: Punto più alto di archi o volte (*crowns*, ID: 300001154).[160]
LUCE o corda o campata: La distanza tra i supporti di un elemento strutturale trasversale o tra i monconi di un arco (*span*, ID: 300056433).
IMPOSTA: Elementi sporgenti, spesso modellati, su cui poggiano le estremità di un arco (*imposts*, ID: 300001158).
CONCI: Unità in muratura che formano un arco o una volta (*voussoirs*, ID: 300001177).
CONCIO DI CHIAVE o cervello o chiave di volta: concio a forma di cuneo centrale in archi o volte. Elementi simili sono usati come ornamenti sulla testa di porte o finestre (*keystones*, ID: 300001183).
CONCIO DI IMPOSTA: I conci inferiori, o pietre inferiori di un arco o volta da cui inizia la curva dell'arco o della volta. Riposano immediatamente su un'imposta (*springers*, ID: 300265528).
CRESTE: I bordi formati dall'intersezione delle superfici di due o più volte intersecanti (*groins*, ID: 300001425).
FALDE o celle: scomparti tra le creste e le nervature di una volta (*vaulting cells*, ID: 300001457).
NERVATURE: Fasce sporgenti, generalmente in muratura, che sostengono o decorano cupole o volte (*ribs*, ID: 300265184).
NERVATURE SECONDARIE: piccole nervature subordinate, inserite tra le nervature principali delle volte gotiche (*liernes* ID: 300266287).
RINFIANCO: muratura destinata a contenere le spinte laterali della struttura e a riportare in piano l'estradosso.
FRONTE: le superficie verticale che delimita la struttura.
RENI: le parti della struttura comprese tra i piedritti e i letti la cui pendenza è generalmente vicino ai 30°.

Come è stato già specificato, per la creazione di *famiglie* BIM, il livello di dettaglio secondo cui scomporre un oggetto in fase di modellazione

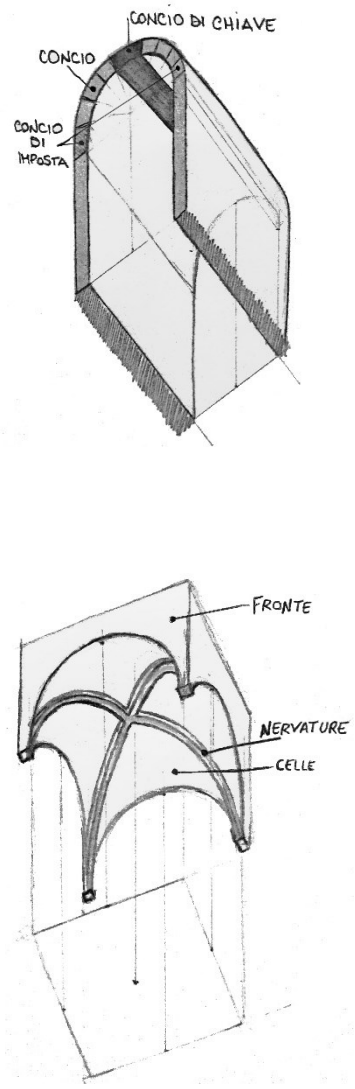


Fig. 94 – Indicazione delle parti della volta e relativa nomenclatura.

Elaborazione S. Scandurra.

[160] Generalmente si intende la porzione di arco che include i conci di chiave ed i conci controchiave oppure l'altezza di chiave.

dipende sostanzialmente dall'uso che bisogna farne. Dall'elenco esposto si evince che mentre alcuni nomi/concetti semantici fanno riferimento a elementi fisici, altri si riferiscono a elementi astratti (geometrici) come distanze o intersezioni e, pertanto, nella trascrizione in un modello parametrico BIM questi ultimi corrisponderanno a parametri o vincoli piuttosto che a componenti dell'elemento modellato.
Ciò detto, per il comportamento *intelligente* connaturato ai modelli BIM, è necessario considerare anche le interazioni che l'elemento instaura con gli altri elementi e, laddove documentabile, replicarne il comportamento nel corrispondente oggetto digitale.

7.2 Differenze tipologiche nella grammatica formale

Dal punto di vista tipologico, la trattatistica ha differenziato le volte in riferimento ad alcune caratteristiche distintive operandone classificazioni diverse.
Si propone in questa sede una descrizione generalizzata del *tipo,* analizzandone la genesi geometrica, nell'ottica di guidare le scelte operative della successiva fase di modellazione.
Nella sua astrazione geometrica, la volta viene assunta quale membrana priva di spessore e tale che l'estradosso coincida con l'intradosso.
La ricerca si è concentrata sulle volte generate da superfici di traslazione[161] ovvero quelle superfici ottenute attraverso la traslazione di una curva piana

[161] La geometria di una volta semplice è operativamente assimilabile alle operazioni di traslazione e rotazione (o rivoluzione) di archi.
Considerando la geometria euclidea, la traslazione consiste dello spostamento di tutti i punti della direttrice (la curva dell'arco) di una stessa distanza lungo una stessa direzione (la generatrice). Una volta di questo tipo è la volta a botte. La rotazione invece è rappresentata da una trasformazione dello spazio euclideo tale da spostare tutti i punti della direttrice in modo rigido nella stessa direzione, attorno ad uno stesso asse che rimane immobile, divenendo appunto l'asse di rotazione. Una volta di questo tipo è la volta a cupola.

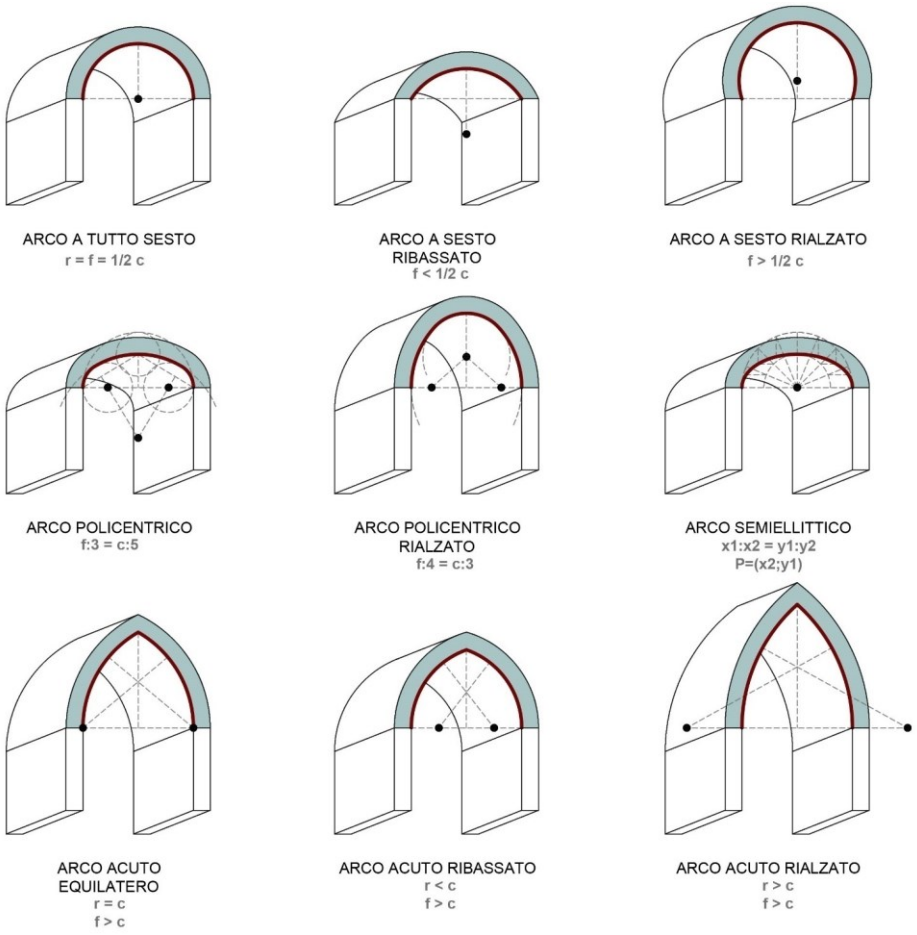


Fig. 95 – Volta a botte costruita a partire da *sesti* di diversa natura geometrica.

Elaborazione S. Scandurra.

lungo una generatrice (DOCCI, 1985; MIGLIARI, 2009; TORNABENE, 2012), interessandosi in modo specifico alle volte derivate dalla volta a botte. Quello della *volta a botte* è infatti il caso più elementare di volta generata per traslazione e rientra nell'ambito delle volte semplici[162] con

[162] I sistemi voltati sono categorizzabili secondo il tipo di superficie geometrica che ne caratterizza l'intradosso. La distinzione tra volte semplici e volte composte appare per la prima volta nel trattato *Architettura Civile* di Guarino Guarini (1624 - 1683) il quale individua inoltre sei forme di base, dalle quali è possibile derivare tutte le tipologie di

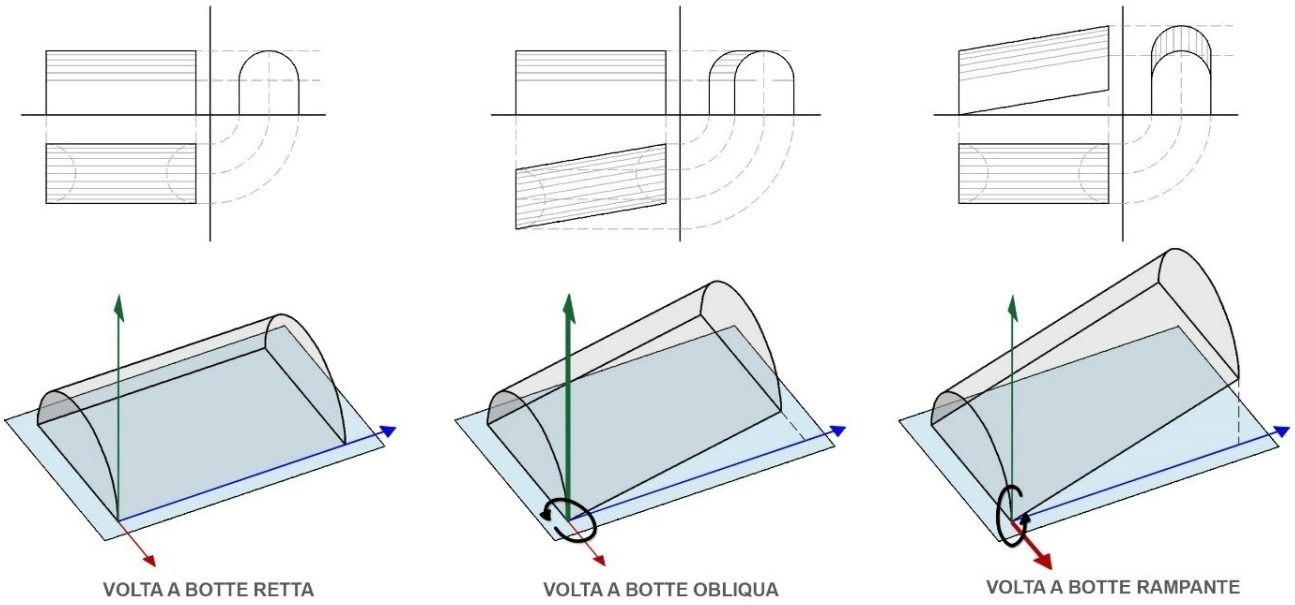


Fig. 96 – Volta a botte costruita a partire da *sesti* di diversa natura geometrica.

Elaborazione S. Scandurra.

appoggi continui[163]. Per la costruzione geometrica di tale volta è necessario stabilire alcuni dati fondamentali che riguardano in particolare:

- il piano di imposta della volta;
- il piano e la direzione della generatrice;
- il piano e la tipologia di curva direttrice, ovvero il *sesto*.

volta, anche quelle di sua invenzione: il Cilindro, il Cono, il Tronco di Cono, la Sfera, il Corpo Ellittico, il Corpo Lenticolare (ovato).
Le volte semplici sono così dette poiché costituite da un'unica superficie curva continua, priva di spigoli o cuspidi nella parte intradossale. Tipica volta semplice è la volta a botte ottenuta dalla traslazione di una curva direttrice lungo una generatrice.
Le volte composte sono invece il risultato combinatorio di più superfici curve, generalmente desunte dalle volte semplici o da porzioni d'esse. Un esempio di volta composta è la volta a crociera, costituita dalle unghie di intersezione di due volte a botte.

[163] Le volte possono essere distinte in base ai piedritti o spalle, ovvero alla tipologia di struttura resistente verticale che ne assorbe il peso e la spinta. In particolare, alcune tipologie di volte scaricano su appoggi puntuali come pilastri e colonne, mentre altre necessitano di appoggi continui come i setti portanti.

Potendosi considerare costituita da falde di semicilindro, la grammatica formale della *volta a botte* si basa quindi su di una *shape* iniziale rappresentata dalla direttrice – o curva del semi-cilindro – estrusa lungo una direzione (Fig. 95).
Variando il piano, la direzione o il percorso della generatrice, si sviluppano tipologie di volte a botte differenti. Considerando un cilindro obliquo, si ottengono la volta a botte obliqua e la volta a botte rampante a sezione retta o ellittica (MARGANI, 2009): per la botte obliqua la generatrice è ruotata rispetto all'asse z mentre, per la botte rampante retta, è ruotata rispetto all'asse x (Fig. 96). Trasformando il percorso della direttrice in poligonali o curve nello spazio, si ottengono volte a botte anulari o elicoidali.

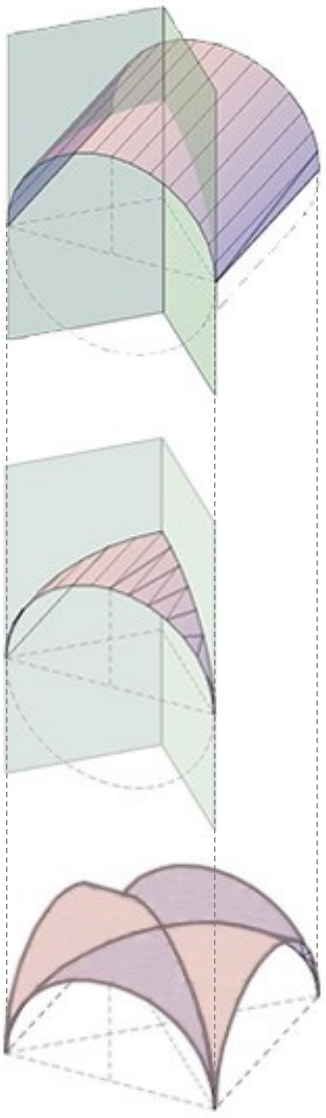
Composizione di più volte a botte: Componendo più volte a botte si ottengono diverse tipologie di volte composte, come la volta a padiglione, la volta a crociera e la volta a botte lunettata.
La *volta a padiglione* è una volta su appoggi continui, generata da quattro *fusi*, ovvero dalle superfici di intradosso ottenute dall'intersezione di due volte a botte. I dati minimi necessari alla definizione della volta sono quindi:

- il piano di imposta della volta;
- il piano e la direzione della generatrice della prima volta a botte;
- il piano e la direzione della generatrice della seconda volta a botte;
- il piano e la tipologia di curva direttrice della prima volta a botte;
- il piano e la tipologia di curva direttrice della seconda volta a botte.

La *volta a crociera* strutturalmente scarica su appoggi puntuali ovvero in corrispondenza dei piedritti posti negli spigoli dell'ambiente che copre. Per la costruzione geometrica, dall'intersezione delle due volte a botte che la generano, si prendono in considerazione le *unghie*.
La volta a crociera presenta numerose variabili; se è cilindrica e retta, i dati necessari alla definizione della volta risultano essere gli stessi della volta a padiglione, poiché riguardano:

Fig. 97 – Unghie della volta a crociera ottenute dal taglio di un semicilindro.

Elaborazione S. Scandurra.



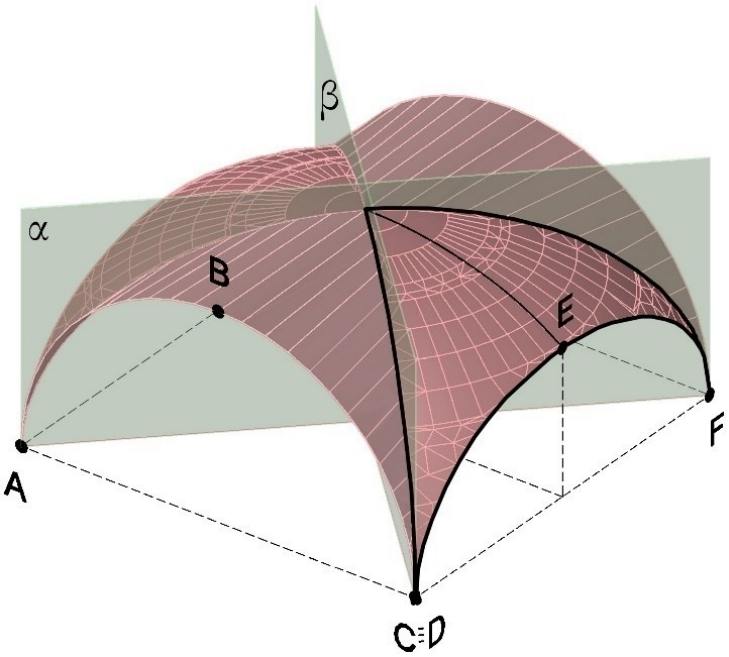


Fig. 98 – Costruzione di una volta a crociera con unghie miste, due cilindriche e due sferoidiche.

Elaborazione S. Scandurra.

- il piano di imposta della volta;
- il piano e la direzione della generatrice della prima volta a botte;
- il piano e la direzione della generatrice della seconda volta a botte;
- il piano e la tipologia di curva direttrice della prima volta a botte;
- il piano e la tipologia di curva direttrice della seconda volta a botte.

Per la volta a crociera cilindrica, infatti, le unghie possono essere considerate come porzioni di semicilindro (Fig. 97), ottenute dal taglio di quest'ultimo secondo due piani simmetrici rispetto all'asse centrale (MIGLIARI, 2009). In questo caso le sezioni diagonali lungo le creste formano delle semiellissi. Esistono però tipologie di volta a crociera dette sopralzate (MARGANI, 2009) caratterizzate da archi diagonali a tutto sesto: in questo caso la chiave di volta è posta ad una quota maggiore rispetto alla chiave degli archi frontali e ogni unghia è definita da un semicerchio frontale e due quarti di cerchio laterali, rendendo la superficie a curvatura multipla, non più generabile a partire da un cilindro.

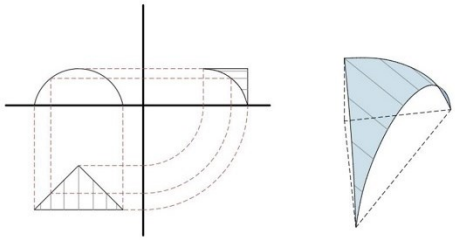
Talvolta, nell'architettura rinascimentale, le volte a crociera sono costituite da una combinazione di unghie di natura cilindrica e unghie di natura complessa che fungono quasi da lunette maggiori.
Tali unghie presentano la quota di chiave dell'arco frontale ad una quota minore rispetto alla chiave di volta e una superficie a curvatura multipla di tipo cilindroico o sferoidico[164]. La natura geometrica di tali elementi può differire a seconda della natura delle curve principali di cui si compongono (CAPONE, 2009; FALLAVOLLITA, 2009; MARGANI, 2009). In ognuno dei casi, i dati necessari alla costruzione geometrica di unghie cilindroiche e unghie sferoidiche sono:

- la tipologia e la quota della curva di imposta dell'unghia;
- il piano di appartenenza e la tipologia di curve diagonali;
- la curva in mezzeria.

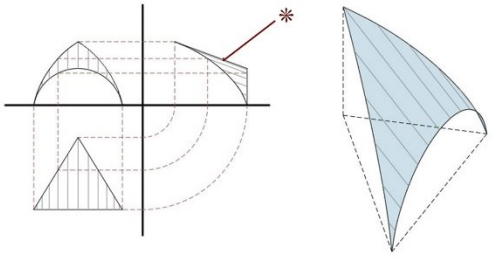
Quindi, considerando una volta a crociera costituita da un primo cilindro di direttrice passante per i punti A, B, C, la costruzione delle unghie cilindroiche o sferoidiche dipenderà dalla curva di imposta passante per i punti D, E, F e dall'individuazione delle curve ottenute dall'intersezione dei piani α e β col suddetto cilindro (Fig. 98). La differenza tra le tipologie specifiche dipenderà dalla modalità di costruzione della superficie dell'unghia (Fig. 99): si diranno *unghie sferoidiche a raggio frontale costante* quelle unghie la cui superficie è ottenuta da archi di circonferenza giacenti su piani paralleli alla curva di imposta e di raggio pari alla curva di imposta, ma di corda variabile poiché necessariamente intersecanti con le curve diagonali (tipo 3); si diranno *unghie sferoidiche a raggio costante laterale* quelle unghie la cui curva di imposta e curva di mezzeria sono assegnate e la cui

[164] La lunetta o unghia sferoidica è detta anche veloidica poiché può essere intesa come quarto di una volta omonima, ovvero una volta all'apparenza simile alla volta a vela ma mentre quest'ultima è generata a partire da una sfera (o ovaloide o ellissoide), la volta veloidica è costituita da una curva direttrice di cui le estremità e il punto in chiave traslano lungo direttrici differenti ma anch'esse non rette, senza che il proprio raggio rimanga necessariamente costante. Si parla infatti di volte veloidiche a raggio costante e volte veloidiche a raggio variabile. In entrambi i casi, la superficie è definibile complessa poiché non è generabile né da una rotazione né da una traslazione semplice.

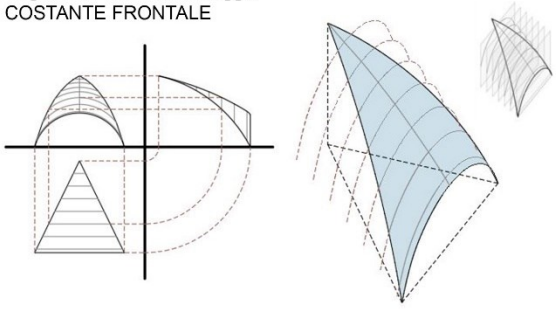
1) Unghia CILINDRICA RETTA



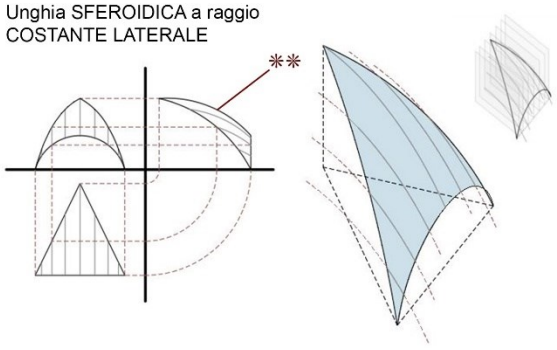
2) Unghia CILINDRICA RAMPANTE



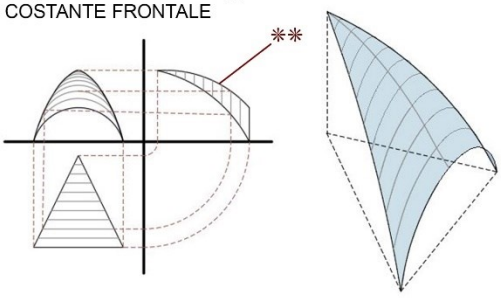
3) Unghia SFEROIDICA a raggio COSTANTE FRONTALE



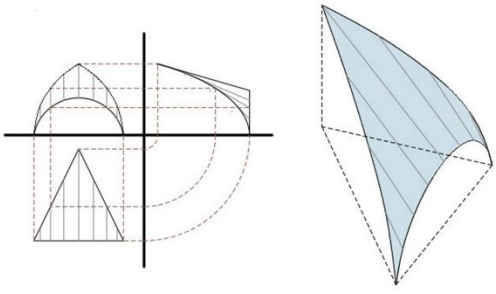
4) Unghia SFEROIDICA a raggio COSTANTE LATERALE



5) Unghia SFEROIDICA a raggio COSTANTE FRONTALE



6) Unghia CILINDROICA



* Inclinazione assegnata

** Curva assegnata

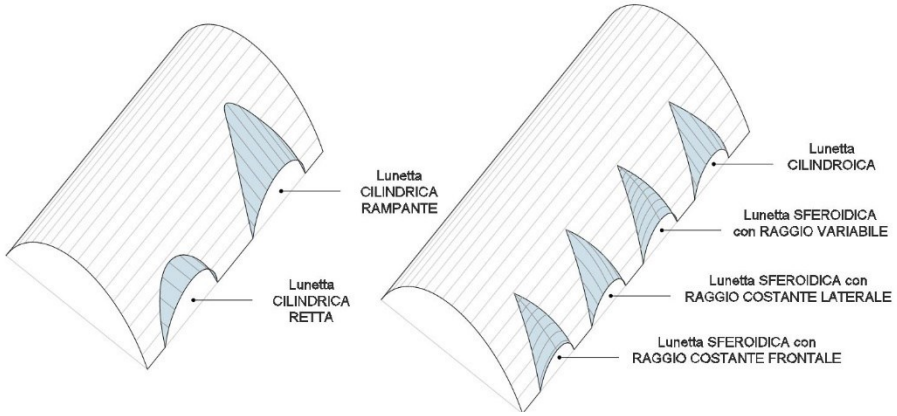


Fig. 99 – (pagine precedente) Tipologie di unghie in proiezioni ortografiche ed assonometria.

Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 100 – Lunette cilindriche, lunette sferoidiche e lunetta cilindroica inserite in una volta a botte.

Elaborazione S. Scandurra.

superficie è ottenuta da curve giacenti su piani paralleli alla curva di mezzeria, di raggio costante alla curva di mezzeria stessa (tipo 4); si diranno *unghie sferoidiche a raggio variabile* le unghie per le quali si assegna un profilo di mezzeria e la superficie è ottenuta da archi di circonferenza paralleli all'arco di imposta e passanti per i punti delle curve diagonali e della curva di mezzeria assegnata (tipo 5); si diranno *unghie cilindroiche* quelle unghie costituite da superfici rigate ottenute dall'unione dei punti della curva di imposta con i punti delle curve diagonali (tipo 6).

Dal punto di vista geometrico, simile alla volta a crociera è la *volta a botte lunettata* poiché definita dall'intersezione di un semicilindro – la botte maggiore – con le lunette, assimilabili ad unghie (Fig. 100). In questo caso però la quota di chiave del semicilindro maggiore è posta più in alto rispetto alla quota di chiave delle lunette (Fig. 101).
In particolare, una *volta a botte con lunette cilindriche* si compone di una prima superficie – la botte, la cui costruzione è stata già esplicitata – intersecata trasversalmente da superfici secondarie – le lunette – anch'esse costituite dalla traslazione di una curva direttrice lungo una generatrice. Come per la volta a crociera, la natura geometrica delle lunette definisce ulteriori tipi, come la *volta a botte con lunette cilindroiche* e la *volta a botte con lunette sferoidiche a raggio costante* o *a raggio variabile*, la cui costruzione geometrica non varia rispetto a quella delle unghie di pari tipologia (Fig. 100). In tutti i suddetti casi, la superficie delle lunette è definita complessa poiché raccorda più

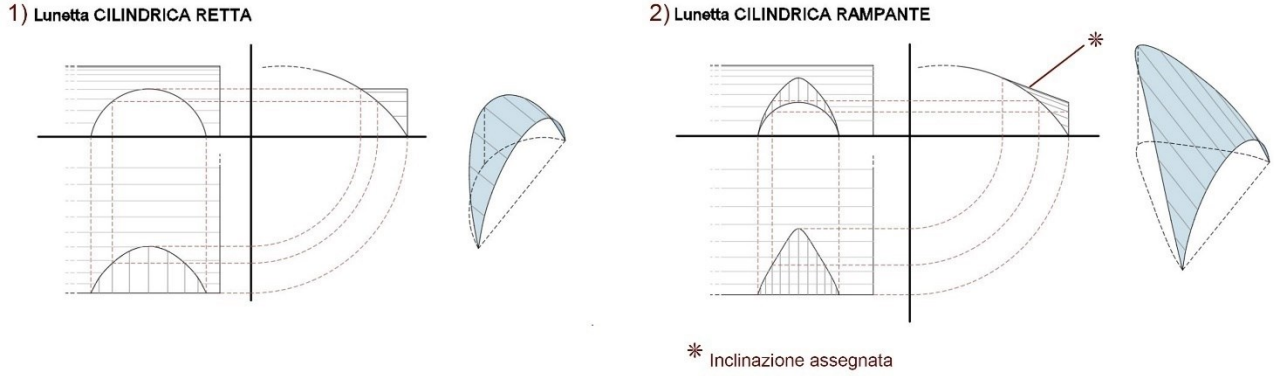


Fig. 101 – Lunette cilindriche su volta a botte in proiezioni ortografiche ed assonometria. Si noti la prima proiezione rispetto ai casi corrispondenti di figura 7: siccome la chiave della volta a botte è ad una quota maggiore rispetto al punto più alto della lunetta, la curva di intersezione che si genera differisce rispetto al caso della volta a crociera. Per quest'ultima infatti la chiave di volta coincide col punto più alto delle unghie.

Elaborazione S. Scandurra.

curve: la curva di imposta delle lunette – ovvero la curva che definisce generalmente il vano aperto dalla lunetta in corrispondenza della spalla (FALLAVOLLITA, 2009) –, due curve diagonali – ottenute dall'intersezione della superficie della volta a botte con due piani verticali simmetrici ed incidenti rispetto alla curva di imposta – e la curva in mezzeria.

Una tipologia derivante dalla combinazione delle volte già indicate è quella della *volta a botte lunettata con teste a padiglione anch'esse lunettate* (Fig. 102). Si tratta di una volta ottenuta geometricamente secondo le procedure già anticipate per la volta a padiglione e per la volta a botte lunettata, ovvero la volta principale è essa stessa composita prima ancora della costruzione delle lunette. In questo caso inoltre è necessario ricordare che per la costruzione delle volte a padiglione su ambienti rettangolari bisogna estrapolare i fusi generati dall'intersezione di due volte a botte.

L'analisi geometrica delle superfici voltate, in tutti i casi, conduce ad un modello geometrico teorico della specifica tipologia. È bene precisare che tale modello costituisce il modello ideale della sola superficie intradossale e non dell'elemento realmente costruito (coincidenza tra estradosso ed intradosso). Nella realtà costruita, invece, entrano in gioco la tridimensionalità dei conci e le specificità costruttive, che rendono spesso la curva di estradosso diversa dalla curva di intradosso.

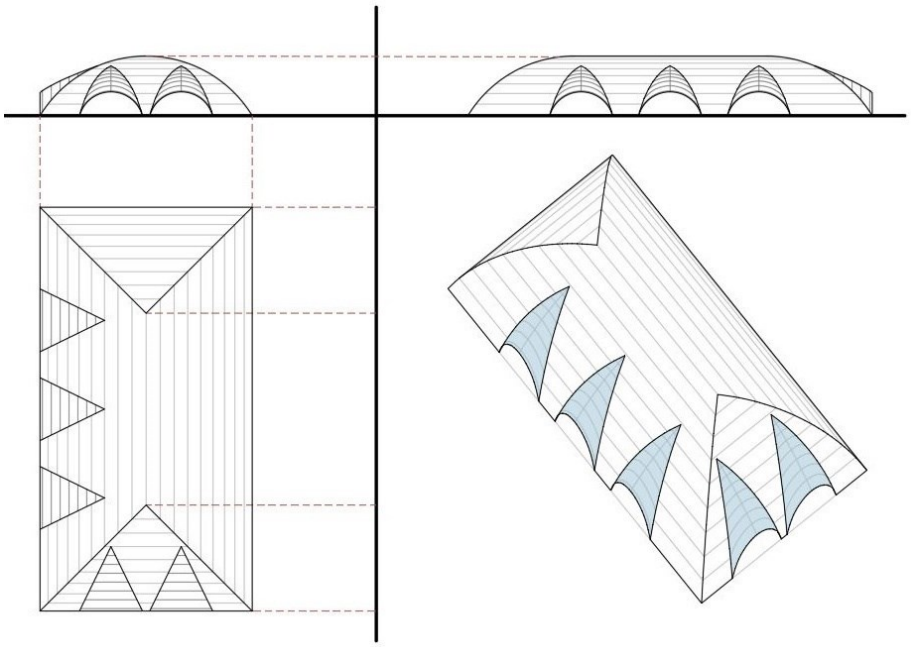


Fig. 102 – Costruzione geometrica di una volta a botte lunettata con teste di padiglione, in parte lunettata con lunette sferoidiche a raggio costante frontale.

Elaborazione S. Scandurra.

7.3 Procedure di modellazione delle volte in HBIM: stato dell'arte

Dall'esamina della bibliografia di settore, sono emersi più modi di affrontare la questione della modellazione delle volte nell'ottica di un processo HBIM (ORENI, 2013; OSELLO, 2015; DORE, 2017; GARAGNANI, 2013).

Si distinguono in particolare due approcci: modellazione esterna allo spazio di lavoro BIM e modellazione interna al software di *authoring*.

Per quanto riguarda la modellazione esterna, si ricorre a piattaforme di pura modellazione non direttamente legate al mondo BIM, servendosi ad esempio di procedure di tipo NURBS. Tali procedure (cfr. cap.1) consentono infatti di generare modelli di elevato dettaglio geometrico in tempi relativamente rapidi e rendono possibile un alto livello di aderenza alla nuvola di punti poiché le superfici modellate sono manipolabili

attraverso numerosi *punti di controllo*. Importando tali modelli nelle piattaforme BIM, questi risultano *bloccati*, monomaterici e privi di tutte le relazioni e le qualità che caratterizzano un BOM – *Building Object Model* – rispetto ad un tradizionale modello 3D. Non sono quindi modificabili attraverso parametri e ciò li rende non adattabili e quindi non riutilizzabili. Ciò si traduce in un modello vincolato al singolo caso specifico, impossibile da tipizzare e adeguare ai casi analoghi.
Diversi autori (BANFI, et al., 2018; DORE, 2017) utilizzano nei loro modelli oggetti di origine NURBS, sottolineando l'esigenza di implementare queste modalità di modellazione all'interno delle piattaforme BIM al fine di supportare la riproduzione di elementi complessi dell'architettura storica.

I casi di modellazione interna invece, si distinguono in base alla piattaforma BIM, alla scomposizione logica che si opera dell'elemento da modellare e alla procedura di modellazione che si sceglie di mettere in pratica.
In riferimento alla modellazione delle volte, sono state individuate quattro diverse modalità, distinguibili in base alla procedura adottata: a) modellazione locale per contorni, b) modellazione parametrica di volumi di sottrazione, c) modellazione da profili derivanti dalla nuvola di punti, e d) modellazione per addizione di elementi parametrici minori.

a) Le modellazioni locali per contorni sono operate per lo più in software come *ArchiCad*, dove alcune procedure di modellazione possono in certe fasi essere assimilabili a quelle del noto software *Sketchup*. È possibile far rientrare in questa categoria anche parte dei risultati di *modellazione locale* in *Autodesk Revit*, ovvero quando la realizzazione degli oggetti digitali è operata direttamente in *ambiente di progetto* e dunque è dedicata allo specifico singolo caso. Operativamente si tratta di individuare e trasformare in linea i contorni dei profili essenziali di una specifica volta (arco d'imposta, generatrice, piani di intersezione, etc.) per realizzarne le superfici attraverso estrusioni rivolte al singolo caso.

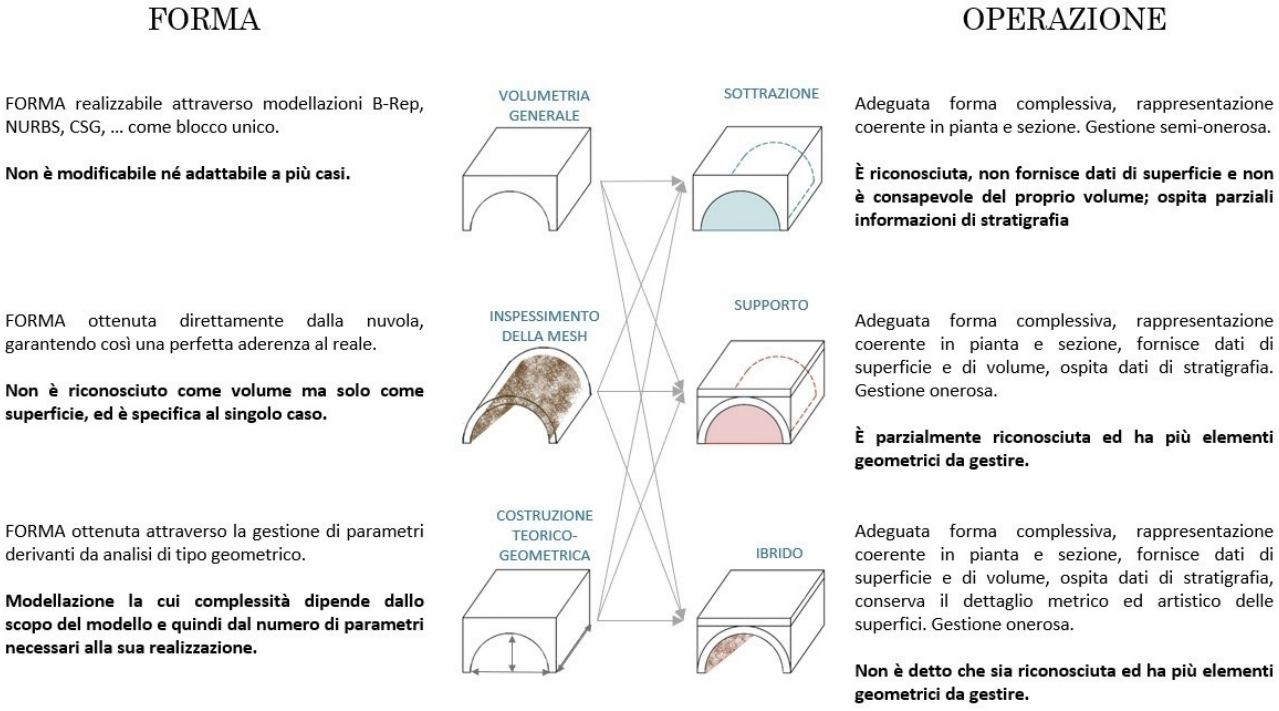
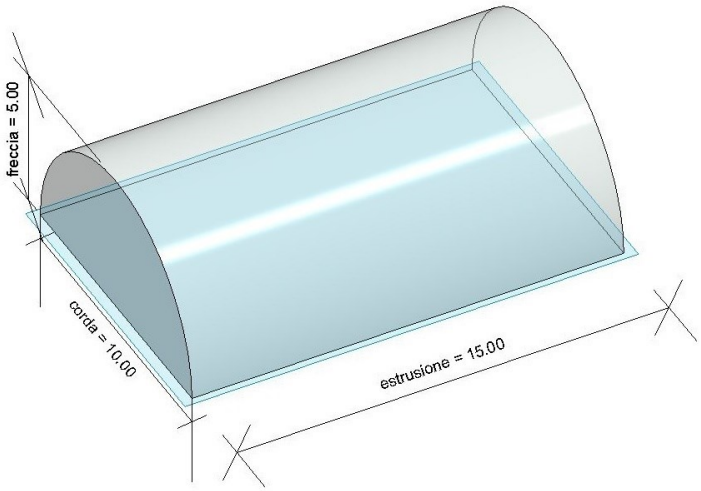


Fig. 103 – Differenze operative nella modellazione di una volta.

Elaborazione S. Scandurra.

b) Le modellazioni parametriche finalizzate alla realizzazione di volumi di sottrazione, superano la mancanza di *tool* specifici per le volte realizzando un volume parametrico rappresentativo della geometria di intradosso della tipologia di volta indagata. Tale volume viene poi utilizzato come *vuoto generico* da sottrarre ad un oggetto *pavimento/solaio* riconosciuto dalle piattaforme (OSELLO, 2015; SCANDURRA, et al., 2017). Le modalità di realizzazione del volume di sottrazione e il grado di parametrizzazione rendono la forma più o meno complessa da configurare. Inoltre, il fatto che tale volume si possa sottrarre ad un oggetto *pavimento/solaio* avvicina – idealmente – il modello finale della volta al concetto semantico più affine tra quelli disponibili in BIM.

c) Parlando di modellazione a partire da profili derivanti dalla nuvola di punti, ci si riferisce in particolare al processo messo a punto attraverso il *plugin GreenSpider* (GARAGNANI, 2012b): considerando la complessità



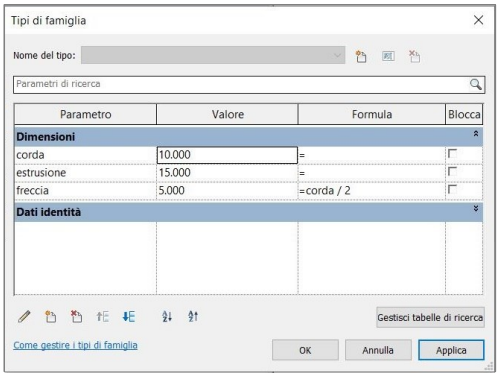


Fig. 104 – Modello geometrico di volta a botte con arco a tutto sesto: numero minimo di parametri.

Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 105 – (pagina successiva) Variando opportunamente il valore dei parametri, si ottengono infinite possibilità di variazione del modello.

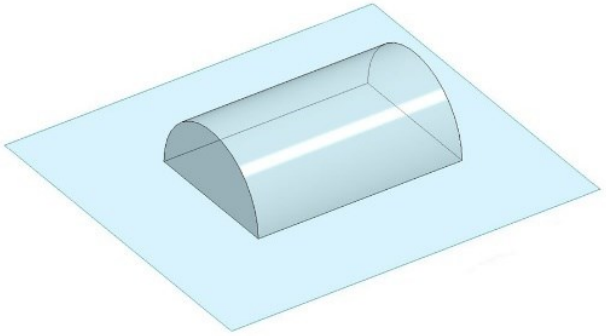
Elaborazione S. Scandurra.

delle forme dell'architettura storica e la disponibilità di nuvole di punti, il *plugin* consente di individuare una serie di punti della nuvola utili alla definizione dei profili minimi – *slice* – necessari ad ottenere modelli secondo processi di *lofting*, affinché sia possibile una maggiore aderenza alla nuvola. Anche in questo caso i modelli ottenuti sono però privi di parametrizzazione e da ridefinire caso per caso.

d) Si segnalano infine ricerche orientate alla realizzazione degli elementi minori (modellazione parametrica dei singoli conci) che costituiscono l'elemento volta, al fine di riproporne la costruzione in digitale similmente a ciò che è avvenuto nello spazio fisico (BORIN, 2017). Nonostante i possibili automatismi operabili nella giustapposizione dei conci, l'onere della modellazione prevista da tale soluzione è legittimato laddove la conoscenza dello specifico caso sia tale da poterne replicare con un alto livello di affidabilità le caratteristiche relative all'apparato murario, alla tessitura dei conci e alle condizioni di estradosso.

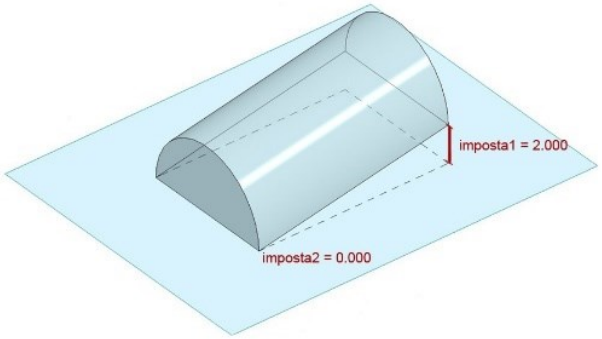
VOLTA A BOTTE

Parametro	Valore	Formula
Dimensioni		
corda1	7.000	=
corda2	7.000	=
freccia1	3.500	=corda1 / 2
freccia2	3.500	=corda2 / 2
generatrice	10.361	=
imposta1	0.000	=
imposta2	0.000	=



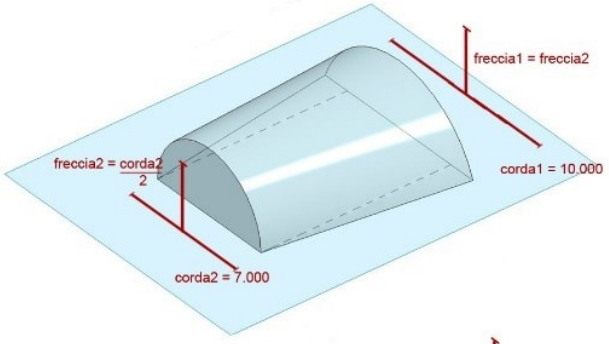
VOLTA A BOTTE RAMPANTE

corda1	7.000	=
corda2	7.000	=
freccia1	3.500	=corda1 / 2
freccia2	3.500	=corda2 / 2
generatrice	10.361	=
imposta1	2.000	=
imposta2	0.000	=



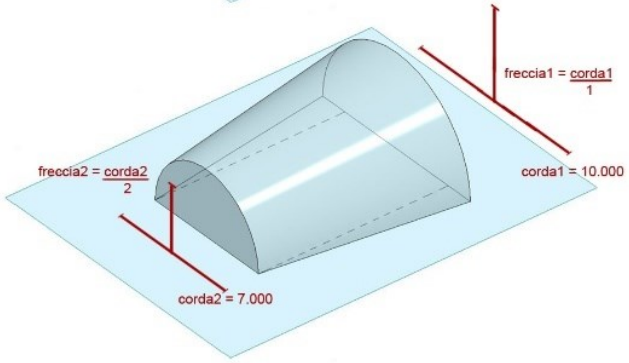
VOLTA A BOTTE SU PIANTA IRREGOLARE CON CONCI DI CHIAVE A QUOTA FISSA

corda1	10.000	=
corda2	7.000	=
freccia1	3.500	=freccia2
freccia2	3.500	=corda2 / 2
generatrice	10.361	=
imposta1	0.000	=
imposta2	0.000	=



VOLTA A BOTTE SU PIANTA IRREGOLARE CON ARCHI DI FRONTE A TUTTO SESTO

corda1	10.000	=
corda2	7.000	=
freccia1	3.500	=corda1 / 2
freccia2	3.500	=corda2 / 2
generatrice	10.361	=
imposta1	0.000	=
imposta2	0.000	=



7.4 La volta in una modellazione di tipo parametrico

Per parametrizzare un qualsivoglia processo destinato alla generazione di modelli, è innanzitutto indispensabile analizzare le caratteristiche, la genesi e il grado di variabilità che si intende assegnare all'oggetto riprodotto digitalmente.

Nel caso della parametrizzazione delle volte, pur prendendo in considerazione il modello geometrico ideale del volume che sottende l'intradosso, è necessario valutarne le possibili variazioni nell'ottica di realizzare un modello di volta adattabile ad ambienti di forma diversa.

In particolare, nel caso della volta a botte, vanno preliminarmente stabiliti i dati ritenuti indispensabili, ovvero l'imposta dell'arco, la direzione delle

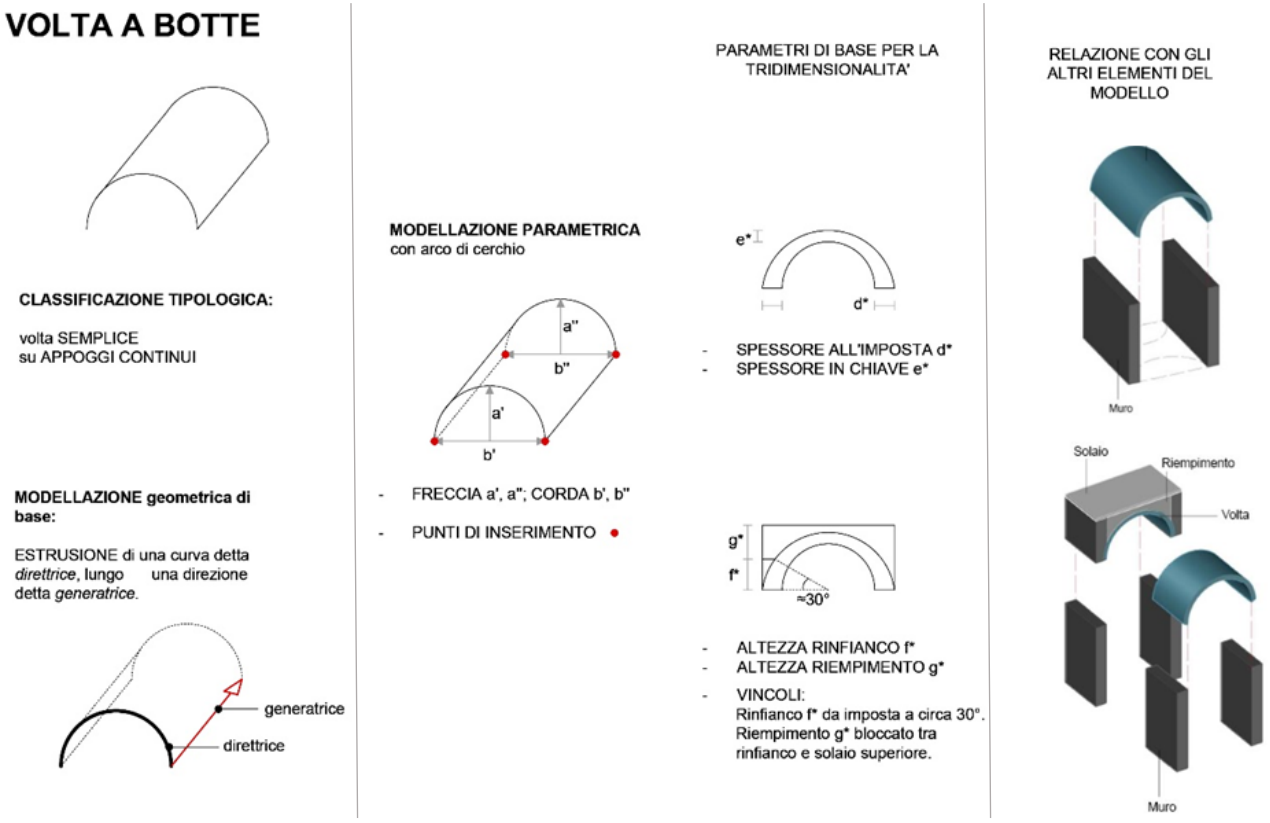


Fig. 106 – Studio di una volta a botte, dei relativi parametri e delle relazioni con gli altri elementi dell'architettura.

Elaborazione S. Scandurra.

generatrici, il piano e la geometria della curva direttrice. In termini parametrici ciò significa che vanno stabiliti due parametri relativi alla direttrice – la lunghezza di corda e freccia, rapportate 1:2 se l'arco è a tutto sesto; freccia<1/2corda per arco ribassato e freccia>1/2corda per arco rialzato – e un parametro relativo all'estensione longitudinale della volta a botte – la lunghezza della generatrice (Fig. 104).

Nell'inserimento all'interno di un modello più ampio è necessario aggiungere parametri e vincoli di posizione, come ad esempio la quota di imposta.

Questo numero di parametri è sufficiente laddove la direttrice sia considerata sempre appartenente ad un piano verticale e ortogonale rispetto alla generatrice, quest'ultima giacente quindi su di un piano

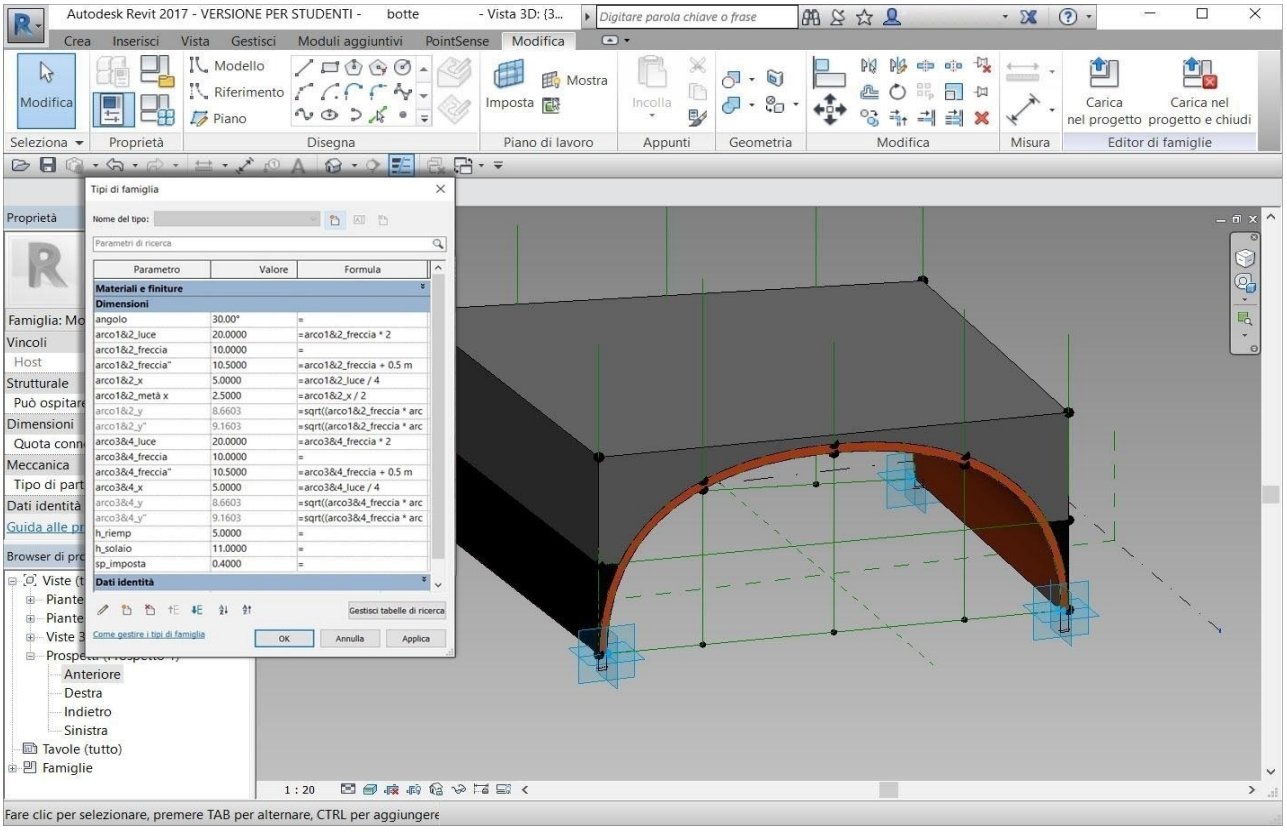


Fig. 107 – Modellazione di una volta a botte adattiva, completa di stratigrafia e visualizzazione dei relativi parametri. La scelta del *template* di *modello adattivo* in *Autodesk Revit* consente di adattare la forma a qualunque tipologia di pianta quadrilatera. Gestendo i parametri impostati in fase di modellazione, è possibile variare le dimensioni di ognuna delle parti di elemento modellate.

Elaborazione S. Scandurra.

orizzontale. Ma nell'ottica di voler strutturare un processo generale che possa particolareggiarsi attraverso un comportamento parametrico, la volta a botte così descritta non può che ritenersi in realtà un caso particolare di un modello parametrico generale, costruito con un numero di parametri tanto maggiore quante numerose sono le possibili configurazioni a cui si vuole renderlo adattabile. È infatti necessario aggiungere al modello ulteriori parametri (Fig. 105) affinché sia possibile renderlo capace di giungere a configurazioni come la volta a botte rampante (duplicazione dei parametri relativi al piano di imposta dei due fronti della volta poiché non corrispondenti o aggiunta del parametro d'angolo tra la generatrice ed il piano verticale), la volta a botte obliqua (impostazione del parametro d'angolo tra la superficie frontale e la direzione della generatrice) o pianta irregolare (impostazione dei parametri d'angolo della base e delle relazioni tra questi e la curva direttrice).

Sebbene risulti evidente che l'accrescere del numero di parametri comporti un notevole aumento delle difficoltà e dei tempi di configurazione del modello, è pur vero che, una volta strutturato, il singolo modello può agevolare le operazioni di modellazione complessiva poiché a partire da un unico *input*, variando i parametri, è possibile ottenere velocemente numerose tipologie di *output*.

Il numero di parametri aumenta notevolmente nel caso in cui si intenda realizzare un modello parametrico che, oltre a riprodurre la forma di intradosso, riproduca anche il sistema costruttivo della volta, coerentemente a ciò che avviene per tutti gli altri oggetti intelligenti di un modello BIM con livello di dettaglio medio-alto.

È chiaro che la possibilità di impiegare in modo affidabile e utile un modello così complesso richiede come requisito indispensabile un maggiore livello di conoscenza del manufatto che si intende riprodurre, affinché siano effettivamente caratterizzabili i materiali e le geometrie degli strati interni.

Per avere contezza dei parametri da disporre in questo caso, sempre in riferimento alla volta a botte e considerando la soluzione tecnologica relativa alle volte in muratura non estradossate, bisogna tener conto della scomposizione dell'oggetto reale in almeno quattro strati principali: la

struttura portante della volta, il rinfianco, il riempimento, il solaio superiore (Fig. 106). La struttura portante della volta va modellata considerando che il profilo inferiore corrisponde all'intradosso visibile, mentre il profilo superiore può differire in quanto spesso le volte in muratura sono a sezione variabile nell'ottica di alleggerirne il peso in chiave e aumentarne la base d'appoggio in corrispondenza dell'imposta (FALLAVOLLITA, 2009). Nella modellazione ciò si traduce nell'impostazione di un parametro di distanza tra le due curve in chiave indipendente dal parametro di distanza tra le due curve all'imposta.
Tra la parte strutturale della volta ed il solaio superiore vanno modellati il rinfianco e il riempimento alleggerito, ognuna con un proprio spessore. Infine, vanno considerati gli strati strutturali e di finitura del solaio superiore oltre che la finitura di intradosso, e le relazioni tra tutti questi strati affinché al variare della pianta dell'ambiente modellato e dei rapporti delle geometrie di intradosso, ciascuno vi si adegui con coerenza.
La figura 107 mostra il risultato di un esercizio di modellazione di una volta a botte parametrica realizzata in *Autodesk Revit* secondo un *template* di *modello generico metrico adattivo*, dettagliata in tutte le sue stratigrafie.

7.5 Le volte nel caso studio dell'Archivio di Stato di Napoli

Nel complesso dell'Archivio di Stato la maggior parte degli ambienti sono coperti da superfici voltate. Attraverso i rilievi effettuati e l'analisi dei dati raccolti, sono state riscontrate le seguenti tipologie di volte:

- *Volta a botte*, presente nelle sale di studio e in alcuni ambienti di collegamento di modeste dimensioni;
- *Volta a botte rampante*, nei collegamenti verticali;
- *Volte a crociera*, nei corridoi che conformano gli *Atri*, nei corridoi di accesso alle sale di studio e consultazione dei piani superiori e a copertura di alcuni ambienti di piccole dimensioni;

- *Volta a catino (o scodella) su pennacchi*, nelle campate d'angolo dell'Atrio dei Marmi;
- *Volta a schifo*, presente in ambienti privati o destinati allo studio;
- *Volta a botte lunettata*, presente con una forte diffusione all'interno del manufatto e in particolare nei vani di smonto delle scale ai piani oltre che in sale destinate all'archivio, allo studio e agli uffici. In particolare, la sala Tasso al piano degli *Atri* è coperta da volta a botte lunettata, priva di finestrature in corrispondenza delle lunette che risultato adornate da affreschi;

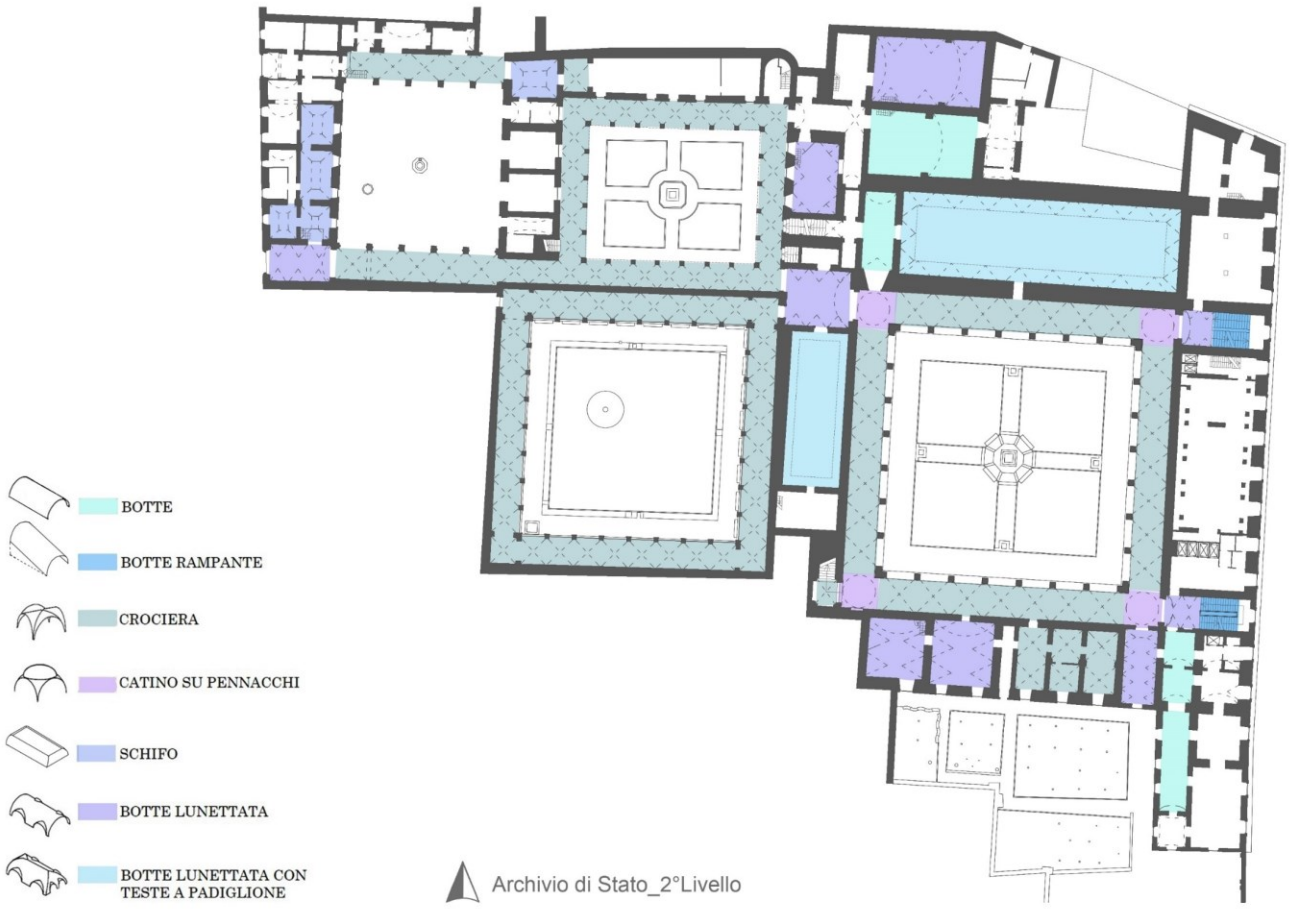


Fig. 108 – Distribuzione planimetrica delle tipologie di volta individuate nel complesso dell'Archivio di Stato.

Elaborazione S. Scandurra.

- *Volta a botte lunettata con teste a padiglione anch'esse lunettate*, in alcune sale d'archivio ed esposizione, tra cui si segnalano in particolare le sale Filangieri e Catasto al piano degli *Atri*.

Essendo disponibile il dato di rilievo *reality-based*, è stato possibile analizzare il reale manipolando il dato digitale con piani di sezione ed estrazione di profili, approfondendo la conformazione geometrica dei sistemi voltati individuati al fine di trarne le regole di ricostruzione tridimensionale più adeguate, oltre che riconoscere eventuali anomalie e soluzioni particolari, predisponendo così la modellazione HBIM.
L'analisi del dato *range-based* ha reso infatti possibile una sotto-categorizzazione delle tipologie riscontrate, particolareggiata secondo le specificità geometriche emerse dalle analisi. È risultato infatti che le volte delle sale Tasso, Filangieri e Catasto hanno lunette di tipo sferoidico, mentre la successione di volte a crociera dell'Atrio dei Marmi è caratterizzata da unghie uguali a due a due, cilindriche e sferoidiche. Tali specifiche saranno meglio esplicitate nei successivi paragrafi.

7.5.1 Sperimentazioni sulle volte dell'Atrio dei Marmi

Come anticipato, le piattaforme di modellazione a supporto dei processi BIM, non prevedono la realizzazione di oggetti semantici relativi alle volte. Spesso la soluzione è quella di generare tali elementi al di fuori dello spazio di lavoro del software poiché, nonostante alcuni *template* siano pensati per la realizzazione *ex novo* di forme non già presenti nelle librerie BIM standard, si è comunque vincolati alla logica del programma di *authoring* che, non essendo stato concepito a tali scopi, comporta notevoli difficoltà in fase di modellazione, soprattutto laddove la morfologia degli oggetti da riprodurre non si adatta alle configurazioni standard dei processi.
Autodesk Revit fornisce due ambienti distinti per la realizzazione di nuovi oggetti digitali, ovvero la modellazione di *masse in place* e le nuove *famiglie*[165] (Fig. 109). I *template* delle *famiglie* sono differenti a seconda dello specifico

[165] Cfr. CAP. 3.

componente architettonico da modellare (finestre, condotti, pilastri, porte, pannelli di facciata continua, etc.) e pensati per la realizzazione di oggetti parametrici e interrelati con gli altri.
Per elementi non appartenenti alle categorie predefinite o elementi dal comportamento eccezionale, il software fornisce *template generici*[166] che in fase di realizzazione possono essere ri-categorizzati.
La fase di ri-categorizzazione[167] prevista dal sistema non consente però l'inserimento del nuovo oggetto in categorie afferenti alle *famiglie di sistema*, non potendo quindi caratterizzare l'oggetto né come *muro*, né come *solaio*, né come *tetto*.
In quest'ottica, riferendosi alle volte, i principali aspetti su cui riflettere sono quindi due: da un lato il riconoscimento delle regole di costruzione geometrica delle superfici curve che descrivono l'oggetto e quindi la strutturazione di una *pipeline* di modellazione dedicata, in considerazione della complessità geometrica; d'altro lato l'individuazione di una modalità di attribuzione del significato all'oggetto digitale, nella consapevolezza della sua consistenza volumetrica e del suo comportamento.
Il livello di dettaglio con cui tener conto di tali aspetti dipende chiaramente dal grado di conoscenza dell'elemento reale e dallo scopo della modellazione, ovvero dal tipo di dati che si intende comunicare.
Nella documentazione degli elementi voltati nei sistemi H-BIM, una delle difficoltà deriva infatti dalla mancanza di dati: a meno della presenza di indagini invasive o documenti di cantiere, non si conosce la natura specifica di una volta in quanto la tecnica costruttiva può essere solo ipotizzata in base alle specificità del sito e all'epoca di costruzione.

---

166 I *template* di creazione di *modelli generici* sono distinti in base allo specifico comportamento che la *famiglia* creata instaurerà con altri elementi del modello: *modello generico basato su muro* (ovvero la famiglia potrà essere inserita solo su un muro, similmente a ciò che avviene per le finestre)*, modello generico basato su due livelli* (L'oggetto dipenderà dal livello di inserimento e dal livello superiore), etc.

167 La categorizzazione in questo caso non implica una variazione nel comportamento dell'oggetto ma una collocazione dello stesso nelle abacature di riferimento della categoria scelta. In effetti è definibile come un'attribuzione di significato.

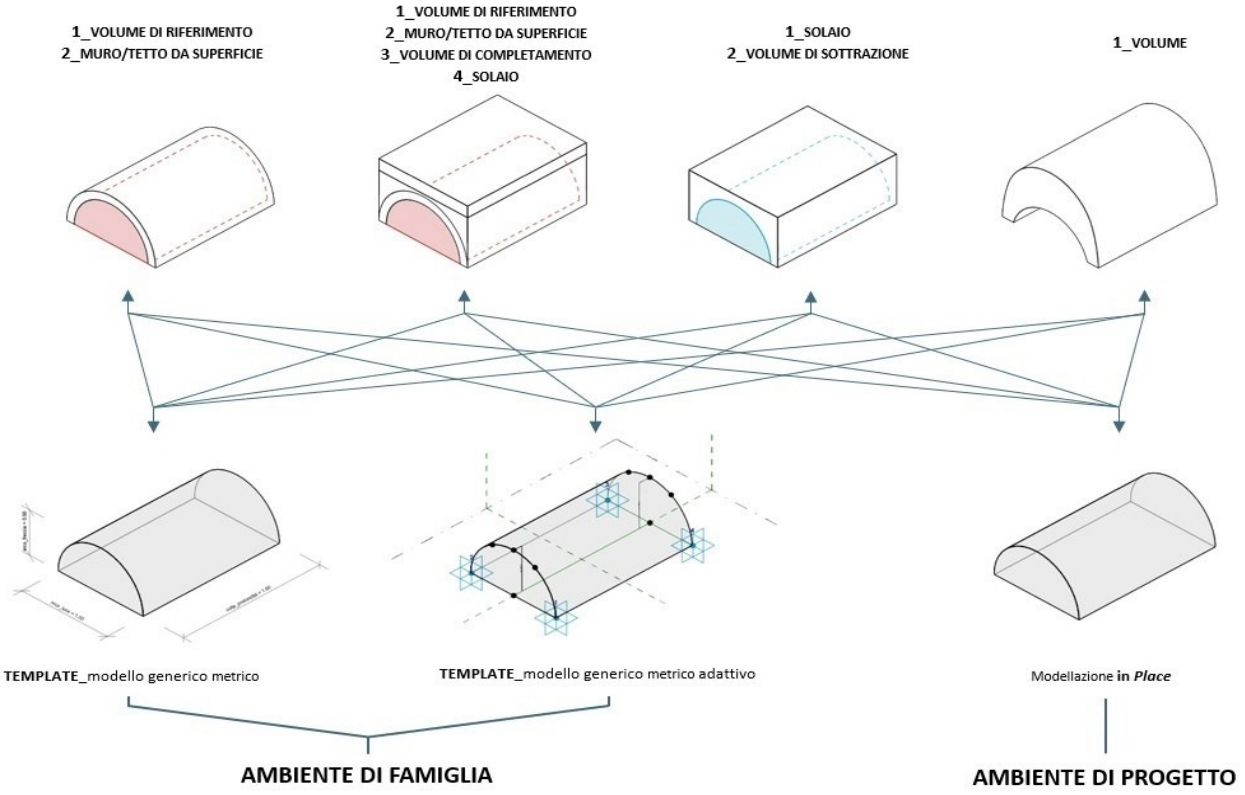


Fig. 109 – Modellazione delle volte in *Autodesk Revit*.

Fonte: DI LUGGO, et al., 2018.

Per l'Archivio di Stato, le acquisizioni metriche *reality based* hanno consentito di rilevare in modo accurato le dimensioni delle coperture voltate, la cui misurazione sarebbe risultata difficile da ottenere con le tecniche tradizionali. Grazie all'utilizzo di sistemi di acquisizione di ultima generazione e alla manipolazione del dato in ambiente digitale, è stato infatti possibile analizzare le forme del reale, mettendo in luce i rapporti metrici e geometrici che sottendono le curvature che caratterizzano le volte esaminate, estrapolandone punto per punto la morfologia, direttamente in 3D o attraverso viste di sezione.

Per la realizzazione del modello HBIM di tali elementi, si è scelto di sperimentare due procedure distinte la cui differenza operativa va

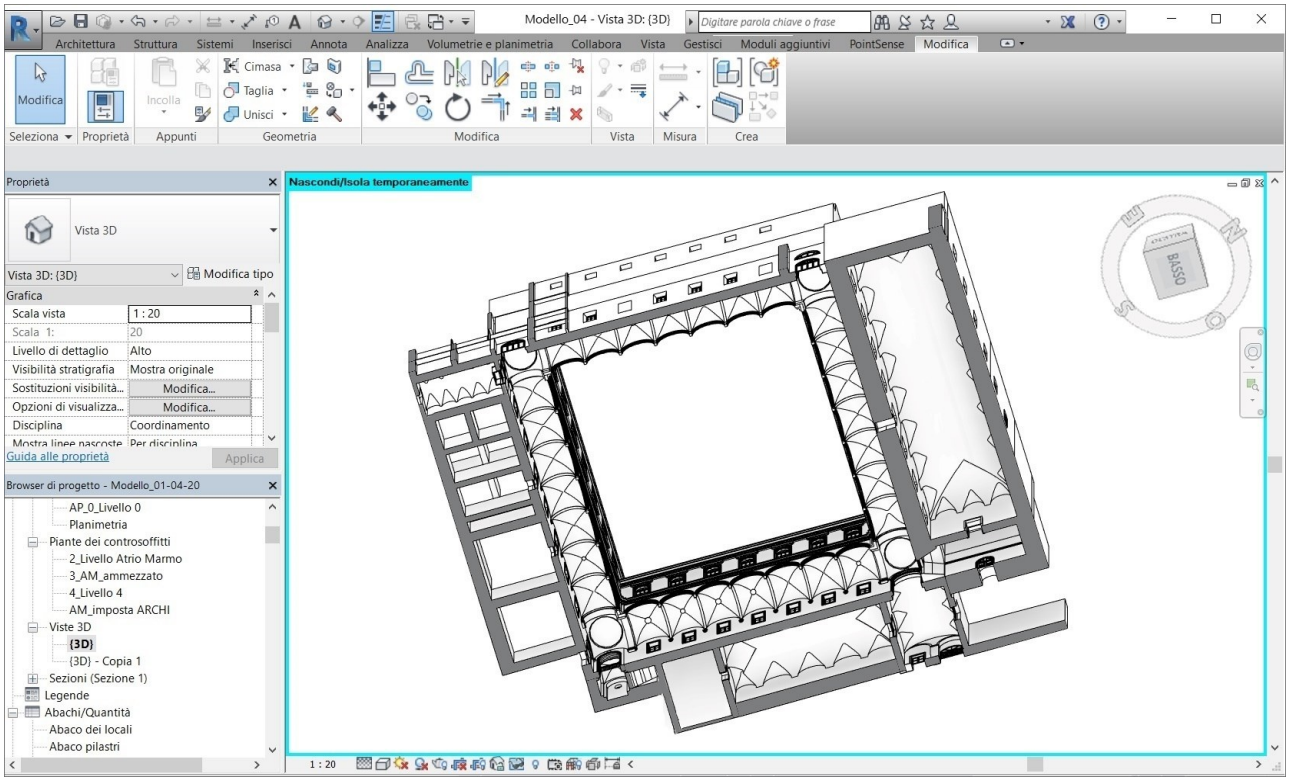


Fig. 110 – Vista dal basso dell'area dell'Atrio dei Marmi modellata in *Autodesk Revit* con inserimento di alcune delle coperture voltate.

Elaborazione S. Scandurra.

ricondotta alla specifica conformazione delle volte analizzate e a diversi livelli di accuratezza – oltre che informativi – raggiungibili a partire dal livello di conoscenza acquisito: da un lato si è scelto di costruire un modello di volta parametrico reso adattabile secondo le regole geometriche desunte dal tipo e costruito col supporto del *template* di *famiglia modello generico metrico adattivo*; dall'altro si è scelto di costruire un processo utile a strutturare il modello direttamente a partire dai punti della nuvola. In questo secondo caso si è ritenuto necessario ricorrere al supporto di *Dynamo*, software di programmazione visuale direttamente interoperabile con *Autodesk Revit*.

Nella concezione complessiva dei modelli di volta, avendo riscontrato nel caso studio una consistente presenza di volte di pari tipologia sebbene di dimensioni diverse, si è scelto di non utilizzare *modellazioni locali*, ma di

sperimentare procedure atte a riutilizzare e adattare il modello ai diversi casi simili, per velocizzarne i tempi di esecuzione. Inoltre, le modellazioni locali rendono il modello notevolmente pesante da gestire.
Sono dunque state analizzate procedure idonee ad agevolare la fase di modellazione, tenendo ugualmente conto dell'accuratezza del dato rilevato e della documentazione disponibile. Inoltre, considerando il livello di conoscenza iniziale, non si è ritenuto opportuno procedere con una modellazione per conci o per strati, poiché tale dato è stato solo ipotizzato ma non verificato, mentre si è scelto di associare al modello le informazioni raccolte relativamente alla finitura superficiale delle volte documentate.

Sono state pertanto sperimentate le due procedure suddette, analizzando in particolare le volte a crociera dei corridoi che definiscono l'Atrio dei Marmi e la volta a botte con lunette sferoidiche che caratterizza la Sala Tasso.
In entrambi i casi, il risultato atteso ha riguardato la messa a sistema di una procedura che, a partire dalle regole individuate nel modello teorico delle volte analizzate, fosse tale da rendere il modello reiterabile e applicabile a tutti i casi di elementi simili, semplificando e sveltendo le operazioni di modellazione in ambiente HBIM.

a) Le volte a crociera dell'Atrio dei Marmi
Per strutturare il modello delle volte a crociera che definiscono *l'Atrio dei Marmi* dell'Archivio di Stato di Napoli, si è innanzitutto analizzata la geometria acquisita attraverso il rilievo *reality-based*. Il modello geometrico individuato non è inteso come modello anonimo e generico ma, piuttosto, come frutto di un processo di conoscenza del reale riconducibile a precise regole[168].

168 C. Bianchini, A. Ippolito, (2010). *Survey, modeling and analysis of vaulted structures and domes: towards a systematic approach*, Congreso International de Expresion Grafica Arquitectonica de Valencia, Actas volumen I, pagg 95-100.

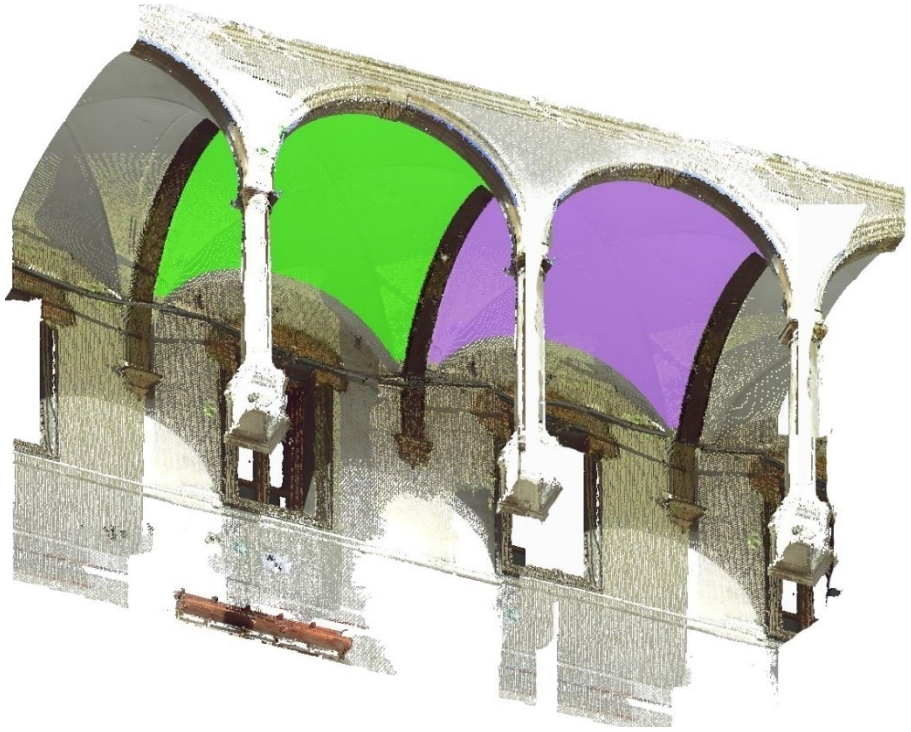


Fig. 111 – Estrazione in *Autodesk ReCap* delle porzioni di nuvola inerenti le volte a crociera dell'Atrio dei Marmi.

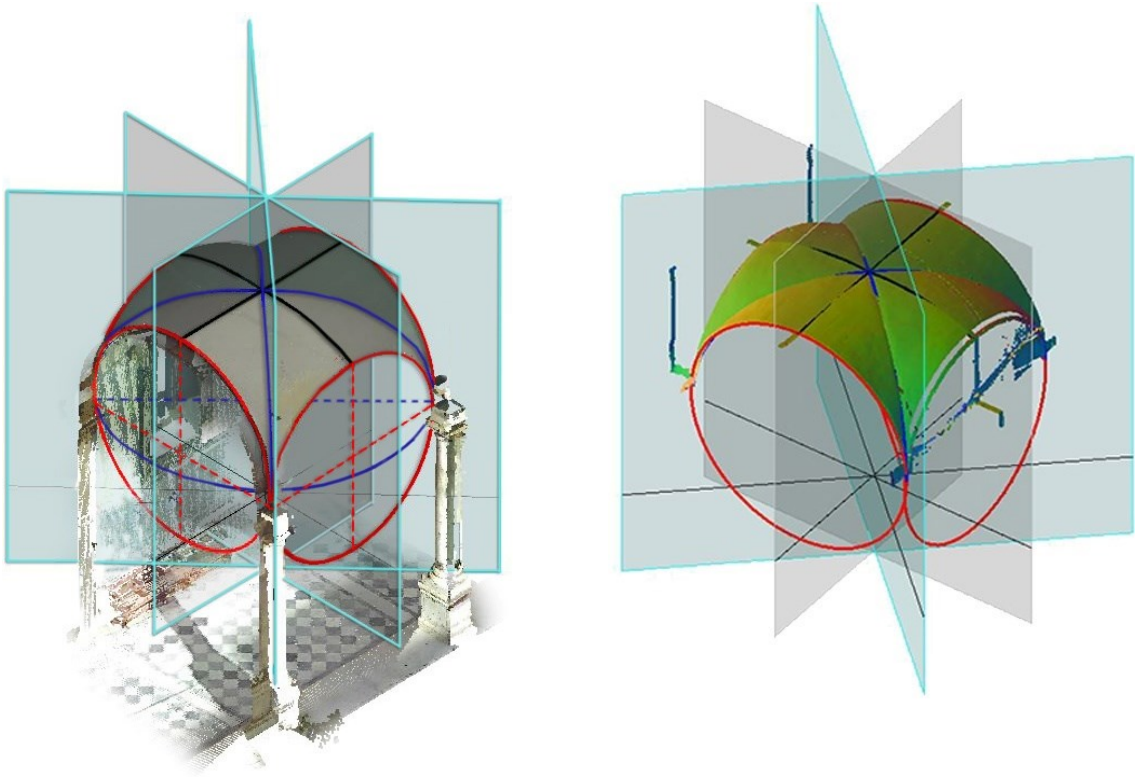
Elaborazione S. Scandurra.

Fig. 112 – (pagina successiva) Analisi geometrica dei profili della volta a crociera.

Elaborazione S. Scandurra.

Con l'utilizzo della *section box* in *Autodesk ReCap* sono state estratte singolarmente le porzioni di nuvola di punti delle diverse volte a crociera del corridoio dell'Atrio; sulla singola volta sono state operate sezioni successive in più punti e secondo diversi orientamenti (parallele ai fronti, perpendicolari ai fronti e lungo le diagonali), per valutarne le eventuali irregolarità lungo il proprio sviluppo e, soprattutto, per determinare la regola di costruzione geometrica più aderente alle curve rilevate (Fig. 111; Fig. 112). Ciò ha consentito di riconoscere che le volte a crociera dell'Atrio dei Marmi sono costituite da due unghie di tipo cilindrico e due unghie di tipo sferoidico a raggio costante frontale (Fig. 113).

Successivamente sono state estratte le curve direttrici delle unghie semicilindriche, analizzate attraverso la diretta comparazione con le



costruzioni geometriche di base (cerchio, ellisse, ovale), operando in maniera tradizionale sulla sezione bidimensionale estratta, nell'ottica di poter approssimare al meglio il modello geometrico di base (Fig. 114)
Alla stessa maniera si è operato per le curve costituenti le unghie sferoidiche.
A partire da queste prime operazioni è stato definito il modello geometrico più affine al caso specifico e, da un'osservazione comparativa, è stata stabilita la natura dei parametri utili a generalizzare il modello rendendolo utilizzabile in maniera reiterata.
Per la costruzione della forma si è scelto di utilizzare il *template modello metrico generico adattivo* per sfruttarne le caratteristiche di flessibilità non riscontrate nelle altre costruzioni ammesse dal software[169].

[169] Cfr. CAP. 3.

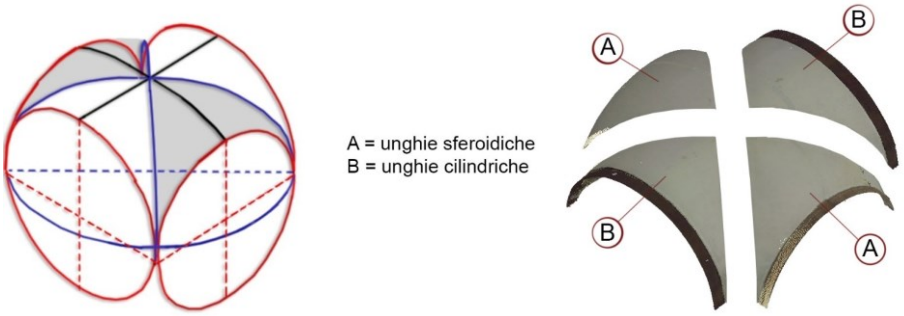


Fig. 113 – Le unghie delle volte a crociera si presentano uguali a due a due: cilindriche le unghie poste longitudinalmente al corridoio dell'atrio e sferoidiche quelle trasversali.

Elaborazione S. Scandurra.

La modellazione ha seguito nello specifico le seguenti fasi:

- individuazione del numero di *punti adattivi* necessari;
- impostazione dei piani;
- costruzione delle curve con relativi parametri;
- trasformazione in elemento tridimensionale.

Per la particolare conformazione delle lunette sferoidiche, le funzionalità di modellazione offerte dal *template* non hanno consentito di replicarne le regole di costruzione geometrica, ottenendo quindi una curvatura finale simile, ma non del tutto coerente nell'impostazione parametrica e nella strutturazione stessa. È vero infatti che *Autodesk Revit* non nasce per modellare superfici complesse. È stato necessario pertanto ricorrere ad una schematizzazione del modello ulteriormente semplificata, nell'ottica di realizzare una forma ideale dell'intradosso della volta facilmente replicabile e ridimensionabile.

Per comprendere i perché delle scelte successive è necessario riportare una considerazione dipendente dall'architettura del software *Autodesk Revit*: i volumi che si realizzano possono essere identificati sia come *solidi* e quindi essere utilizzati in quanto tali, sia come *vuoti*, e quindi essere utilizzati come forme da sottrarre a qualcos'altro.
Considerando che il modello è rappresentativo del vuoto di intradosso alla volta, caratterizzarlo in quanto tale consente di sottrarre la propria forma da un oggetto *pavimento* (solaio) semanticamente riconosciuto nelle piattaforme (SCANDURRA, et al., 2017), ottenendo così che la forma

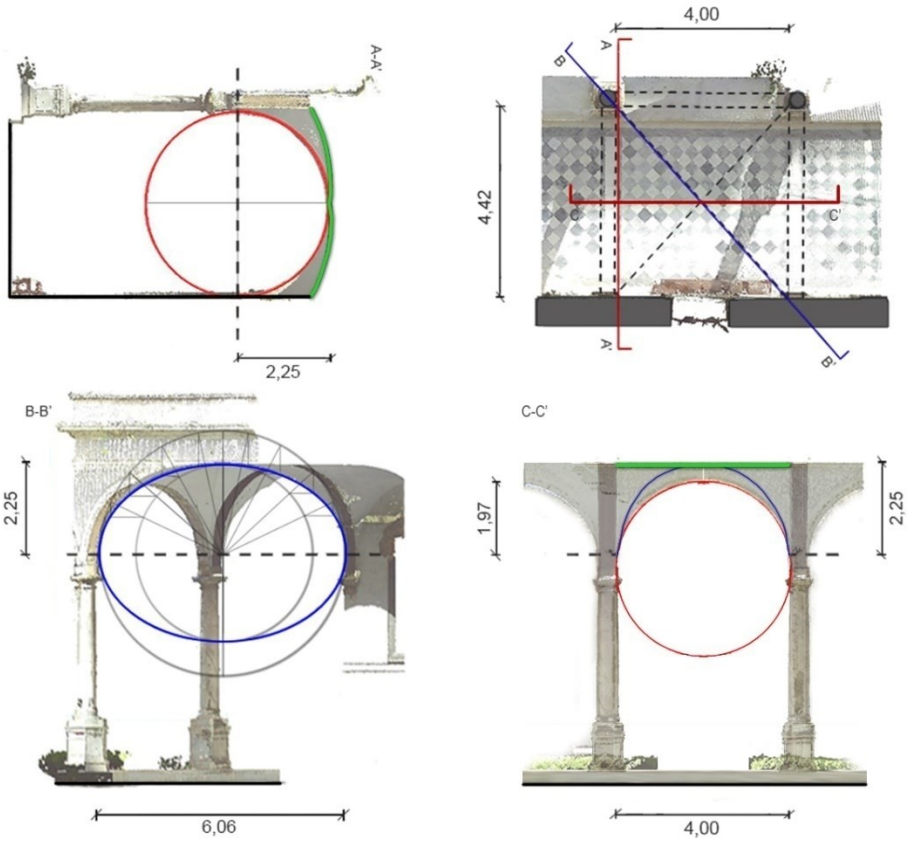


Fig. 114 – Analisi delle curve attraverso ortofoto di sezione della nuvola di punti.

Elaborazione S. Scandurra.

finale di tale *solaio* sia coerente con la tipologia di volta presente nella realtà analizzata (Fig. 115).

Tale soluzione fornisce un ottimo risultato dal punto di vista dell'adattabilità della forma e un risultato grafico adeguato ad una visualizzazione di dettaglio basso (priva di stratigrafie) nei casi di volte in muratura piena sormontate da un solaio piano.

Vanno segnalate le incongruenze informative che derivano da tale processo e in particolare: il *pavimento* da svuotare è modellato inizialmente come un parallelepipedo con spessore assunto pari all'altezza tra imposta della volta e calpestio superiore e, poiché in *Autodesk Revit* la sottrazione è esclusivamente visiva, nelle abacature l'informazione associata al solaio rimane pari all'altezza inizialmente modellata, generando confusione

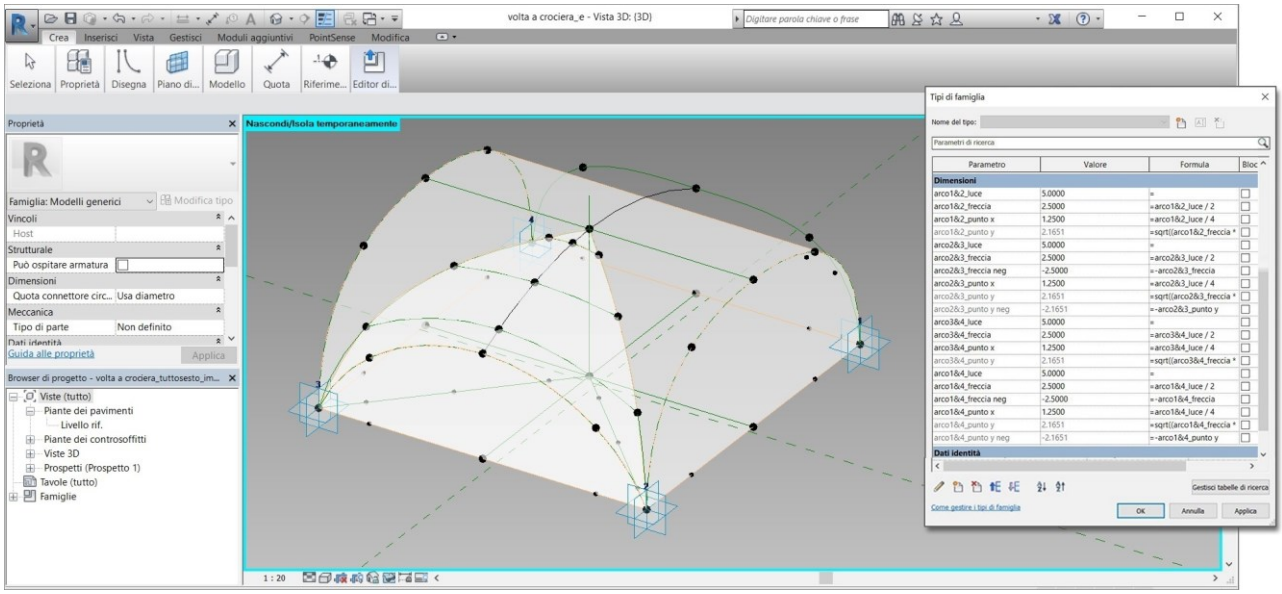
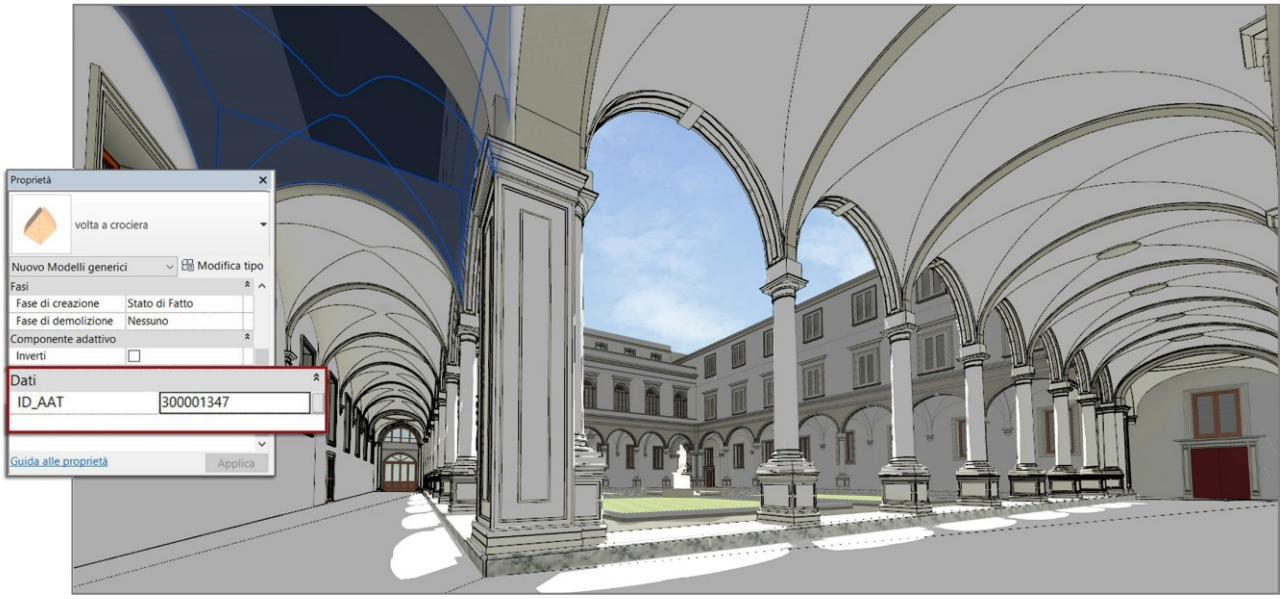


Fig. 115 – Impostazione del *modello adattivo* della volta a crociera.

Elaborazione S. Scandurra.

anche nelle volumetrie o nelle stime dei materiali. Inoltre, la stratigrafia materica del solaio rimane esclusivamente orizzontale, ovvero adeguata alle stratigrafie del calpestio superiore ma non a quelle di intradosso della volta.

In alternativa, la *famiglia adattiva* rappresentativa del volume sotteso alla volta può essere utilizzata esclusivamente come riferimento, al fine di generare un oggetto coerente con le categorie semantiche previste dal software oltre che con l'elemento volta stesso. In tal senso si possono utilizzare le funzionalità *tetto* o *muro da superficie* (DI LUGGO, et al., 2018), ottenendo un pacchetto *muro* o *tetto* – con relative stratigrafie – aderente e quindi sagomato alla superficie della famiglia importata, acquisendone le informazioni materiche, la categoria e l'implicito comportamento nei confronti degli elementi adiacenti. Lo svantaggio maggiore rispetto alla precedente soluzione consiste nella staticità della forma dell'oggetto finale, variabile esclusivamente nella composizione materica ma non gestibile parametricamente nelle sue dimensioni. Gli strati materici seguiranno inoltre tutti lo stesso andamento, parallelo alla superficie dell'oggetto utilizzato come riferimento, e quindi tutti curvilinei, senza possibilità di



relazione con il solaio piano superiore, modellato come oggetto a sé stante. L'informazione sullo strato intermedio (rinfianco e alleggerimento), a meno di onerose modellazioni *ad hoc*, rimane del tutto vuoto.

Nel caso dell'Archivio di Stato di Napoli, non avendo alcuna informazione sulle stratigrafie interne, si è ritenuta soddisfacente l'ipotesi di svuotamento, consapevoli della possibilità di implementare in qualunque momento il dato modellato.
Considerando l'impossibilità di inserire l'oggetto digitale in una categoria adeguata al suo significato, si è scelto di ricorrere al già citato tesauro AAT del Getty e creare pertanto in *Autodesk Revit* un nuovo campo nelle voci dei *parametri di progetto*, chiamato ID_AAT, utile a mettere in relazione l'oggetto volta e tutti gli altri oggetti del modello, con il codice univoco (ID) del concetto semantico ad esso più affine[170] (Fig. 116). In particolare,

Fig. 116 – Vista d'insieme delle volte a crociera dell'Atrio dei Marmi e del relativo parametro di identificazione ID_AAT.

Elaborazione S. Scandurra.

[170] Nel caso dei modelli di volta ottenuti per svuotamento, l'informazione è associata al volume rappresentativo dell'intradosso della volta, definito come *vuoto*, ovvero un elemento che in realtà non esiste ma senza il quale la forma del solaio non corrisponderebbe alla tipologia di volta individuata.

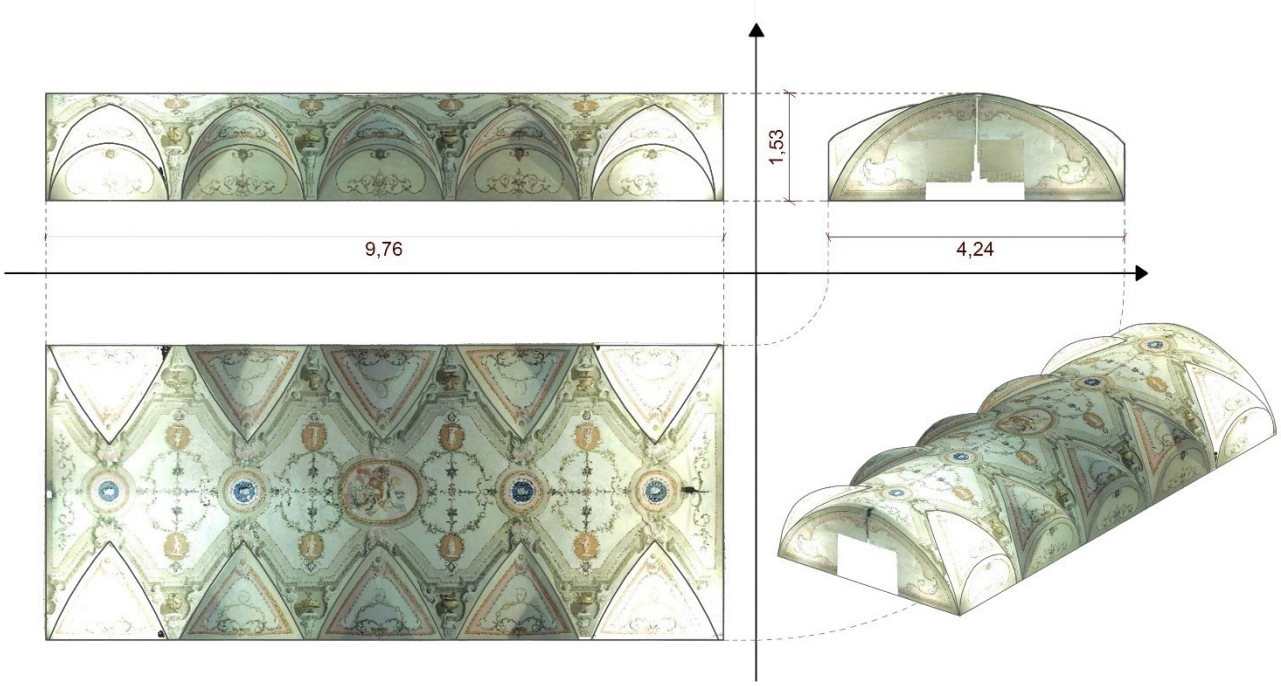


Fig. 117 – Nuvola di punti del rilievo laser scanner della volta della Sala Tasso in proiezione ortogonale.

Elaborazione S. Scandurra.

trattandosi di volta a crociera, è stato associato l'ID_AAT 300001347, rappresentativo del concetto *cross vault*: c*ompound vaults in which barrel vaults intersect forming ridges called groins*.

b) <u>La volta a botte con lunette sferoidiche della sala Tasso</u>

La volta a botte con lunette sferoidiche presente nella sala Tasso, similmente alle volte a botte con teste di padiglione e lunette sferoidiche presenti nella sala Catasti e nella sala Filangieri, situate in prossimità dell'Atrio dei Marmi, ha comportato il ricorso al software di programmazione visuale *Dynamo*[171] e la strutturazione di un approccio

[171] Il linguaggio di programmazione visuale (VPL) consente la programmazione tramite la manipolazione grafica di elementi anziché attraverso la scrittura esplicita di un codice informatico. In Dynamo la logica è definita di tipo "*boxes and arrow*", ovvero ogni nodo (*box*) consiste in una specifica istruzione già programmata (porzione di codice) che l'utente può comporre secondo sequenze personalizzate semplicemente attraverso ponti di collegamento (*arrow*). L'operazione è assimilabile all'attivazione operativa di diagrammi di flusso.

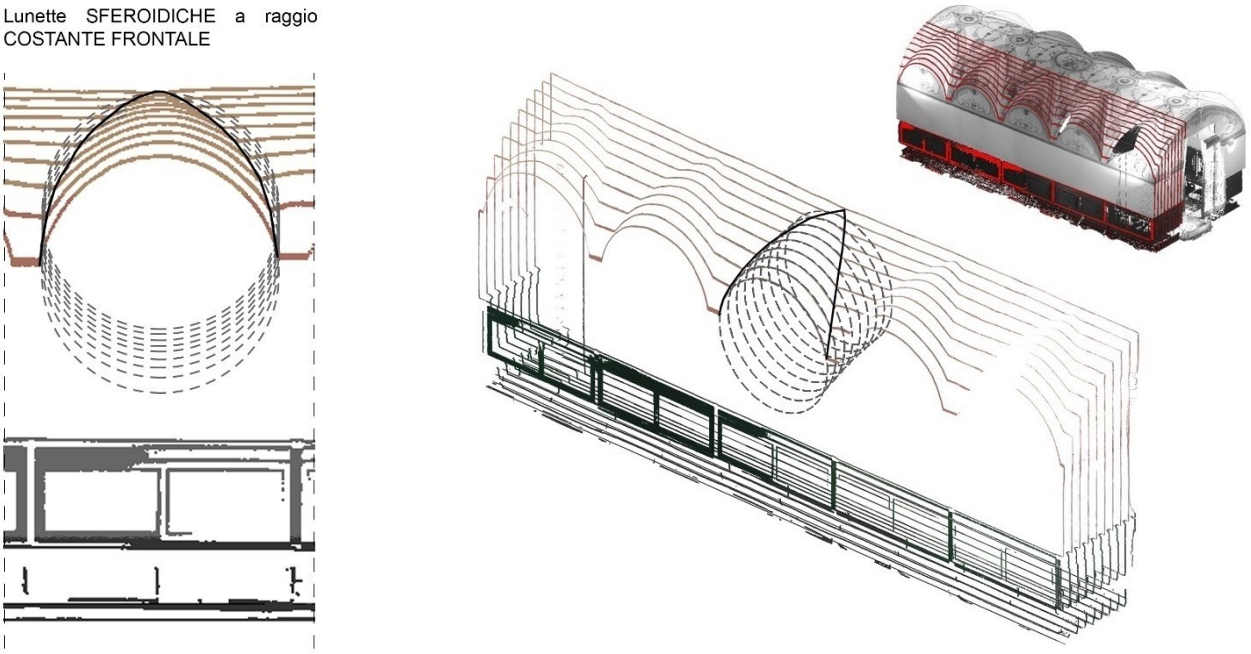


Fig. 118 – Attraverso *slice* distanti 15 cm si è verificata la natura sferoidica delle lunette della Sala Tasso, di tipo a raggio costante frontale.

Elaborazione S. Scandurra.

metodologico e operativo differente rispetto a quello delle volte a crociera, più orientato all'automazione e alla riduzione degli scarti tra nuvole di punti e modelli derivati. Ciò perché in questo caso, volendo documentare anche gli affreschi e gli stucchi presenti sulle superfici, un modello geometrico ideale avrebbe generato eccessive incoerenze nella disposizione delle lunette e nell'individuazione dei bordi che segnano la superficie voltata decorata, soprattutto in considerazione delle limitate possibilità di modellazione di superfici complesse – come visto per le unghie sferoidiche – attraverso le funzionalità interne ad *Autodesk Revit*.

La volta della Sala Tasso (Fig. 117) si sviluppa su un ambiente di forma rettangolare, la cui base misura circa 4,24 x 9,76 m, con variazioni massime di ±0,05 m lungo il proprio sviluppo, e si innesta ad un'altezza di circa 2,55 m dal piano di calpestio della sala, con una leggera rotazione del piano di imposta che rende la quota variabile anch'essa di circa 0,05 m. In chiave, l'altezza massima misurata è di 4,08 m. La volta a botte principale, si completa con cinque lunette sferoidiche per lato, tutte a raggio frontale costante (Fig. 118). Le curve di imposta delle lunette sono distanziate circa

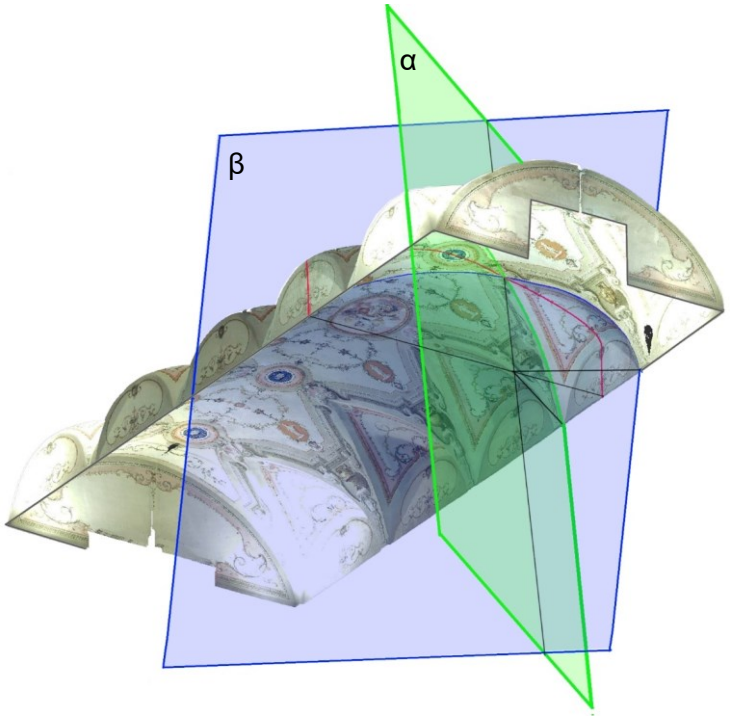


Fig. 119 – Estrazione delle curve della lunetta: in rosso il piano che intercetta la lunetta in mezzeria, in verde e blu i piani intercettanti le curve diagonali.

Elaborazione S. Scandurra.

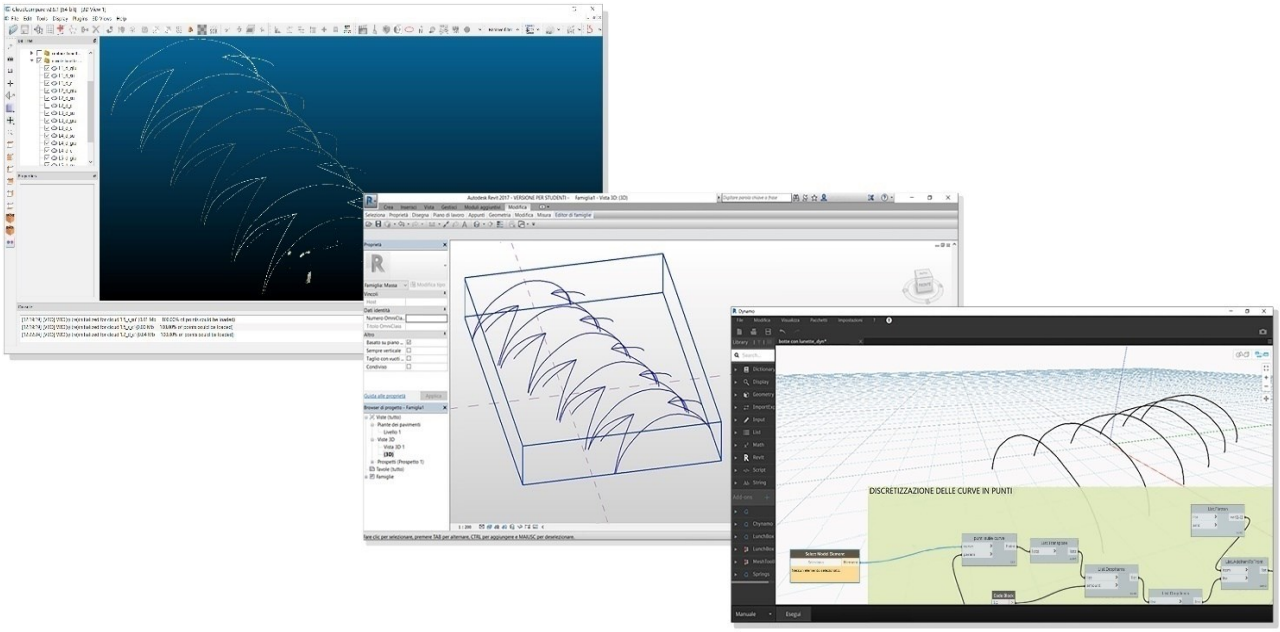
Fig. 120 – (pagina successiva) Le curve estratte in *Cloud Compare* dalla nuvola di punti, sono state importate nel *template* di *famiglia massa generica* di *Autodesk Revit* e poi utilizzate come *input* in *Dynamo*.

Elaborazione S. Scandurra.

0,12 m l'una dall'altra, e definiscono un piano allineato con i piedritti della volta. Mentre l'imposta di tali curve coincide con l'imposta della volta a botte principale, l'altezza di chiave è a 3,40 m dal piano di calpestio e la corda misura circa 1,85 m. L'intera superficie intradossale della volta è stata affrescata tra il XVII e il XIX secolo con motivi floreali e finte modanature, in stile neoclassico.

La specifica morfologia dell'elemento architettonico e la preventiva identificazione aiutano a stabilire la posizione e il numero minimo di sezioni necessarie alla sua definizione. Per costruire il modello geometrico ideale, in considerazione del tipo, i profili indispensabili da analizzare sono solo cinque:

- la direttrice della botte principale;
- le due curve diagonali della lunetta;
- la curva di mezzeria della lunetta;
- la curva di imposta della lunetta.



Tali profili non sono però sufficienti nella realizzazione di un modello più possibile aderente alla nuvola in quanto l'uguaglianza tra le lunette o nell'andamento in sezione della volta a botte è una semplificazione non riscontrata nell'elemento costruito.

Dal punto di vista metodologico si è allora scelto di estrapolare, direttamente dalla nuvola di punti, diversi profili lungo lo sviluppo longitudinale della volta a botte principale, facendo attenzione ad evitare le porzioni lunettate e, per ognuna delle lunette, i profili relativi alle sezioni in mezzeria e alle curve diagonali di intersezioni con la volta a botte (Fig. 119). Tale operazione è stata svolta col supporto della funzione di *estrazione assistita dei bordi* del software *Cloud Compare* che estrapola i punti della nuvola in corrispondenza di piani di sezione stabiliti dall'utente, trasformandoli in una polilinea vettoriale[172].

[172] Attraverso il *tool Cross Section*, è stato creato uno *slice* della porzione di nuvola in corrispondenza della sezione analizzata e, con il comando *Contour*, è stata generata la

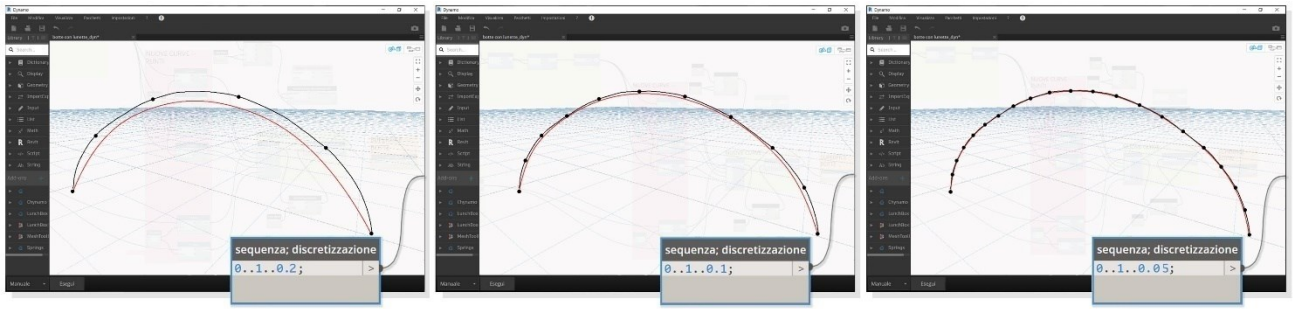


Fig. 121 – Curva importata (nero) e curva ricostruita (rosso) in *Dynamo* per la Sala Tasso, secondo più valori di infittimento del passo di discretizzazione.

Elaborazione S. Scandurra.

Le sezioni estratte sono state raggruppate per appartenenza alla volta a botte, alle lunette di destra e alla lunetta di sinistra, e importate in un template di *famiglia* di *Autodesk Revit* per essere utilizzate come *input* nella definizione scritta col software *Dynamo* (Fig. 120), generando un processo di *Computational Design*[173] specifico per le volte a botte con lunette sferoidiche.

Dynamo consente di gestire geometrie complesse, di concatenare modifiche e processi e di automatizzare procedure ripetitive. Le piattaforme di modellazione algoritmica sono basate su un principio diverso rispetto alle piattaforme di pura modellazione poiché ogni forma o comportamento è strutturato secondo algoritmi matematici che ne descrivono i processi che li rendono tali, ovvero secondo le regole che ne guidano la genesi. In tale contesto, ogni forma è costituita da un certo numero di punti, linee, piani o solidi e le *regole di forma* rappresentano le istruzioni che vengono applicate per la relativa generazione e messa in relazione[174] (MCGILL, 2001).

polilinea calcolata dall'interpolazione dei punti della nuvola selezionati. I profili sono salvabili in formato .dxf e quindi leggibili in software come *AutoCad* e *Autodesk Revit*.

173 Il *Computational Design* è un sistema algoritmico per la sintesi e l'analisi dei progetti che si basa sulla costruzione di un gruppo finito di regole o operazioni, facili da seguire e non ambigue (SAMPIETRO et al., 2018).

174 Si noti che in realtà tutto ciò che funziona come oggetto BIM è legato al concetto di grammatica delle forme poiché il modellatore non fa altro che realizzare un elemento

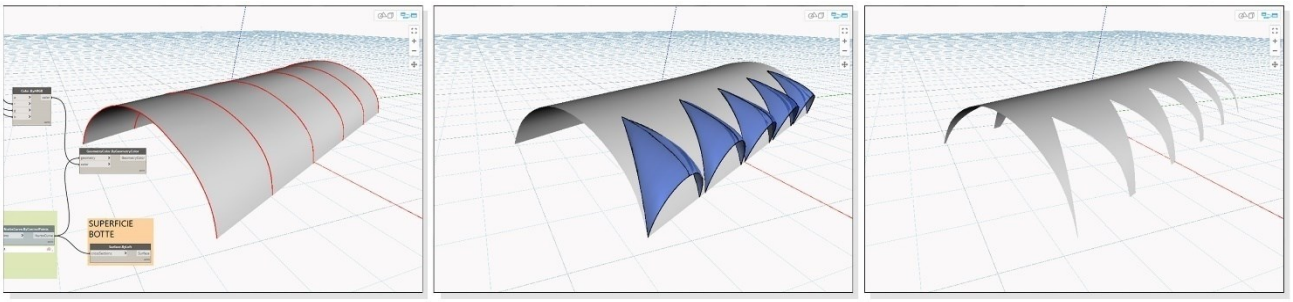


Fig. 122 – Costruzione in *Dynamo* della superficie della porzione di volta a botte della Sala Tasso.

Elaborazione S. Scandurra.

La connessione *Dynamo-Revit* consente di tradurre forme geometriche in elementi del modello BIM, mantenendone le funzionalità di editazione e di gestione parametrica tipica della modellazione algoritmica: l'oggetto concepito ed eventualmente modificato in *Dynamo* infatti, si aggiorna in tempo reale anche in *Autodesk Revit*. Tale aspetto è di particolare importanza in quanto lo strumento consente di realizzare forme difficili da ottenere in *Autodesk Revit*, rendendole parametriche e dunque reiterabili nelle diversificazioni presenti nell'edilizia storica. In particolare, i sistemi voltati ricorrenti nell'edilizia storica, si presentano in molti casi simili, perché appartenenti a specifici tipi che rispettano uguali regole generative e tecniche costruttive, senza però essere mai identiche.

A partire da queste considerazioni, la definizione scritta in *Dynamo* si è strutturata in quattro parti, ognuna con le relative possibilità variazionali:

- importazione delle curve generatrici della volta analizzata;
- generazione della superficie di intradosso;
- definizione degli spessori volumetrici;
- trasformazione in geometria *Revit*.

Per quanto riguarda le curve generatrici, come anticipato, si è scelto di ricorrere alle curve *reality-based*, selezionando direttamente i profili precedentemente estratti dalla nuvola come polilinea vettoriale e importati in *Autodesk Revit*, partendo dall'ipotesi che la traduzione della nuvola sia

secondo precise regole formali ed assegnandovi parametri e vincoli per governarne il comportamento.

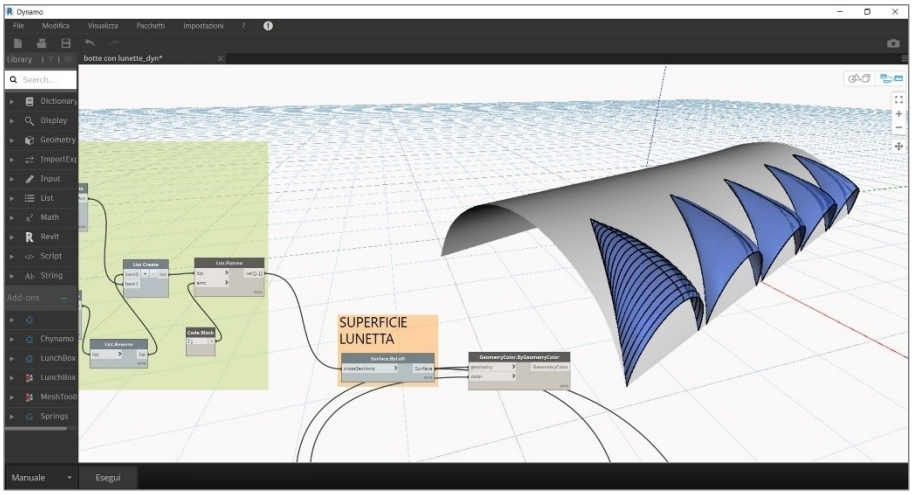


Fig. 123 – Costruzione della superficie delle lunette a partire dalle tre curve importate dalla nuvola e dalle regole di costruzione geometrica desunte dal tipo.

Elaborazione S. Scandurra.

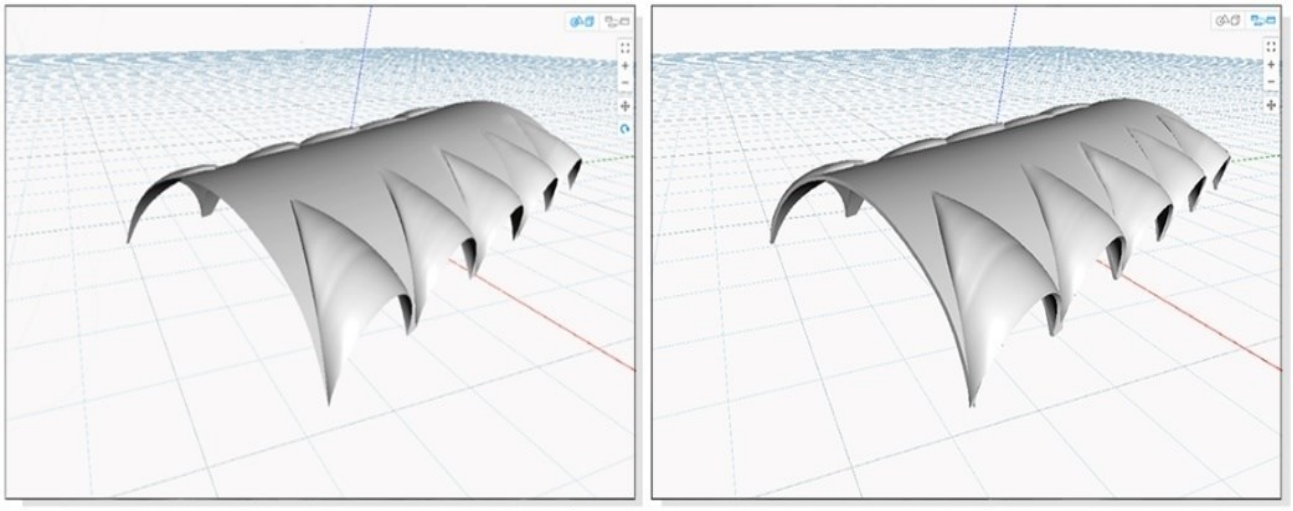
Fig. 124 – (pagina successiva) La superficie rappresentativa dell'intradosso della volta, è stata trasformata in volume riempiendo per gradi l'estradosso.

Elaborazione S. Scandurra.

scrupolosamente controllata. Tali profili, sono stati analizzati e ridisegnati dalla definizione scritta in *Dynamo*[175] secondo un passo di infittimento valutato in base all'aderenza alla curva originale, affinché fossero eliminate eventuali deformazioni derivanti da lacune o rumore della nuvola di punti (Fig. 121).

La trasformazione in superficie è avvenuta secondo algoritmi di costruzione di tipo NURBS. L'operazione si è strutturata in tre fasi, ovvero la costruzione della superficie della volta a botte, la costruzione della superficie delle lunette e l'eliminazione della superficie di volta a botte corrispondente al vuoto della lunetta (Fig. 122). Per la lunetta, in particolare, è stato necessario costruire e aggiungere direttamente in *Dynamo* la curva di imposta, evitandone l'estrazione automatica secondo la procedura operata in *Cloud Compare* poiché avrebbe restituito un dato non

[175] Nella definizione si è tenuto conto del fatto che le curve estratte direttamente dalle nuvole possono presentare delle irregolarità dovute a rumore o zone vacanti. Si è quindi previsto direttamente in *Dynamo* il ridisegno automatico della stessa in una curva *pulita* e *continua* aderente all'originale.



soddisfacente[176]. Pur partendo dalle curve *reality-based*, la scrittura della definizione *Dynamo* relativa alla costruzione della superficie ha tenuto conto della tipologia specifica di lunetta, ovvero sferoidica a raggio costante frontale, controllando quindi la similitudine tra gli archi di circonferenza paralleli al raggio di imposta (Fig. 123).
Il completamento della forma e la definizione degli spessori (Fig. 124) sono stati operati direttamente attraverso funzionalità di *Dynamo*, scegliendo di impostare la costruzione del volume attraverso un ispessimento della superficie nel verso dell'estradosso.
Il processo descritto risulta applicabile anche ad altre volte di analoga tipologia purché ne vengano estratte dalla nuvola le sezioni principali: sostituendo tali curve in *input*, la definizione restituirà direttamente il modello ad esse associato. Il processo è quindi adattabile.
Per completezza, si precisa che il *nodo* di importazione delle curve può essere sostituito dalla costruzione geometrica delle stesse, definita

176 L'estrazione delle curve in *Cloud Compare* avviene attraverso l'unione dei punti della nuvola intersecati con dei piani di sezione stabiliti dall'utente. Siccome la curva di imposta è disposta sullo stesso piano dei punti della nuvola rappresentativi della parete della Sala Tasso, non si riesce ad intercettarne il solo profilo attraverso un piano di sezione, per cui si è scelto di ricostruire la curva geometricamente in *Dynamo*.

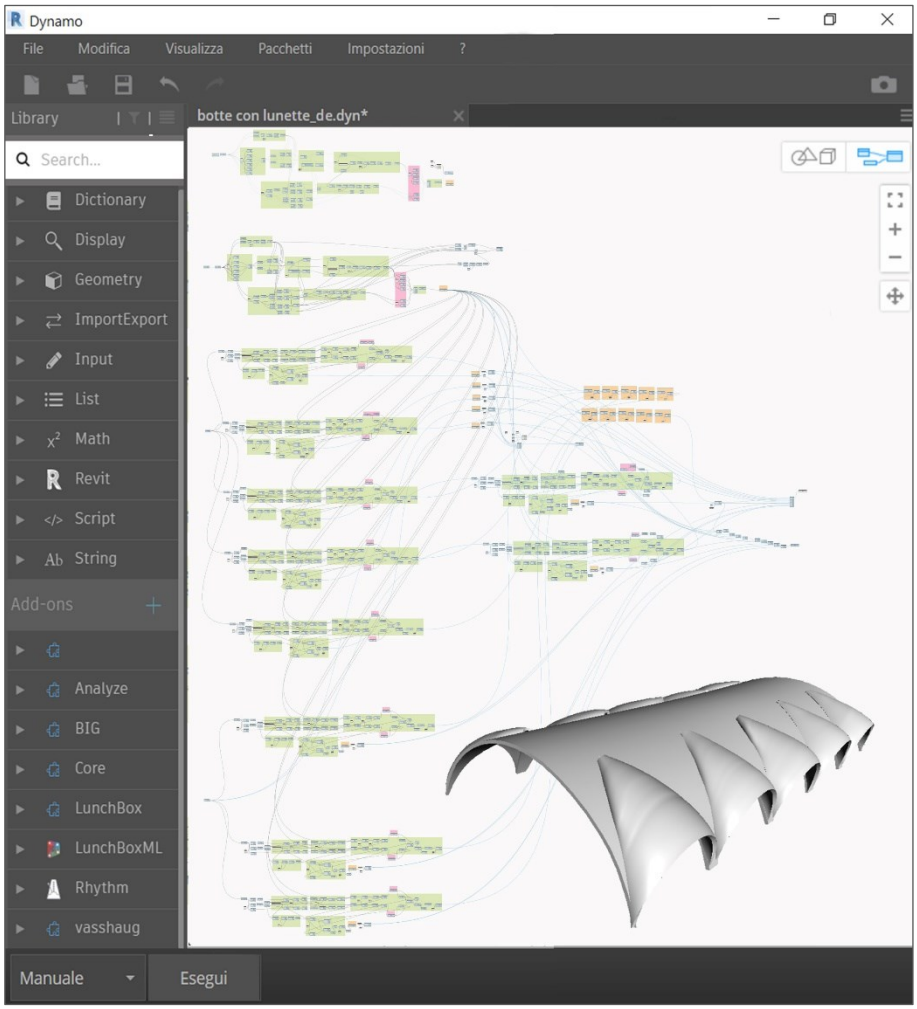


Fig. 125 – Interfaccia *Dynamo* per la strutturazione del modello di volta.

Elaborazione S. Scandurra.

dall'algoritmo più idoneo a riprodurne la specifica forma, ottenendo in tal modo il modello geometrico ideale della tipologia. L'utilità dell'una o dell'altra ipotesi continua ad essere dipendente dagli scopi della modellazione: da un lato si ottengono accuratezza metrica e percezione verosimile della configurazione spaziale; dall'altro se ne possono ricavare i processi geometrici conformativi con maggiore chiarezza (LANZARA, et al., 2019). L'insieme dei due dati consente una lettura esaustiva e declinabile secondo più scopi.

Uno svantaggio della procedura consiste nella unidirezionalità del dato prodotto in *Dynamo* ovvero la modifica dei parametri della geometria importata in *Autodesk Revit* può avvenire solo attraverso l'interfaccia *Dynamo* (SAMPIETRO, et al., 2018).

7.5.2 Caratterizzazione delle superfici affrescate

Le procedure proposte per le volte a crociera dell'Atrio dei Marmi e per la volta a botte lunettata della Sala Tasso sono state sperimentate nell'ottica di trovare soluzioni appropriate per la rappresentazione tridimensionale delle superfici voltate in sistemi HBIM.

Ciò che è evidente nell'ottica di un processo di documentazione HBIM, è la necessità di riproporre, all'interno di un unico modello integrato, sia la realtà nella sua configurazione apparente – e per essa la nuvola di punti quale calco del reale, che ne riproduce anche gli aspetti superficiali quali affreschi e decorazioni –, sia ciò che è sotteso al reale e dunque la sua conformazione geometrica, nonché gli aspetti tecnologici e costitutivi e le relazioni con il contesto compositivo e strutturale in cui si colloca.

Nella documentazione delle sale dell'Archivio di Stato di Napoli, tale circostanza appare evidente soprattutto in considerazione della vasta presenza di stucchi e affreschi a completamento delle superfici voltate le cui peculiarità e apparenze, chiaramente significative nella caratterizzazione dell'elemento stesso, non potrebbero essere replicate nel modello se non a costo di un lavoro molto oneroso e poco significativo in termini percettivi.

La volontà di riportare ugualmente nel documento HBIM questa specifica informazione è stata affrontata e risolta associando al modello – realizzato sulla base delle caratteristiche geometriche proprie dell'elemento – anche porzioni specifiche di nuvola di punti, rese *famiglia* attraverso l'utilizzo del già citato *Pointsense,* in modo da restituire un oggetto digitale utile ad ancorare ed esplicitare informazioni di altra natura (Fig. 126).

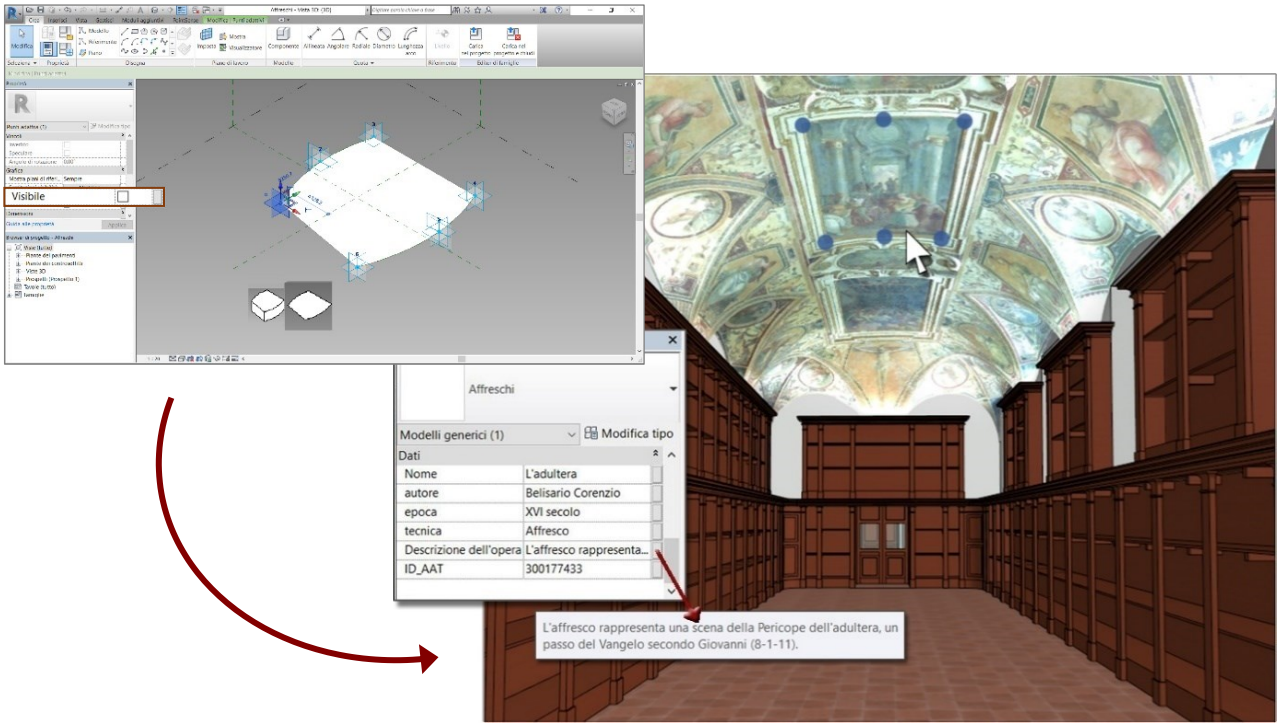
Attraverso l'associazione con porzioni di nuvola è stato infatti possibile ottenere una resa fotorealistica del 3D, percettivamente aderente al reale,

Fig. 126 – Sovrapposizione del modello con la porzione di nuvola di punti della volta della sala Tasso.

Elaborazione S. Scandurra.

e al contempo relazionata a modelli geometricamente corretti e coerenti con la fisicità dell'elemento in esame.

Se nella sala Tasso il motivo floreale degli affreschi realizza una composizione unica, in ambienti come la sala Catasti ogni porzione della volta è dedicata al racconto di una precisa parabola del Vangelo. In tal caso, la sola presenza combinata del modello tridimensionale derivato e della nuvola di punti non è sufficiente ai fini dell'esplicitazione puntuale del dato artistico. Valutando gli strumenti digitali offerti dalla piattaforma software e le possibili combinazioni, si è dunque scelto di ricorrere all'utilizzo di *famiglie* di *modelli generici metrici adattivi* per la realizzazione di superfici trasparenti di supporto nella mappatura delle diverse porzioni di affresco. Queste infatti sono state realizzate affinché i punti adattivi di controllo fossero dipendenti da superfici *host*, ovvero dalle superfici del modello 3D della volta esaminata. Avendo il supporto visivo della nuvola, ognuna delle *superfici adattive* è stata conformata sullo specifico quadrante di affresco ed è stata arricchita dei parametri utili a registrarne e



trasmetterne le relative informazioni, quali epoca di realizzazione, tecnica utilizzata, autore e descrizione, consultabili al *click* del mouse in corrispondenza dell'affresco o attraverso le specifiche abacature (Fig. 127). In tal modo, combinando le diverse tipologie di informazioni, l'oggetto reale trova piena corrispondenza con l'oggetto digitale, realizzando un *digital twin* capace di replicarne ad un tempo l'apparenza e la struttura formale. Dal punto di vista informativo, tale soluzione ha infatti consentito di gestire e georiferire nel modello i dati specifici sulle diverse porzioni di affreschi e stucchi.

Fig. 127 – Vista interna del modello della sala Catasti: il supporto della *superficie adattiva* - resa invisibile - consente di georiferire sulla nuvola e sulle superfici del modello le informazioni relative agli affreschi.

Elaborazione S. Scandurra.

CONCLUSIONE

Alla luce dell'attenzione rivolta dalla comunità scientifica ai sistemi BIM, la presente ricerca si è posta come occasione per sperimentare un processo che, a partire da acquisizioni 3D *no contact*, ne ha esplorato potenzialità e criticità in riferimento al patrimonio costruito, mettendo in evidenza il ruolo teorico e critico della rappresentazione per la costruzione di modelli chiari e consapevoli.

In tal senso, la ricerca ha dato luogo alla realizzazione di un modello di tipo HBIM con uno specifico approfondimento relativo alla modellazione di parti e di elementi. Ciò è stato realizzato prendendo in considerazione gli aspetti qualitativi e, al contempo, le caratterizzazioni geometriche di ognuna delle parti che compongono l'insieme, analizzandone gli aspetti distintivi e quelli più propriamente legati alla forma.

Come è stato ampiamente sottolineato nell'ambito del lavoro, i processi tipicamente utilizzati nei sistemi BIM non possono essere pedissequamente replicati per la modellazione del costruito storico, poiché sia la fase di raccolta documentale, che la fase di esplicitazione e di organizzazione del modello infografico, coinvolgono campi di indagine e tipologie di dati non considerati nel BIM "tradizionale".

Seppur inizialmente concentrata sulle problematiche di carattere tecnico legate agli strumenti disponibili per il BIM e non pensati per l'HBIM, la questione si è rivelata ricca di implicazioni di carattere teorico e metodologico con particolare riferimento alla mappatura dei dati rilevanti ai fini della modellazione del costruito storico. È stato pertanto messo a punto un *workflow* HBIM che, a partire dal rilievo e dalla raccolta dei dati, ha condotto alla predisposizione di un modello tridimensionale quale risultato di un processo di lettura critica delle forme e dei significati, utilizzabile come supporto per la conoscenza nonchè per la gestione degli interventi sull'esistente.

Nell'ambito della ricerca, è stata posta particolare attenzione alla documentazione relativa alla *modellazione del tempo*, sperimentando opportune modalità per documentare e visualizzare le trasformazioni del manufatto, adeguando le strumentazioni software alla specifica analisi. Il tempo è stato considerato in retrospettiva, desumendo dai documenti storici e dalle tracce esistenti dati utili a ricostruirne l'assetto nelle diverse fasi di vita. Nello specifico, le soluzioni documentali proposte per la trascrizione in HBIM hanno tenuto conto del livello di conoscenza acquisito sulla specifica informazione, proponendo una differenziazione negli esiti in base al livello stesso, coerentemente con i criteri di trasparenza che sono alla base dei processi HBIM. La soluzione a cui si è pervenuti ha consentito di graficizzare opportunamente il dato, sfruttando le caratteristiche spaziali di un modello tridimensionale arricchito da dati descrittivi, manipolabile attraverso specifiche *query*, e pensato allo scopo di favorire l'analisi storico-critica del manufatto indagato. In particolare, la scelta di operare una sovrapposizione in trasparenza del *dato modellato* per la documentazione dello *stato di fatto,* con il *dato modellato* relativo alle configurazioni precedenti ha condotto a soluzioni che consentono di operare confronti e il controllo puntuale delle informazioni.

Altro tema su cui è stata focalizzata l'attenzione è quello della *modellazione di elementi complessi* - con particolare riferimento alle volte - ricorrendo alla geometria per il riconoscimento dello specifico *tipo*. L'evidente scarto riscontrato tra la modellazione parametrica desunta dalle sole regole geometriche rispetto alle forme acquisite con tecnologie *reality based* è stato

superato proponendo un *workflow* alternativo, supportato da una piattaforma di modellazione visuale direttamente collegata al software di BIM *authoring* scelto. In questo modo è stato costruito un algoritmo specifico del *tipo* di volta analizzato, definendo il modello direttamente a partire dalle sezioni notevoli estratte dalla nuvola di punti. Similmente alle altre componenti di un modello BIM, è stato possibile assegnare uno spessore all'elemento volta, parametrizzabile nelle stratigrafie. Al fine di riportare nel modello HBIM anche altri dati quali stucchi, sculture, dipinti e affreschi, ritenendo eccessivamente oneroso e privo di significato proporne una ri-modellazione di elementi di dettaglio, si è fatto ricorso alla nuvola di punti quale prodotto adatto a descriverne puntualmente le cromie e le tessiture, implementando la stessa nuvola con i dati necessari a rendere esplicite le informazioni storico-artistiche dell'elemento rilevato. Per raggiungere tale obiettivo, la nuvola di punti è stata resa un oggetto HBIM, inserita in una famiglia specifica e opportunamente caratterizzata attraverso i parametri necessari a implementarla con dati descrittivi. Il modello di volta è stato allora completato con la sovrapposizione all'oggetto *point cloud* fotorealistico e metricamente accurato. Ciò ha consentito di fornire informazioni integrate sia dal punto di vista visuale che informativo.

I risultati a cui questa ricerca perviene si configurano quale piccoli tasselli che vanno ad inserirsi in un più ampio quadro di sperimentazioni condotte sul tema dell'applicazione dei sistemi HBIM al costruito storico a cui la ricerca stessa ha fatto riferimento nella fase iniziale e di inquadramento del lavoro. Si tratta infatti di un campo di ricerca ancora aperto la cui complessità appare evidente, risiedendo in particolare nel tentativo di coniugare esigenze diverse e cioè la variabilità e l'unicità delle soluzioni riscontrabili nel patrimonio storico, con la standardizzazione che la modellazione parametrica richiede, ma anche di far dialogare l'immensa quantità di dati acquisibile tramite tecnologie reality based - e la possibilità di modellarne il dettaglio, così come consente un modello BIM - con la necessaria sintesi che ogni processo di conoscenza richiede.

A tal proposito infatti appare chiara l'impossibilità di riversare l'immensa mole di dati acquisibili con tecnologie di nuova generazione in modelli

HBIM rischiando di produrre una replica digitale acritica del costruito, con un enorme dispendio di tempo. Vanno invece esplorate soluzioni alternative capaci di ottimizzare tempi, strumentazioni e dati, mediando il desiderio di esaustività con la costruzione di modelli schematici basati sulla individuazione di parti e di elementi che strutturano la forma. La ricerca si è inserita pertanto in tale solco presentando alcuni esisti che possono contribuire ad una più ampia riflessione sul tema, insieme ad altre possibili sperimentazioni volte a contemplare la formulazione di un modello centrale estremamente semplificato a cui associare dinamicamente schede di approfondimento.

La strutturazione di modelli digitali che siano in grado di riproporre le specificità del costruito storico attraverso una identificazione univoca dei dati e delle componenti costitutive è la sfida che interessa i sistemi HBIM, che può trovare delle prime soluzioni anche attraverso la connessione di prodotti della rappresentazione diversi, poiché è chiaro che la documentazione del patrimonio storico non può esaurirsi attraverso un unico prodotto digitale, sia esso CAD, BIM, NURBS, *mesh* o *point cloud*. Piuttosto, appare necessario definire quali siano le metodologie di acquisizione e di restituzione più adatte a descrivere le caratteristiche di un manufatto architettonico, strutturando i *limiti* informativi dei diversi sistemi e strumenti della rappresentazione digitale, prevedendone opportune ibridazioni, relazionabili e informatizzabili. L'integrazione tra piu tipologie di rappresentazione, infatti, come ad esempio la scelta di lasciare alcune cose solo sottoforma di nuvola, rende il modello HBIM un pretesto per mettere in relazione dati espressi da altri tipi di rappresentazioni.

Restano in ogni caso da implementare, nelle piattaforme BIM, *tools* di modellazione di forme libere, all'occorrenza caratterizzabili con dati materici diversi e secondo parametri personalizzabili, al fine di superare le attuali difficoltà nella riproduzione delle forme del costruito storico.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia di riferimento al testo

AURAEN, Hege, GJEMDAL, Hanne, (2016). *Object Modelling and Building Information Modeling,* Master Thesis, Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology.

BANFI, Fabrizio, CHOW, Lara, REINA ORTIZ, Miquel, OUIMET, Christian, FAI, Stephen, (2018). Building Information Modeling for Cultural Heritage: The Management of Generative Process for Complex Historical Buildings, in M. Ioannides (a cura di) *Digital Cultural Heritage. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10605. Springer, Cham.

BARLOZZINI, Piero, (2013). *Il modello in Architettura. Uno strumento di rappresentazione tanto arcaico quanto attuale*, in For.Ma.Re., collana diretta da Cesare Cundari, Aracne Editrice.

BARLOZZINI, Piero, TOMASSI, Francesca, (2014). *Modello fisico, grafico, digitale*, Roma, Aracne Editrice. ISBN: 978 88 548 7870 9.

BIAGINI, Carlo, DONATO, Vincenzo, (2017). Scan to BIM per il recupero di opere di ingegneria storica, in *Ananke Speciale GeoRes* 2017, pp. 159-164.

BIANCO, Isabella, LINGUA, Andrea Maria, PIUMATTI, Paolo, (2014). Il rilievo metrico dei tessuti edificati, in Manuale per il recupero del patrimonio architettonico di pietra, a cura di M. Zerbinatti 2014, P. 111-131. Edizioni della provincia di Verbano Cusio Ossola. ISBN: 978 88 901652 0 7.

BIANCHINI, Carlo (2014). Survey, modeling, interpretation as multidisciplinary components of a Knowledge System, in *SCIRES-IT* 2014, 4, 15–24.

BIANCHINI, Carlo, IPPOLITO, Alfonso, (2010). Survey, modelling and analysis of vaulted structures and domes: towards a systematic approach. In 13 Congreso

Internacional de expresion grafica arquitectonica.vol. 1. Valencia: Editorial de la Universitat Politecnica de Valencia, pp. 95-100, ISBN:9788483635490.

BIANCHINI, Carlo, INGLESE, Carlo, IPPOLITO, Alfonso, (2016). *Il contributo della Rappresentazione nel Building Information Modeling (BIM) per la gestione del costruito / The role of BIM for representation and managing of built and historic artefacts*, DisegnareCon, Volume 9, n16, 2016, pp. 10.1-10.9. (UR: http://disegnarecon.univaq.it) ISSN: 1828 5961.

BIANCHINI, Carlo, NICASTRO, Saverio, (2018). La definizione del Level of Reliability: un contributo alla trasparenza dei processi di Heritage-BIM, in *DN Building Information modeling, Data & Semantics*, vol.2, 2018. ISSN 26108755.

BOLOGNESI, Cecilia Maria, GARAGNANI, Simone, (2018). From a point cloud survey to a mass 3D modelling: Renaissance HBIM in Poggio a Caiano, in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2: 117-123.

BOLOGNESI Cecilia Maria, CAFFI, Vittorio, (2019). Extraction of primitives and objects from HSHAPES, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W9, 2019, 6–8 February 2019, Bergamo, Italia.

BOLPAGNI, Marzia, (2016). The many faces of 'LOD', in *BIM ThinkSpace*, https://www.bimthinkspace.com/2016/07/the-many-faces-of-lod.html.

BOLPAGNI, Marzia, CIRIBINI, Angelo Luigi Camillo, (2016). The Information Modeling and the Progression of Data-Driven Projects, in *Proceedings of the CIB World Building Congress 2016*: *Volume III. Building up business operations and their logic. Shaping materials and technologies*, pp. 296-307.

BORIN, Paolo, (2017). Parametri interoperabili e geometria: attualità dell'insegnamento del Disegno, in *Territori e frontiere della rappresentazione*, atti del 39° convegno internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione, Gangemi Editore.

BORNAZ, Leandro, (2006). *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, in Crosilla F., Dequal S., *Laser scanning terrestre*, edizioni CISM. ISBN: 88-85137-19-9.

BORTOT, Alessio, BOSCARO, Cristian, CECCHINI, Cristina, CONDORELLI, Francesca, CUNDARI, Maria Rosaria, PALMA, Valerio, PANAROTTO, Federico, SIVIERO, Luigi, (2017). TU-CULT. Rivelazioni architettoniche nelle chiese di Santa Giustina e di Santa Maria dei Servi a Padova, in *atti del 39° convegno internazionale delle discipline della rappresentazione*, Napoli 2017.

BRUMANA, Raffaella, ORENI, Daniela, RAIMONDI, Anna, GEORGOPOULOS, Andeas, BREGIANNI, Angeliki, (2013). From survey to HBIM for documentation, dissemination and management of built heritage: The case study of St. Maria in Scaria d'Intelvi, in *Digit. Heritage Int. Congr. 2013*, pp. 497-504.

BRUSAPORCI, Stefano, CENTOFANTI, Mario, (a cura di), (2008). *Modelli complessi per il patrimonio architettonico-urbano*, Gangemi Editore.

BRUSAPORCI, Stefano, CENTOFANTI, Mario, (a cura di), (2010). *Sistemi informativi integrati per la conservazione e la valorizzazione del patrimonio architettonico e urbano*, Gangemi Editore.

BRUSAPORCI, Stefano, MAIEZZA, Pamela, TATA, Alessandra, (2018). A framework for architectural heritage BIM semantization and development, in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.,* vol. XLII-2, 2018.

BRUSAPORCI, Stefano, (2017a). Ontological Issues in Architectural Digital Heritage Interdisciplinary world, in *International Journal of Computational Methods in Heritage Science*, Vol. 1, Issue 2, Luglio-Dicembre 2017.

BRUSAPORCI, Stefano, (2017b). The importance of being honest. In Ippolito, A., Emerging technologies for architectural and archaeological heritage. IGI Global, Hershey, PA, pp. 66-93.

CAPONE, Mara, (2009). *La genesi dinamica della forma*, Fridericiana Editrice Universitaria. ISBN: 978-88-8338-068-6.

CHEVRIER, Christine, CHARBONNEAU, Nathalie, GRUSSENMEYER, Pierre Jean-Pierre Perrin, (2010). Parametric Documenting of Built Heritage: 3D Virtual Reconstruction of Architectural Details, in *International Journal of Architectural Computing* 8-2.

CHIABRANDO, Filiberto, LO TURCO, Massimiliano, SANTAGATI, Cettina, (2017). Digital Invasion: from Point Clouds to Historical Building Object Modeling (H-BOM) of a Unesco WHL Site, in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W3: 171-178.

CLINI, Paolo, (a cura di), (2011). *Documentare l'architettura storica. Analisi, rilievo e progetto*, Aracne Editore, Ariccia (RM).

DORE, Conor, (2017). *Procedural Historic Building Information Modelling (HBIM) For Recording and Documenting European Classical Architecture*, doctoral thesis, DIT, 2017. doi: https://doi.org/10.21427/D7045G.

DALLA MORA, Tiziano, PERON, Fabio, CAPPELLETTI, Francesca, ROMAGNONI, Piercarlo, RUGGERI, Paolo, (2014). *Una panoramica sul Building Information Modelling (BIM)*, Milano, AiCARR. ISBN: 9788897323358.

DE FUSCO, Renato, PALMIERI, Nico, PASCA RAYMONDI, Giovanni, (1966). Note per una semiologia figurativa, in *Op. cit. selezione della critica d'arte contemporanea*, n. 07, Edizioni Il Centro, Napoli, settembre 1966.

DE FUSCO, Renato, (1971). Utilità storiografica di una dicotomia linguistica, in *Op. cit. selezione della critica d'arte contemporanea*, n. 20, Edizioni II Centro, Napoli, gennaio 1971.

DE LUCA, Livio, (2011). *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*. Dario Flaccovio Editore, 2011.

DEL GIUDICE, Matteo, OSELLO, Anna, (2013). BIM for cultural heritage, in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. XL-5/W2*, 2013, pp. 225-229. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-225-2013.

DELL'AQUILA, Mariella, DE ROSA, Agostino, (a cura di), (2000). *Proiezione ed Immagine: la logica della rappresentazione*, vol.1, Napoli, Arte Tipografica.

DI LUGGO, Antonella, SCANDURRA, Simona, (2016). La traduzione dal modello discreto al modello parametrico per la conoscenza del patrimonio architettonico nei sistemi HBIM, in *DisegnareCon*, vol. 9/n. 16 – Giugno 2016. ISSN: 1828 5961.

DI LUGGO, Antonella, SCANDURRA, Simona, PULCRANO, Margherita, SICONOLFI, Mirko, MONACO, Stefania, (2018). Sistemi voltati nei processi cloud to Bim, in Empler T., Valenti G. M. (a cura di), *3D Modeling & BIM Nuove Frontiere*, Dei Editore. ISBN: 978-88496194-1-6.

DI LUGGO, Antonella, PALOMBA, Daniela, PULCRANO, Margherita, SCANDURRA, Simona, (2019). Theoretical and methodological implications in the information modelling of Architectural Heritage, in *Impact of Industry 4.0 on Architecture and Cultural Heritage*, a cura di C. Bolognesi e C. Santagati, IGI Global.

DOCCI, Mario, (1985). *Manuale di disegno architettonico*, Edizioni Laterza.

DOCCI, Mario, (2009). *Disegno e analisi grafica*, Editori Laterza.

DOCCI, Mario, MIGLIARI, Riccardo, (1992). *Scienza della rappresentazione*, Carocci Editore.

EASTMAN, Chuck, (1974). An Outline of the Building Description System, in *Research report. Institute of Physical Planning*, 1974, 50, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh.

EASTMAN, Chuck, TEICHOLZ, Paul, SACKS, Rafael, LISTON, Kathleen, (2008). *Bim Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, John Wiley and Sons Editore.

EMPLER, Tommaso, (a cura di), (2016). *3D Modeling & BIM Applicazioni e possibili sviluppi*, DEI s.r.l. Tipografia Del Genio Civile, Roma.

ENGELBART, Douglas C., (1962). *AUGMENTING HUMAN INTELLECT: A Conceptual Framework*, Stanford Research Institute. http://www.1962paper.org/web.html.

FALLAVOLLITA, Federico, (2009). Le volte composte, in R. Migliari (a cura di) *Geometria descrittiva*, vol. 2, Città Studi Edizioni.

FERRARI, Federico, (2014). Integrazione tra sistemi BIM e sistemi di acquisizione tridimensionale: prospettive per lo sviluppo, in *Ingenio, web magazine*.

FRANCESCHETTI, Matteo, (2019). Modellazione del complesso e consapevolezza dell'errore, in *BIM Nation* n.2/2019.

GARAGNANI, Simone, (2012). *Scatole cinesi - Modelli digitali d'architettura tra CAAD e BIM*. Amazon Kindle, 2012. ISBN: 978 88 907652 0 9.

GARAGNANI, Simone, (2012b). Semantic Building Information Modeling and high definition surveys for Cultural Heritage sites, in *DisegnareCon*, numero speciale DOCO 2012.

GARAGNANI, Simone, (2013). Building Information Modeling and real world knowledge A methodological approach to accurate semantic documentation for the built environment, in *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 2013. Doi: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743788.

GARAGNANI, Simone, CINTI LUCIANI, Stefano, (2011a). Il modello parametrico in architettura: la tecnologia B.I.M. di Autodesk Revit, in *DisegnareCon,* Vol. 4, n. 7/2011.

GARAGNANI, Simone, CINTI LUCIANI, Stefano, MINGUCCI, Roberto, (2011b). Building Information Modeling: la tecnologia digitale al servizio del progetto di architettura, in *DisegnareCon,* giugno 2011. ISSN: 1828 5961.

GUARINO, Guarini, (1737). *Architettura civile*, trattato III, cap. XXVI.

Guida al BIM, La rivoluzione digitale dell'edilizia, seconda edizione, 2018 ACCA software S.p.A..

HONG, Sungchul, JUNG, Jae Hoon, KIM, Sangmin, CHO, Hyoungsig, LEE, Jeongho, HEO, Joon, (2015), *Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling,* in Comput. Environ. Urban Syst. 2015, 51, 34–46. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.01.005.

IBRAHIM, Magdy, KRAWCZYK, Robert, (2003). The level of knowledge of CAD objects within the building information model, in Klinger, K. (Ed.), *Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture*, ACADIA, Indianapolis, USA, pp. 172–177.
URL: http://mypages.iit.edu/~krawczyk/miacad03.pdf [2018].

KUIJPERS, M., (2018). *What is the history and future of BIM!?*, in Loading Systems website.

LAISERIN, Jerry, (2002). Comparing Pommes and Naranjas, *The Laiserin Letter: Issue 15*. URL: http://www.laiserin.com/features/issue15/feature01.php [2018].

LANZARA, Emanuela, SAMPER, Albert, HERRERA, Blas, (2019). Point cloud segmentation and filtering to verify the geometric genesis of simple and composed vaults, in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, 645-652.

LENTZ, Jhon, (1958). A New Approach to Small-Computer Programming and Control, in *IBM Journal of Research and Development*, Vol.2, No.1, p.72.

LO TURCO, Massimiliano, SANTAGATI, Cettina, (2016). From structure from motion to historical building information modeling: populating a semantic aware library of architectural elements, in *Journal of Electronic Imaging*, 26(1): 1-12.

LOGOTHETIS, Sotiris, DELINASIOU, A., STYLIANIDIS, Efstratios, (2015). Building Information Modelling for Cultural Heriage: a review, in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W3, 2015. doi:10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015.

LÓPEZ, Facundo José, LERONES, Pedro M., LLAMAS, José, GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, Jaime, ZALAMA, Eduardo, (2018a), A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM), in *Multimodal Technologies and Interaction*, 2018, 2, 21. doi:10.3390/mti2020021.

LÓPEZ Facundo José, LERONES, Pedro M., LLAMAS, José, GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, Jaime, ZALAMA, Eduardo, (2018c). Linking HBIM graphical and semantic information through the Getty AAT: Practical application to the Castle of Torrelobatòn, in *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 364 (2018) 012100. doi:10.1088/1757-899X/364/1/012100.

MAIETTI, Federica, MEDICI, Marco, FERRARI, Federico, ZIRI, Anna Elisabetta, BONSMA, Peter, (2018). Digital Cultural Heritage: Semantic Enrichment and Modelling

in BIM Environment, in Ioannides M. (a cura di), *Digital Cultural Heritage*, pp. 104-118, Springer Editore. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-75826-8_9.

MANDELLI, Emma, VELO, Uliva, (2010). *Il modello in Architettura. Cultura scientifica e rappresentazione*, Firenze, Alinea Editrice s.r.l.. ISBN: 978 88 6055 571 7.

MARGANI, Luigi, (2009). *Archi e volte in muratura*, Edizioni Lussografica.

MCGILL, Miranda Clare, (2001). *A visual Approach for exploring Computational Design*. Tesi svolta presso il Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2001.

MIGLIARI, Riccardo, (2001), *Frontiere del Rilievo, dalla matita alle scansioni 3D*, Gangemi Editore, Roma 2001.

MIGLIARI, Riccardo, (a cura di), (2004a). *Disegno come Modello*, Roma, Edizioni Kappa, 2004. ISBN: 978 8878906051.

MIGLIARI, Riccardo, (2009). *Geometria descrittiva*, vol.2, Città Studi Edizione.

MIGLIARI, Riccardo, (2014b), *Ricerca e didattica nella rappresentazione scientifica*, in Disegnare Idee Immagini, n.49/2014, Gangemi Editore.

MURPHY, Maurice, MCGOVERN, Eugene, PAVIA, Sara, (2009). *Historic building information modelling (HBIM)*, in Structural Survey 27 (4), 311–327.

NISSIN, Lorenzo, (2015). *La specifica LOD della AIA: un approfondimento*, www.ibimi.it

NOVELLO, Giuseppa, LO TURCO, Massimiliano, (2016). La tridimensionalità dell'Architettura e la sua Rappresentazione: un ponte sospeso tra le interpretazioni dei trattatisti italiani del XVI secolo e le metodologie di elaborazione della contemporaneità, in *El arquitecto, de la tradición al siglo XXI,* Tomo 1, pp.1241-1250, Congresso EGA 2016.

ORENI, Daniela, (2013). From 3D Content Models to HBIM for Conservation and Management of Built Heritage, in B. Murgante et al. (Eds.): ICCSA 2013, Part IV, LNCS 7974, pp. 344–357, 2013, Springer.

OSELLO, Anna, (a cura di), (2015). *Building Information Modelling - Geographic Information System - Augmented Reality per il Facility Management*, Dario Flaccovio Editore.

PAVAN, Alberto, MIRARCHI, Claudio, GIANI, Matteo (2017). *BIM: metodi e strumenti Progettare, costruire e gestire nell'era digitale*, Edizioni Tecniche Nuove. ISBN: 978 88 481 3522 1.

PAVAN, Alberto, MIRARCHI, Claudio, (2019). La norma italiana UNI 11337 sulla digitalizzazione del settore costruzioni, in *BIM VIEWS Esperienze e Scenari*, a cura di Lia Maria Papa e Pierpaolo D'Agostino, Cua Cooperativa Universitaria Athena.

PESSOLANO, Maria Raffaella, (1978). *Il convento napoletano dei SS. Severino e Sossio*, Esi, Napoli, 1978.

PULCRANO, Margherita, SCANDURRA, Simona, MININ, Gianluca, DI LUGGO, Antonella, (2019). 3D Cameras Acquisitions for the Documentation of Cultural Heritage, in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W9, 639-646, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-639-2019, 2019.

REMONDINO, Fabio, (2011), *Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse*, in *DisegnareCon*, Vol.4, n. 8.

REMONDINO, Fabio, EL-HAKIM, Sabry, (2006). Image-based Modelling: a review, in *The photogrammetric record*, 2006, 21, pp. 269-291.

RIDOLFI, Giuseppe, (2018). BIM e simulazione ambientale nelle fasi iniziali del progetto, in *Soluzioni innovative per edifici Nearly Zero Energy. Esperienze di progettazione ambientale*, p. 46-57. ISBN: 9788833380124.

RIISGAARD, Soren, BLAS, Morten Rufus, (2003). *SLAM for Dummies. A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping*. Link: http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee290t/fa18/readings/Slam-for-dummies-mit-tutorial.pdf

SACCHI, Livio, (2015). La fine del disegno?, in *Op. Cit. Selezione della critica d'arte contemporanea*, 153, 5–15.

SAMPIETRO, Fabrizio, MASCIOPINTO, Maria Lucia, CINCOTTA, Ivan Walter Junior, BERGONZONI, Giacomo, (2018). Computational design nel processo HBIM, in Empler T., Valenti G. M. (a cura di), *3D Modeling & BIM Nuove Frontiere*, Dei Editore. ISBN: 978-88496194-1-6.

SATTANINO, Elisa, (2018). *I LOI nelle scale di LOD USA, UK, ITA*. Ingenio web magazine, 12/02/2018.

SAYGI, Gamze, REMONDINO, Fabio, (2013). Management of Architectural Heritage Information in BIM and GIS: State-of-the-art and Future Perspectives, in *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2013, 2(4), pp. 695-713.

SCANDURRA, Simona, PULCRANO, Margherita, (2016). Acquisire e comunicare attraverso la fotografia, in *Delli Aspetti de Paesi, Vecchi e nuovi Media per l'immagine del paesaggio*, vol.II, Edizioni FedOA.

SCANDURRA, Simona, PULCRANO, Margherita, TARANTINO, Cristiana, DI LUGGO, Antonella, (2017). Modellazione H-BIM e ricostruzione delle trasformazioni del costruito storico, in *DN Building Information Modeling, Data & Semantics*, n°1/2017, a cura di T. Empler, M. Lo Turco, Dei Editore.

SCANDURRA, Simona, PULCRANO, Margherita, TARANTINO, Cristiana, (2018). Dalla conoscenza al modello parametrico informatizzato, in *Palazzo Penne a Napoli tra conoscenza, restauro e valorizzazione*, a cura di M. Campi, A. di Luggo, R. Picone, P. Scala, Edizioni Arte'm.

SCHEER, David Ross, (2014). *The death of drawing: architecture in age of simulation*, New York, Routledge Editore. ISBN: 978 0 415 83495 7.

SCHNEIDER, Philip J., (1996). NURB Curves: A Guide for the Uninitiated, in *MAC TECH The journal of Apple technology*, n. 25, Marzo 1996. http://macte.ch/?OCQCB.

SDEGNO, Alberto, (2013). Sketchpad: sulla nascita del disegno digitale, in *Disegnare idee immagini*, n.46/2013. ISBN: 978-88-492-2672-0.

SDEGNO; Alberto, (2016). Computer Aided Architecture: origini e sviluppo, in *DisegnareCon*, volume 9, n.16, Giugno 2016. ISSN: 1828-5961.

SDEGNO, Alberto, (2017). Tra CAAD e BIM, in *DN – Building Information Modeling, Data & Semantics*, n.1 ottobre 2017, ISSN 2610-8755.

SEDERBERG, Thomas W., ZHENG, Jianmin, BAKENOV, Almaz, NASRI, Ahmad H., (2003). T-Splines and T-NURCCs, in *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), 477-484.

TORNABENE, Francesco, (2012). *Meccanica delle strutture a guscio in materiale composito*, Esculapio Editore.

VAN NEDEREVEEN, Gilles A., TOLMAN, Frits P. (1992). *Modelling multiple views on buildings*, Automation in Construction, Volume 1, dicembre 1992, pag. 215-224. DOI: https://doi.org/10.1016/0926-5805(92)90014-B.

VESPRILLE, Kennet James, (1975). *Computer-Aided Design Applications of the Rational B-Spline Approximation Form*, 1975. Tesi di dottorato presso Electrical Engineering and Computer Science Department, Syracuse University, Advisor: Steven A. Coons.

VIGNOLA, Jacopo Barozzi, (1562) *Regola delli cinque ordini d'architettura*, Roma.

VOLK, Rebecca, STENGEL, Julian, SCHULTMAN, Frank, (2014). Building Information Modeling (BIM) for eexisting building – Literature review and future needs,

in *Automation in Construction* 38/2014, pp. 109–127. http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023.

USHAKOV, Dmitry, (2011). NURBS an CAD: 30 Years Together, in *isicad. web page*.

Bibliografia per l'archivio di Stato di Napoli:

CELANO, Carlo, (1858). *Notizie del bello, dell'antico e del curioso della città di Napoli*, vol. 3, Napoli, Stamperia di Agostino de Pascale.

D'ALOE, Stanislao, (1861). *Storie della Chiesa di Napoli: provata con monumenti, libri cinque*, Stabilimento tipografico Strada Banchi Nuovi, Napoli.

GALANTE, Gennaro Aspreno, (2004). *Guida sacra della città di Napoli per Gennaro Aspreno Galante prete napolitano*, ristampa della prima edizione del 1872, Morano Editore.

Il Grande Archivio di Napoli. Monumento/Documento, in *Rivisitare la memoria Progettare il futuro. Alla scoperta degli Archivi di Stato della Campania*, pubblicazione realizzata con il cofinanziamento dell'Unione Europea nell'ambito del POR Campania FESR 2007/2013 ob. op. 1.9.

MAZZOLENI, Jole, (1964). *Il monastero benedettino dei SS. Severino e Sossio. Sede dell'Archivio di Stato di Napoli*, Napoli, Società napoletana di storia patria.

ROSANOVA, Sergio, (a cura di), (1999). *Il grande archivio. I luoghi del patrimonio: il Monastero napoletano dei Ss. Severino e Sossio sede dell'Archivio di Stato. Progetto di restauro*, Paparo Editore. ISBN: 88 87111 08 1.

RUSSO, Maria, (1993). Il monastero napoletano dei santi severino e sossio: da grande archivio del Regno Borbonico ad archivio dello stato unitario, in Fiengo G. (a cura di), *Tutela e Restauro dei monumenti in Campania 1860-1900*, Electa Napoli Editori, 1993.

TRINCHERA, Francesco, (1872). *Degli Archivii Napolitani*, 1872, Napoli, Stamperia del Fibreno.

Sitografia:

www.rhino3d.com/nurbs

https://thebimhub.com/2014/11/24/history-of-building-information-modelling/#.W8hcymgzZPY

http://laiserin.com/about/index.php

www.bentley.com/it

www.graphisoft.com/

www.buildingsmart-tech.org

www.ibimi.it

www.inception-project.eu

www.clearedge3d.com/products/edgewise-plant-suite

www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/

www.cidoc-crm.org

www.iccd.beniculturali.it/it/strumenti-terminologici

http://help.autodesk.com/

www.stress-scarl.com/it/innovazione/i-progetti-nazionali/bim-recult.html

Normativa:

UNI 11337:2017

BS 1192:2007

PAS 1192

protocollo E202-2008 aggiornato con la E203-2013

Altri riferimenti

ALBERTI, L. B., (1450). *De Re Aedificatoria.*

APOLLONIO, F., GAIANI, M., ZHENG, S., (2012.) BIM-Based modeling and data enrichment of classical architectural buildings, in *SCIRES-IT*, Vol.2, Issue 2 / 2012, pp. 41-62. e-ISSN 2239-4303, doi: 10.2423/i22394303v2n2p41.

BANFI, F., (2019). The integration of a SCAN-TO-HBIM process in BIM application: the development of an add-in to guide users in Autodesk Revit, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W11, 2019.

BIAGINI, C., DONATO, V., (2014). Building Object Models (BOMs) for the documentation of historical building heritage, in *Libro de actas del congreso Egrafia, V Congreso International*, XI Congreso National, Rosario, 2014.

BIANCHINI, C., (2016). Dal BIM all'H-BIM: un percorso tortuoso, presentazione orale al convegno *Brainstoriming the BIM model*, tenuto il 25 novembre 2016 presso il Politecnico di Milano.

BINI, M., (1988). *Tecniche grafiche e rappresentazione degli elementi dell'architettura*, Firenze, Alinea Editore.

BREYMANN, G. A., (1926). *Costruzioni in pietra e strutture murali*.

BRYAN, P., BLAKE, B. E BEDFORD, J., (2009). *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*, English Heritage, 2009.

CAMPI M., COSIDO O., CATUOGNO R., GÁLVEZ A., IGLESIAS A., LOUCERA C., CAPPELLINI V., SAINZ E., (2014). Documentación tridimensional del patrimonio histórico mediante hibridación de técnicas de visión artificial e ingeniería inversa: el Palacio de la Magdalena en Santander, in Patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio, in *Graficas Iguña, S.A.*, Santander (Spagna), pp. 2207-2214.

CRESCENZI, C. (1999). *Superfici a semplice e doppia curvatura. Le ragioni geometriche delle coperture voltate in architettura*.

CUNDARI, C., (2007). *Il Disegno. Ragioni. Fondamenti. Applicazioni*, Roma, Kappa Edizioni.

CURCI, A. E FIORINI, A., (2013). Il rilievo delle superfici tramite fotogrammetria 3D: dal microscavo dei complessi tombali agli scavi in open area, in *Archeologia e calcolatori*, 2013, 24, pp. 355-370.

DE LUCA, L., VÉRON, P., E FLORENZANO, M., (2007). A generic formalism for the semantic modeling and representation of architetural elements, in *The Visual Computer*, 23(3), 2007, pp.181-205.

DE LUCA, L., (2011a). Verso la caratterizzazione semantica di rappresentazioni digitali di artefatti architettonici: linee programmatiche di ricerca, in *DisegnareCon, Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale*, 2011, pp. 99-106.

DE LUCA, Livio (2011b), Methods, formalisms and tools for the semantic-based surveying and representation of architectural heritage, *Applied Geomatics* 6-1866.

DE RUBERTIS, R., (1994). *Il disegno dell'architettura*, Carocci Editore.

DE RUBERTIS, R., SOLETTI, A., UGO, V., (a cura di), (1992). Temi e codici del disegno di architettura, Roma, Officina Edizioni.

DOCCI, M., MIRRI, F., (1989). *La redazione grafica del progetto architettonico,* Roma, NIS.

DOCCI M., MAESTRI, D., (2009). *Manuale di rilievo architettonico ed urbano*, Editori Laterza.

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*, Volume XLII-2/W5, 2017, pp. 185-192.

EASTMAN, C. M., (1975). *The Use of Computers Instead of Drawings In Building Design*, AIA Journal, marzo 1975, pp. 46-50.

FAI, S., GRAHAM, K., DUCKWORTH, T., WOOD, N., ATTAR, R., (2011). Building Information Modelling and Heritage Documentation, in *XXIII CIPA International Symposium*, Prague, Czech Republic, 2011, http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/047

FASSI, F., FREGONESE, L., ACKERMANN, S., DE TROIA, V., (2013). Comparison between Laser scanning and automated 3D modelling techniques to reconstruct complex and extensive cultural heritage areas, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W1, 2013.

GAIANI, M., BENEDETTI, B., APOLLONIO, F. I., (2011), *Teorie per rappresentare e comunicare i siti archeologici attraverso modelli critici,* SCIRES-IT SCIentific RESearch and Information Technology / Ricerca Scientifica e Tecnologie dell'Informazione, Vol. 1,

Issue 2 (2011), pp. 33-70. e-ISSN 2239-4303, DOI 10.2423/i22394303v1n2p33 CASPUR-CIBER Publishing, http://caspur-ciberpublishing.it.

GIORDANO, A., (1999). *Cupole, volte e altre superfici - La genesi e la forma*, Utet Editore.

GUARINI, G., (1968). *Architettura civile*, trattato III, Milano, Edizioni Il Polifilo.

GUIDI, G., RUSSO, M. E BERALDIN, J., (2010). *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill Education, 2010.

IBRAHIM, M., KRAWCZYK, R., (2003). The level of knowledge of CAD objects within the building information model, in Klinger, K. (Ed.), *Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*. ACADIA, Indianapolis, USA, pp. 172–177. URL: http://mypages.iit.edu/~krawczyk/miacad03.pdf

LE DUC, V., (1875). *Dictionnaire raisonné de l'architecture francaise*.

LÓPEZ F. J., LERONES, P. M., LLAMAS, J., GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, J., ZALAMA, E., (2018b). Semi-automatic generation of BIM models for cultural heritage, in *International Journal of Heritage Architecture*, 2(2), 293-302.

LO TURCO, M., (2015). *Il Bim e la rappresentazione infografica nel processo edilizio*, Aracne Editore.

LO TURCO, M., (2016). *Contenuti minimi di rappresentazione in ambiente BIM: verso un possibile protocollo nazionale.* In 3D Modeling & BIM 2016, a cura di T. Empler.

MANDELLI, E., (1988). *La rappresentazione grafica*, Firenze, Alinea editore.

MANFERDINI, A. M., REMONDINO, F., BALDASSINI, S., GAIANI, M., E BENEDETTI, B., (2008). 3D Modeling and semantic classification of archaeological finds for management and visualization in 3D archaeological databases, in *proceedings at the 14th VSMM Conference*, Limassol, Cyprus, 2008.

MC ARTHUR, J.J., (2015), *A building information management (BIM) framework and supporting case study for existing building operations, maintenance and sustainability*, in Procedia Engineering 118/2015, pp. 1104-1111. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.450.

MIGLIARI, R., (2000). *Fondamenti della rappresentazione geometrica e informatica dell'architettura*, Roma, Kappa Edizioni.

MILIZIA, F., (1768). *Le Vite de' più celebri architetti d'ogni nazione e d'ogni tempo precedute da un Saggio sopra l'Architettura.*

MINGUCCI, R., (2008). La comunicazione del progetto nell'era digitale, in *DisegnareCon*, 2008, 1.

MOSCATI, A., (2012), Sistemi Informativi Integrati, in *DisegnareCon*, numero speciale DOCO 2012, pp. 249-254.

MURPHY, M., CORNS, A., CAHILL, J., ELIASHVILI, K., CHENAU, A., PYBUS, C., SHAW, R., DEVLIN, G., DEEVY, A., TRUONG-HONG, L., (2017). Developing historic building information modelling guidelines and procedures for architectural heritage in Ireland, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W5, 2017. 26th International CIPA Symposium 2017, 28 August-01 September 2017, Ottawa, Canada.

PALLADIO, A., (1570). *I quattro libri dell'Architettura*, vol. 1.

REMONDINO, F., RIZZI, A., AGUGIARO, G., JIMENEZ, B., MENNA, F., NEX, F., BARATTI, G., (2011), Rilievi e modellazione 3D, in *Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA* - Reggia di Colorno 15-18 novembre 2011.

REMONDINO, F., CAMPANA, S., (2014). *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage*, BAR International Series 2598, 2014.

SDEGNO, A., (2012). Sulle origini della teoria del disegno digitale. In memoria di Steven A. Coons (1912-1979), in *Elogio della teoria identità delle discipline del disegno e del rilievo*, atti del 34° convegno internazionale dei docenti della rappresentazione, Gangemi Editore, 2012. ISBN: 978-88-492-2519-8.

SERLIO, S., (1584). *I sette libri dell'Architettura*, vol. 4.

SOLETTI, A., BELARDI, P., CATALIOTTI, F., (a cura di), (2001). *Claudio Moriconi professione infografico*, Centro Stampa dell'Università degli Studi di Perugia.

TUCCI, F. P., (1832). *Della misura delle volte rette ed oblique*.

UGO, V., (1994). Fondamenti della rappresentazione architettonica, ristampa aprile 2002. Società editrice esculapio.

VITTONE, B.A., (1760). *Istruzioni elementari per l'indirizzo de' giovani allo studio dell'architettura civile,* libro terzo.

VITRUVIO POLLIONE, M., (25 a. C.). *De Architettura.*

VOLTINI, F., REMONDINO, F., PONTIN, M., GIRARDI, S., RIZZI, A., GONZO, L., (2006), Integrazione di fotogrammetria e laser scanner per la documentazione di beni culturali, *Proc. of X ASITA Conference*, Bozen.

ZERBINATTI, M. (a cura di), (2014). *Manuale per il recupero del patrimonio architettonico di pietra tra Verbano Cusio Ossola e Canton Ticino*, ISBN: 978-88-901652-0-7.

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: Evoluzione nel tempo degli strumenti oggi più in uso.
Elaborazione S. Scandurra. p. 12

Fig. 2: La modellazione dei bordi (in rosso) potrebbe generare confusione nella interpretazione. Inoltre, non consente di eliminare dalla vista le porzioni di modello posteriore.
Elaborazione S. Scandurra. p. 14

Fig. 3: La modellazione delle superfici riproduce una sorta di pelle sottile rimanendo però cava all'interno.
Elaborazione S. Scandurra. p. 14

Fig. 4: Coons Patch per la costruzione geometrica di una volta a vela.
Elaborazione S. Scandurra. p. 15

Fig. 5: Curva di Bézier. e Bspline.
Elaborazione S. Scandurra. p. 16

Fig. 6: Modello in superficie tridimensionale NURBS.
Elaborazione S. Scandurra. p. 17

Fig. 7: Operazione di *smoothing* per realizzare una sfera a partire da un poliedro.
Elaborazione S. Scandurra. p. 18

Fig. 8: Nuvola di punti degli esterni di Palazzo Donn'Anna a Napoli. Acquisizione con laser scanner a tempo di volo Riegl VZ400i ed elaborazione con RiscanPro.
Fonte: contributo dal titolo *Procedure Integrate per il rilievo e la documentazione digitale di ambienti complessi,* presentato dal gruppo di ricerca M. Campi, A. di Luggo, D. Palomba, F. Pisano, M. Pulcrano, L. Repola, S. Scandurra, N. Scotto di Carlo, nell'ambito del convegno internazionale TDA – *Technologies & Digital Artefacts for cultural heritage*, Napoli 2019. p. 25

Fig. 9: Tecnologia di misurazione a tempo di volo.
Elaborazione S. Scandurra. p. 26

Fig. 10: Tecnologia di misurazione a modulazione di fase.
Elaborazione S. Scandurra. p. 27

Fig. 11: Punti omologhi e vertici della mesh del prospetto nord-est di Palazzo Donn'Anna a Napoli, elaborata in Reality Capture a partire da 141 fotografie scattate con macchina fotografica di tipo bridge.
Fonte: L. Repola, A. di Luggo, M. Campi, V. Cera, S. Scandurra, M. Pulcrano, N. Scotto di Carlo, F. Pisano, La rappresentazione quale specchio del reale: le nuove tecnologie a servizio della conoscenza per la documentazione di ambienti complessi, in *Riflessioni l'arte del disegno/il disegno dell'arte*, Gangemi Editore. p. 30

Fig. 12: Collinearità tra il centro di proiezione, i pinti del pano dell'immagine e l'oggetto reale.
Elaborazione S. Scandurra. p. 31

Fig. 13: Ortofoto estratta in Faro Scene a partire dalla nuvola di punti della Basilica di Santa Restituta, presso il Duomo di Napoli.
Elaborazione S. Scandurra, M. Pulcrano, nell'ambito della tesi di Laurea *Rilievo come strumento di conoscenza dell'Insula Episcopalis di Napoli: Basilica di S. Restituta,* 2015, relatore: M. Campi, correlatori: A. di Luggo, M. di Mauro, R. Catuogno, A. Cuccaro p. 34

Fig. 14: Modello 3D costruito in ambiente CAD di una porzione delle Terme di Agnano (Napoli) a partire dalle elaborazioni bidimensionali di pianta e sezione.
Fonte: S. Acquaviva, L. Amoroso, G. Minini, nell'ambito della tesi di Laurea *Complesso Termale di Agnano: Percorso documentario, grafico e conoscitivo per la ricostruzione della memoria*, 2018, relatore: A. di Luggo, correlatori: M. Campi, S. Scandurra, G. Bartolo. p. 35

Fig. 15: Chiesa di San Carlo all'Arena, Napoli. Processo tradizionale di costruzione di un modello tridimensionale a partire da una nuvola di punti: il percorso passa da una rappresentazione ridimensionale ad un'altra, attraversando una fase di riduzione bidimensionale.
Elaborazione S. Scandurra. p. 36

Fig. 16: Nuvola di punti, mesh e texturizzazione di una porzione del prospetto NordEst di Palazzo Donn'Anna a Napoli, elaborata col software Reality Capture.
Fonte: contributo dal titolo *Procedure Integrate per il rilievo e la documentazione digitale di ambienti complessi,* presentato dal gruppo di ricerca M. Campi, A. di Luggo, D. Palomba, F. Pisano, M. Pulcrano, L. Repola, S. Scandurra, N. Scotto di Carlo, nell'ambito del convegno internazionale TDA – *Technologies & Digital Artefacts for cultural heritage*, Napoli 2019. p. 37

Fig. 17: Nuvola di punti, mesh e texturizzazione di uno degli altari della Basilica di Santa Restituta, elaborata col software Photoscan.
Fonte: S. Scandurra, M. Pulcrano, Acquisire e comunicare attraverso la fotografia, in *Delli Aspetti de Paesi, Vecchi e nuovi Media per l'Immagine del Paesaggio*, vol. II, 2016, Edizioni FedOA. p. 38

Fig. 18: Il Regno Unito ha definito i livelli di maturità del processo di progettazione classificandoli tra 0 e 3. Al livello 0 pone i disegni a mano e CAD 2D. Al livello 1 il 3D privo di informazioni condivise, quindi solo per la visualizzazione. Al livello 2 introduce il BIM ed al livello 3 l'Open BIM con il massimo livello di interoperabilità e condivisione.
Fonte: Bew, M., & Richards, M. (2008). BIM Maturity Model, C*onstruct IT Autumn 2008 Members' Meeting. Brighton, UK.* p. 46

Fig. 19: Struttura proposta per i LOIN al tavolo di lavoro coordinato dall'Italia nell'ambito del tavolo normativo comunitario CEN/TC 442.
Fonte: PAVAN, et al., 2019. p. 51

Fig. 20: Il BIM e la modellazione per oggetti.
Elaborazione S. Scandurra. p. 55

Fig. 21: Complesso dell'Archivio di Stato nel contesto urbano.
Immagine elaborata da S. Scandurra sulla base delle foto satellitari di Google Earth. p. 78

Fig. 22: Antica cinta muraria della città di Napoli e individuazione del complesso dei SS. Severino e Sossio.
Elaborazione S. Scandurra. p. 79

Fig. 23: Individuazione delle vie che costeggiano il complesso.
Elaborazione S. Scandurra. p. 80

Fig. 24: Individuazione dell'area destinata alla funzione di Archivio.
Elaborazione di S. Scandurra su grafico di pianta presente in MAZZOLENI, 1964. p. 82

Fig. 25: Distribuzione planimetrica degli Atri.
Elaborazione di S. Scandurra su grafico di pianta presente in MAZZOLENI, 1964. p. 83

Fig. 26: Atrio Primo del complesso dei SS. Severino e Sossio e dettaglio del cancello che dall'Atrio Primo porta all'Atrio Secondo.
Foto S. Scandurra. p. 84

Fig. 27: Atrio Capasso (o Atrio Secondo) del complesso dei SS. Severino e Sossio.
Foto S. Scandurra. p. 85

Fig. 28: Affreschi di Antonio di Giovanni di Pietro da Solario detto *Lo Zingaro* nei corridoi dell'Atrio del Platano.
Foto S. Scandurra. p. 86

Fig. 29: Atrio dei Marmi, dettaglio.
Foto S. Scandurra. p. 87

Fig. 30: Atrio dei Marmi, dettaglio.
Foto S. Scandurra. p. 88

Fig. 31: Atrio dei Marmi.
Foto S. Scandurra. p. 88

Fig. 32: Dettaglio del gradino che costeggia il giardino dell'Atrio dei Marmi: individuazione dell'originale gradino in piperno ricoperto dalle lastre marmoree.
Foto S. Scandurra. p. 89

Fig. 33: Tabula topografica di Napoli del XI secolo, ad opera di Bartolomeo Capasso. p. 90

Fig. 34: Dettaglio della Tabula Topografica di Napoli del XI secolo. p. 90

Fig. 35: Incisione di Nicolò Van Aelst, 1950. p. 91

Fig. 36: Veduta di Antonio Lafrery, 1566. p. 91

Fig. 37: Veduta di Giovan Giacomo de Rossi, 1649.
Fonte: MAZZOLENI, 1962. p. 92

Fig. 38: Veduta di Bastiaen Stopendaal, 1653.
Fonte: MAZZOLENI, 1962. p. 92

Fig. 39: Pianta del Duca di Noja, 1775. p. 92

Fig. 40: Guache ottocentesca raffigurante la Chiesa Nuova. Fonte: R. di Poce, La balaustra che guarda il mare dei Santi Severino e Sossio, Corriere del Mezzogiorno, 05 aprile 2018. p. 93

Fig. 41: Prospetto del complesso sull'ex vico Pensieri (oggi Via del Grande Archivio), prima del rifacimento.
Fonte: Archivio di Stato di Napoli. p. 94

Fig. 42: Sintesi delle evoluzioni storiche.
Elaborazione S. Scandurra. p. 96

Fig. 43: Sezione e pianta di progetto ad opera dell'Arch. S. Rosanova.
Fonte: ROSANOVA, 1999. p. 97

Fig. 44: Individuazione planimetrica delle Sale che costeggiano l'Atrio dei Marmi.
Elaborazione di S. Scandurra su grafico di pianta presente in MAZZOLENI, 1964. p. 98

Fig. 45: Sala Filangieri.
Foto dell'autrice. p. 99

Fig. 46: Sala Catasti.
Foto dell'autrice. p. 100

Fig. 47: Sala Tasso.
Foto S. Scandurra. p. 101

Fig. 48: Sala Tasso. Vista interna e dettaglio degli affreschi della volta.
Foto S. Scandurra. p. 101

Fig. 49: Piante del Grande Archivio con evidenziazione (in arancione) degli ambienti acquisiti con laser scanner.
Elaborazione S. Scandurra. p. 102

Fig. 50: Porzione acquisita con laser scanner (in arancione) al piano secondo. Individuazione dei punti di stazionamento con le differenti quote altimetriche in un'immagine elaborata da S. Scandurra col software *SCENE Web-Share*. p. 104

Fig. 51: Allineamento delle diverse scansioni nel software *Faro Scene*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 105

Fig. 52: Errore generato dal software nel riconoscimento automatico dei *target*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 106

Fig. 53: La pulizia delle nuvole di punti è avvenuta in *Autodesk ReCap*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 107

Fig. 54: Rilievo *image based* ella scultura del Cristo posta nelle scale in piperno dell'Atrio dei Marmi.
Elaborazione S. Scandurra. p. 108

Fig. 55: Rilievo *image based* dell'affresco presente nella Sala Filangieri.
Elaborazione S. Scandurra. p. 109

Fig. 56: Pianta delle coperture inserita nel contesto urbano.
Elaborazione S. Scandurra. p. 111

Fig. 57: Pianta del piano terra e prospetto principale su Via del Grande Archivio.
Elaborazione S. Scandurra. p. 112

Fig. 58: Pianta del piano secondo, corrispondente al piano degli Atrii.
Elaborazione S. Scandurra. p. 113

Fig. 59: Sezione-prospetto AA'.
Elaborazione S. Scandurra. p. 114

Fig. 60: Ingrandimento della pianta del secondo piano con dettaglio della pavimentazione delle aree di studio.
Elaborazione S. Scandurra. p. 115

Fig. 61: Sezione longitudinale della Sala Catasti.
Elaborazione S. Scandurra. p. 116

Fig. 62: Dettaglio della scaffalatura della Sala Catasti.
Elaborazione S. Scandurra. p. 117

Fig. 63: Sezione longitudinale della sala Tasso.
Elaborazione S. Scandurra. p. 118

Fig. 64: Sezione longitudinale della Sala Filangieri.
Elaborazione S. Scandurra. p. 119

Fig. 65: Abacatura con individuazione delle principali categorie di elementi costituenti il manufatto indagato e delle relazioni reciproche.
Elaborazione S. Scandurra. p. 123

Fig. 66: Workflow HBIM.
Elaborazione S. Scandurra. p. 124

Fig. 67: Trasformazione della vista in pianta da *nord reale* a *nord di progetto*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 127

Fig. 68: Nuvola dell'Archivio con individuazione dei livelli in una vista di sezione del progetto in *Autodesk Revit*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 128

Fig. 69: Inserimento degli elaborati CAD (in rosso) come supporto per la modellazione e completamento delle aree non interessate dalla nuvola di punti.
Elaborazione S. Scandurra. p. 129

Fig. 70: Insula dell'Archivio di Stato nella Carta dei tetti, 1992, Soprintendenza di collegamento, Napoli. p. 130

Fig. 71: Inserimento dei muri in riferimento alla nuvola di punti.
Elaborazione S. Scandurra. p. 131

Fig. 72: Modello HBIM in fase di elaborazione: dettaglio del gradino che circoscrive l'Atrio dei Marmi.
Elaborazione S. Scandurra. p. 132

Fig. 73: Modello HBIM in fase di elaborazione: l'area verde è modellata con volumi semplici, privi di dettaglio, esclusivamente indicativi degli ingombri.
Elaborazione S. Scandurra. p. 133

Fig. 74: Sovrapposizione nuvola e modello in stile visualizzazione *nascosto*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 134

Fig. 75: Ricomposizione in *famiglia nidificata* delle parti modellate per una delle finestre dell'Atrio dei Marmi.
Elaborazione S. Scandurra. p. 135

Fig. 76: Dettaglio della scaffalatura della Sala Filangieri, sviluppo in serie degli oggetti digitali, vincoli e parametri assegnati alle parti e sovrapposizioni della nuvola per la verifica delle dimensioni.
Elaborazione S. Scandurra. p. 136

Fig. 77: Scaffalatura della Sala Filangieri: individuazione dei moduli utilizzati per la realizzazione del modello.
Elaborazione S. Scandurra. p. 137

Fig. 78: Modello delle scaffalature della Sala Catasti.
Elaborazione S. Scandurra. p. 138

Fig. 79: Studio e modellazione delle colonne dell'Atrio dei Marmi.
Elaborazione S. Scandurra. p. 139

Fig. 80: Dettaglio dei piedistalli delle colonne dell'Atrio dei Marmi.
Elaborazione S. Scandurra. p. 140

Fig. 81: Modellazione delle finestre secondo più gradienti di dettaglio.
Elaborazione S. Scandurra. p. 141

Fig. 82: Porzione di modello HBIM: prospetto interno all'Atrio dei Marmi con dettaglio basso (sinistra) ed alto (destra).
Elaborazione S. Scandurra. p. 142

Fig. 83: Elaborazione del modello puntiforme della Statua della Teologia al centro del giardino dell'Atrio dei Marmi, col supporto del software *Reality Capture*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 143

Fig. 84: Aggiunta di parametri informativi alla Statua della Teologia trasformata in *famiglia* e categorizzata come *arredo fisso*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 144

Fig. 85: Inserimento della statua della Teologia nel modello complessivo in stile visualizzazione realistico.
Elaborazione S. Scandurra. p. 145

Fig. 86: Inserimento della statua del Cristo nel modello complessivo.
Elaborazione S. Scandurra. p. 146

Fig. 87: Atrio dei Marmi ed abaco delle finestre.
Elaborazione S. Scandurra. p. 147

Fig. 88: A seconda del livello di conoscenza acquisito in riferimento al dato di evoluzione nel tempo, si è stabilita una specifica modalità di assegnazione dell'informazione sul modello grafico elaborato in *Autodesk Revit*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 153

Fig. 89: Filtri delle Fasi presenti di *default* in un *template di progetto Architettonico* di *Autodesk Revit* 2017 in versione italiana. p. 154

Fig. 90: Creazione dei *filtri grafici* per le epoche in *Autodesk Revit*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 158

Fig. 91: Modelli di evoluzione temporale realizzati attraverso *filtri grafici*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 160

Fig. 92: I diversi conci che costituiscono un arco scaricano il peso sui piedritti secondo le componenti verticale ed orizzontale.
Elaborazione S. Scandurra. p. 164

Fig. 93: Indicazione delle parti della volta e relativa nomenclatura.
Elaborazione S. Scandurra. p. 168

Fig. 94: Indicazione delle parti della volta e relativa nomenclatura.
Elaborazione S. Scandurra. p. 169

Fig. 95: Volta a botte costruita a partire da *sesti* di diversa natura geometrica.
Elaborazione S. Scandurra. p. 171

Fig. 96: Volta a botte retta, obliqua e rampante.
Elaborazione S. Scandurra. p. 172

Fig. 97: Unghie della volta a crociera ottenute dal taglio di un semicilindro.
Elaborazione S. Scandurra. p. 173

Fig. 98: Costruzione di una volta a crociera con unghie miste, due cilindriche e due sferoidiche.
Elaborazione S. Scandurra. p. 174

Fig. 99: Tipologie di unghie in proiezioni ortografiche ed assonometria.
Elaborazione S. Scandurra. p. 176

Fig. 100: Lunette cilindriche, lunette sferoidiche e lunetta cilindroica inserite in una volta a botte.
Elaborazione S. Scandurra. p. 177

Fig. 101: Lunette cilindriche su volta a botte in proiezioni ortografiche ed assonometria. Si noti la prima proiezione rispetto ai casi corrispondenti di figura 7: siccome la chiave della volta a botte è ad una quota maggiore rispetto al punto più alto della lunetta, la curva di intersezione che si genera differisce rispetto al caso della volta a crociera. Per quest'ultima infatti la chiave di volta coincide col punto più alto delle unghie.
Elaborazione S. Scandurra. p. 178

Fig. 102: Costruzione geometrica di una volta a botte lunettata con teste di padiglione, in parte lunettata con lunette sferoidiche a raggio costante frontale.
Elaborazione S. Scandurra. p. 179

Fig. 103: Differenze operative nella modellazione di una volta.
Elaborazione S. Scandurra. p. 181

Fig. 104: Modello geometrico di volta a botte con arco a tutto sesto: numero minimo di parametri.
Elaborazione S. Scandurra. p. 182

Fig. 105: Variando opportunamente il valore dei parametri, si ottengono infinite possibilità di variazione del modello.
Elaborazione S. Scandurra. p. 183

Fig. 106: Studio di una volta a botte, dei relativi parametri e delle relazioni con gli altri elementi dell'architettura.
Elaborazione S. Scandurra. p. 184

Fig. 107: Modellazione di una volta a botte adattiva, completa di stratigrafia e visualizzazione dei relativi parametri. La scelta del template di modello adattivo in Autodesk Revit consente di adattare la forma a qualunque tipologia di pianta quadrilatera. Gestendo i parametri impostati in fase di modellazione, è possibile variare le dimensioni di ognuna delle parti di elemento modellate.
Elaborazione S. Scandurra. p. 185

Fig. 108: Distribuzione planimetrica delle tipologie di volta individuate nel complesso dell'Archivio di Stato.
Elaborazione S. Scandurra. p. 188

Fig. 109: Modellazione delle volte in *Autodesk Revit*.
Fonte: DI LUGGO, et al., 2018. p. 191

Fig. 110: Vista dal basso dell'area dell'Atrio dei Marmi modellata in *Autodesk Revit* con inserimento di alcune delle coperture voltate.
Elaborazione S. Scandurra. p. 192

Fig. 111: Estrazione in *Autodesk ReCap* delle porzioni di nuvola inerenti le volte a crociera dell'Atrio dei Marmi.
Elaborazione S. Scandurra. p. 194

Fig. 112: Analisi geometrica dei profili della volta a crociera.
Elaborazione S. Scandurra. p. 195

Fig. 113: Le unghie delle volte a crociera si presentano uguali a due a due: cilindriche le unghie poste longitudinalmente al corridoio dell'atrio e sferoidiche quelle trasversali.
Elaborazione S. Scandurra. p. 196

Fig. 114: Analisi delle curve attraverso ortofoto di sezione della nuvola di punti.
Elaborazione S. Scandurra. p. 197

Fig. 115: Impostazione del *modello adattivo* della volta a crociera.
Elaborazione S Scandurra. p. 198

Fig. 116: Vista d'insieme delle volte a crociera dell'Atrio dei Marmi e del relativo parametro di identificazione ID_AAT.
Elaborazione S. Scandurra. p. 199

Fig. 117: Nuvola di punti del rilievo laser scanner della volta della Sala Tasso in proiezione ortogonale.
Elaborazione S. Scandurra. p. 200

Fig. 118: Attraverso *slice* distanti 15 cm si è verificata la natura sferoidica delle lunette della Sala Tasso, di tipo a raggio costante frontale.
Elaborazione S. Scandurra. p. 201

Fig. 119: Estrazione delle curve della lunetta: in rosso il piano che intercetta la lunetta in mezzeria, in verde e blu i piani intercettanti le curve diagonali.
Elaborazione S. Scandurra. p. 202

Fig. 120: Le curve estratte in *Cloud Compare* dalla nuvola di punti, sono state importate nel *template* di *famiglia massa generica* di *Autodesk Revit* e poi utilizzate come *input* in D*ynamo*.
Elaborazione S. Scandurra. p. 203

Fig. 121: Curva importata (nero) e curva ricostruita (rosso) in *Dynamo* per la Sala Tasso, secondo più valori di infittimento del passo di discretizzazione.
Elaborazione S. Scandurra. p. 204

Fig. 122: Costruzione in *Dynamo* della superficie della porzione di volta a botte della Sala Tasso.
Elaborazione S. Scandurra. p. 205

Fig. 123: Costruzione della superficie delle lunette a partire dalle tre curve importate dalla nuvola e dalle regole di costruzione geometrica desunte dal tipo.
Elaborazione S. Scandurra. p. 206

Fig. 124: La superficie rappresentativa dell'intradosso della volta, è stata trasformata in volume riempiendo per gradi l'estradosso.
Elaborazione S. Scandurra. p. 207

Fig. 125: Interfaccia *Dynamo* per la strutturazione del modello di volta.
Elaborazione S. Scandurra. p. 208

Fig. 126: Sovrapposizione del modello con la porzione di nuvola di punti della volta della sala Tasso.
Elaborazione S. Scandurra. p. 210

Fig. 127: Vista interna del modello della sala Catasti: il supporto della *superficie adattiva* - resa invisibile - consente di georiferire sulla nuvola e sulle superfici del modello le informazioni relative agli affreschi.
Elaborazione S. Scandurra. p. 211

Simona Scandurra (1988) si laurea nel 2015 in Architettura presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II con una tesi in Rilievo dell'Architettura dal titolo "*Il rilievo come strumento di conoscenza della Insula Episcopalis di Napoli: la Basilica di Santa Restituta"*, relatore Prof. M. Campi.
Dal 2016 è cultore della materia per il settore disciplinare ICAR-17 e svolge attività di ricerca nell'ambito del rilievo e della rappresentazione dell'architettura e dell'archeologia, con particolare riferimento alle tecnologie di acquisizione *reality based* ed ai processi di modellazione tridimensionale e informativa di tipo *HBIM.*

NAPOLI FEDERICO II UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II U

ECNOLOGIE SOSTENIBILI RECUPERO E RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCH

Università degli Studi di Napoli Federico II
Dipartimento di Architettura

Dottorato di Ricerca in Architettura
Tecnologie sostenibili, recupero e rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente

Ciclo XXXII

Coordinatore del Dottorato
Fabio Mangone