



Università Politecnica delle Marche  
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria  
Curriculum in Ingegneria Civile, Edile e Architettura

---

# **PARADIGMI TECNOLOGICI PER UN NUOVO APPROCCIO NELLA DIGITAL TRANSFORMATION DEL PATRIMONIO CULTURALE**

## **BIM per una semantica dell'architettura storica**

Ph.D. Dissertation of:  
**Raissa Mammoli**

Advisor:  
**Prof. Paolo Clini**

Curriculum supervisor:  
**Prof. Francesco Fatone**

XXXIII ciclo

---

Università Politecnica delle Marche  
*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura*  
Via Brecce Bianche — 60131 - Ancona, Italy







# **Ringraziamenti**

## Abstract

Il *Building Information Modeling* (BIM) è definito come una riproduzione digitale e completa di un'architettura che racchiude gli attributi dei modelli parametrici digitali. La sua introduzione nel mondo della rappresentazione ha cambiato radicalmente il significato dei modelli tridimensionali, proponendoli come sistemi informativi per l'architettura. Considerando il panorama del Patrimonio Architettonico si fa riferimento all'*Heritage Building Information Modeling* (HBIM) che è un sistema di rappresentazione dell'architettura costruita composto da librerie di oggetti semanticamente strutturati e parametrizzati.

L'HBIM crea nuove possibilità per la condivisione di informazioni differenti all'interno di un unico ambiente digitale e si configura come un modo per accrescere la portabilità e per fornire dati a una più ampia comunità di utenti.

Nel campo del *Cultural Heritage* una grande potenzialità dell'HBIM è proprio la sua capacità di combinare conoscenze e competenze trasversali, consentendo la gestione e il riutilizzo delle informazioni da parte di utenti con background diversi, integrando dati e consentendo studi interdisciplinari. Le diverse forme di gestione rappresentano il *core* di questo lavoro di tesi e i campi di applicazione esplorati: la stampa additiva, la documentazione storica e archivistica, la gestione della quarta dimensione per la conservazione e la datazione e la segmentazione semantica e la classificazione delle nuvole di punti per il patrimonio culturale mostrano come sia possibile definire una semantica consapevole per il Patrimonio.

I modelli informativi sono strumenti preziosi che offrono vantaggi per la diffusione, la valorizzazione, la comunicazione e l'interoperabilità, la loro applicazione nel campo dei Beni Culturali è estremamente importante: la trasformazione digitale non può prescindere dalla loro diffusione e dalla costante condivisione delle competenze per una gestione sempre più completa ed efficiente del Patrimonio.



# Indice

## 1. Introduzione

1.1	Obiettivi della ricerca.....	1
1.2	Stato dell'arte	
1.2.1	L'Heritage Building Information Modeling.....	6
	La semantica, le ontologie e i vocabolari.....	9
	I livelli di conoscenza.....	16
	L'interoperabilità.....	18
1.2.2	Le declinazioni dei modelli informati per il Patrimonio Architettonico	
	La valorizzazione e l'accessibilità .....	20
	La conoscenza e la documentazione storica.....	24
	La conservazione.....	27
	L'istruzione di una rete neurale artificiale.....	31

## 2. Metodologia e sue applicazioni

2.1	Premesse metodologiche.....	35
2.2	Casi studio.....	41
2.2.1	Un modello per la valorizzazione e l'accessibilità del Patrimonio: la Chiesa di Santa Maria di Portonovo	
	Research questions.....	43
	La ricostruzione digitale.....	44
	La stampa additiva.....	50

Risultati.....	54
2.2.2 Un modello per l'implementazione della conoscenza storica e la documentazione: la Mole Vanvitelliana di Ancona	
Research questions.....	56
La modellazione parametrica.....	60
Il data enrichment e la gestione documentale.....	69
Risultati.....	81
2.2.3 Un modello per la gestione della quarta dimensione e per la conservazione: Palazzo Ferretti di Ancona	
Research questions.....	84
L'acquisizione e l'analisi stratigrafica.....	86
La modellazione e il data enrichment.....	97
La Matrice di Harris.....	103
Risultati.....	107
2.2.4 Un modello come base per l'istruzione di una rete neurale artificiale: il Palazzo Ducale di Urbino	
Research questions.....	109
La modellazione e la classificazione semantica.....	111
Il dataset sintetico, il modello di rete neurale e il setup sperimentale.....	119
Risultati.....	127

### **3. Conclusioni**

Conclusioni.....	131
------------------	-----

## **Bibliografia**

Bibliografia.....	133
-------------------	-----

## **Appendici**

### **A. Trascrizioni archivistiche**

A.1. Trascrizioni integrali dall'Archivio Comunale di Ancona.....	145
A.2. Annotazioni parziali dall'Archivio Comunale di Ancona.....	151

### **B. Commenti alle trascrizioni archivistiche**

B.1. Commenti alle trascrizioni.....	154
--------------------------------------	-----

### **C. Contenuti video**

C.1. Realizzazione del modello tattile della Chiesa di Santa Maria di Portonovo.....	157
C.2. Documentazione digitale del Palazzo Ducale di Urbino.....	158

## Indice delle figure

Figura 1. Heritage Building Information Modeling (HBIM) per il Cultural Heritage. ....	4
Figura 2. Art & Architecture Thesaurus (AAT), Getty Research Institute, visualizzazione completa per il record scelto: la scozia. Per la modanatura vengono indicati un ID, una descrizione e un “hierarchy code”. Quest’ultimo, V.PJ – components, è di fondamentale importanza per l’attività di catalogazione poiché identifica univocamente l’oggetto. ....	14
Figura 3. Art & Architecture Thesaurus (AAT), Getty Research Institute, visualizzazione gerarchica per la scozia. ....	15
Figura 4. Workflow: from scan to H-BIM. ....	37
Figura 5. Strutturazione formale dell’Ordine dorico, la tassonomia segue la divisione dell’Ordine nelle sue modanature. ....	39
Figura 6. Creazione di un parametro istanza: tipo di famiglia, nome del parametro, valore e formula. Il Modulo controlla e regola le dimensioni geometriche delle singole modanature. ....	40
Figura 7. Processo metodologico dal reale alla ricostruzione digitale. ....	45
Figura 8. Cyclone, vista della nuvola di punti della Chiesa di Santa Maria di Portonovo: prospetti. ....	46
Figura 9. Revit, vista renderizzata del modello completo. ....	47
Figura 10. Confronto del modello in ambiente di lavoro Revit (sinistra) e Rhinoceros (destra). Il modello as built è stato importato in Rhinoceros per la sua ottimizzazione in funzione della fase di stampa. ....	48
Figura 11. Processo dalla point cloud al modello stampato. A sinistra la Chiesa di Portonovo in ambiente Cyclone, al centro il modello in Revit e a destra il facsimile stampato. ....	53
Figura 12. Vista della Mole Vanvitelliana dal Belvedere di Piazza San Gallo. Foto personale, marzo 2019. ....	57
Figura 13. Ortofoto del prospetto sud - est, lato interno del Lazzaretto. Sulla facciata sono identificabili chiaramente le tracce di una delle fasi storiche del Lazzaretto: la manifattura tabacchi. I segni presenti sulle murature indicano lo spazio che, dal 1947 al 1997, è stato occupato dai magazzini. ....	59

Figura 14. Ortofoto del prospetto sud - ovest, lato esterno del Lazzaretto. La facciata, restaurata a partire dal 1997, mostra gli ordini del corpo di fabbrica e la scansione delle murature mediante paraste che incorniciano le aperture centrali e di estremità. ....	60
Figura 14. Revit, vista del cortile interno del Lazzaretto e tempietto di San Rocco secondo le due fasi di modellazione: XVII secolo e XXI secolo. ....	61
Figura 15. Cyclone, vista della nuvola di punti del cortile interno della Mole e Tempio di San Rocco. ....	62
Figura 16. Cyclone, vista della nuvola di punti degli spazi interni della Mole. ....	63
Figura 17. Dalla nuvola di punti al modello HBIM. ....	63
Figura 18. Pianta del Lazzaretto: distribuzione funzionale. ....	64
Figura 19. Suddivisione semantica del sintagma arco-trabeazione che costituisce rispettivamente le facciate esterne e interne rispetto al cortile centrale. Sono stati individuati gli elementi principali poi scomposti in quelli secondari e in quelli di base. Di quest'ultimi, rappresentati nella colonna di destra, viene illustrata la parametrizzazione. ....	67
Figura 20. Revit, modellazione parametrica dell'arco esterno lato rivellino (sinistra) e dell'arco esterno lato cortile (destra). ....	68
Figura 21. Revit, modello e parametri per la famiglia trabeazione. ....	68
Figura 22. Revit, data enrichment: i vani identificati come magazzini sono stati implementati con parametri di progetto che raccolgono le informazioni archivistiche secondo lo standard ISAD. I documenti .pdf sulla destra sono i collegamenti diretti alle trascrizioni dall'ASAn e ai commenti dello storico. ....	80
Figura 23. Revit, data enrichment per le cisterne. ....	82
Figura 24. Point cloud di Palazzo Ferretti. In alto la facciata principale, in basso la terrazza sud ovest. ....	89
Figura 25. Metashape, elaborazione del rilievo fotogrammetrico della facciata: nuvola sparsa, nuvola densa e mesh. ....	90
Figura 26. Ortofoto estratta da Metashape. ....	90
Figura 27. Ortofoto estratta da Metashape: dettagli. ....	91
Figura 28. Corpi di fabbrica di cui si compone Palazzo Ferretti. ....	92
Figura 29. Identificazione delle fasi costruttive della facciata. ....	93



Figura 30. Individuazione dei rapporti stratigrafici tra le u.s. di una porzione della facciata analizzata. I rapporti stratigrafici vengono mappati con una simbologia convenzionale: onda (contemporaneità), freccia (posteriorità), zig-zag (rottura). Il bordo di rottura è ulteriormente evidenziato dal colore viola e le u.s. relative ad esso sono, rispettando le tradizionali convenzioni grafiche, riquadrate poiché unità di costruzione negativa. ....	96
Figura 31. Sotto-unità stratigrafiche: il primo numero è quello dell'u.s. di appartenenza e il secondo quello della parte dell'unità di cui si vuole sottolineare la specificità. .	97
Figura 32. Revit, modellazione della facciata principale di Palazzo Ferretti, vista complessiva e famiglie locali per cornici e portali d'accesso. ....	98
Figura 33. Revit, etichette delle u.s.: ciascuna di esse riporta l'ID/contrassegno univoco. .	99
Figura 34. Revit, dati implementati per l'u.s.15 .....	102
Figura 35. Revit, abaco multicategoria: ciascuna u.s. è elencata con i parametri implementati. ....	103
Figura 36. Revit, modello completo della facciata sud-ovest. ....	104
Figura 37. Stratify, pannello di gestione dei dati relativi alla singola unità stratigrafica: implementazione delle informazioni sul materiale, sulla consistenza e sulla fase. ....	105
Figura 38. Stratify, pannello di gestione dei dati relativi alla singola unità stratigrafica: implementazione delle relazioni di anteriorità, contemporaneità e posteriorità. ....	106
Figura 39. Stratify, costruzione della Matrice: per ciascuna u.s. sono elencati l'I.D. univoco coerente con il data enrichment, le fasi di creazione e il materiale. ....	106
Figura 40. Stratify, visualizzazione del diagramma di Harris. Le singole u.s., campite con gli stessi colori individuati dall'analisi stratigrafica, sono poste orizzontalmente al livello di tutte le altre u.s. a loro coeve. Le connessioni corrispondono alle relazioni di anteriorità o posteriorità. ....	107
Figura 41. Cyclone, vista della point cloud del Palazzo Ducale di Urbino. ....	112
Figura 42. Cyclone, vista della point cloud del Palazzo Ducale di Urbino: il Cortile d'Onore del Laurana. ....	113
Figura 43. Cyclone, vista della point cloud del Palazzo Ducale di Urbino: il Cortile d'Onore del Laurana. ....	114
Figura 44. Colonna corinzia nei tre LOD di rappresentazione: low, medium e high .....	115

Figura 45. Pianta del Piano Nobile del Palazzo Ducale con l'individuazione delle tipologie di volte. ....	116
Figura 46. Modellazione della volta a padiglione lunettata in ambiente di lavoro Revit. A sinistra modellazione del padiglione e delle lunette e a destra la volta "unita", vista in pianta e in prospettiva. ....	117
Figura 47. Identificazione delle classi di elementi per il cortile d'Onore del Palazzo Ducale di Urbino, edificio principale su cui si è impostato il lavoro di preparazione del setup sperimentale. ....	119
Figura 48. Esempi di modelli 3D di architetture storiche e relative nuvole di punti annotate. ....	121
Figura 49. Esempi di modelli 3D di singoli classi di elementi architettonici e nuvola di punti sintetica corrispondente ....	123
Figura 50. Architettura della rete neurale profonda adottata in fase sperimentale. ....	125
Figura 51. Visualizzazione dei risultati della segmentazione automatica di Palazzo Ducale (a) e Palazzo Ferretti (b). ....	129
Figura 52. Matrici di confusione per Palazzo Ducale (a) e Palazzo Ferretti (b). ....	130
Figura 53. Vista del modello 3D della Chiesa. Elaborazione in Autodesk Revit. ....	157
Figura 54. Vista del Cortile d'Onore del Palazzo Ducale di Urbino. Elaborazione in Autodesk Revit. ....	158

## Indice delle tabelle

Tabella 1. Elementi caratterizzanti il Lazzaretto: descrizione dei documenti d'archivio con indicazione della nomenclatura di catalogazione richiesta dallo standard ISAD. ....	73
Tabella 2. Documentazione iconografica conservata presso Archivio DICEA, Biblioteca comunale Benincasa di Ancona e Biblioteca Federiciana di Fano. Descrizione dei disegni d'archivio con indicazione della nomenclatura di catalogazione richiesta dallo standard ISAD. ....	79
Tabella 3. Dati implementati per ogni u.s. ....	100
Tabella 4. Punti acquisiti durante la campagna di rilievo. I primi dati fanno riferimento alla complessità del Palazzo Ducale, i secondi alla sola porzione relativa al Cortile d'Onore del Laurana. ....	112
Tabella 5. Panoramica degli oggetti 3D raccolti dai repository online. ....	123
Tabella 6. Risultati della segmentazione semantica di 8 classi ottenute sui dati TLS da Palazzo Ducale a Urbino. ....	128
Tabella 7. Risultati della segmentazione semantica di 6 classi ottenuti sui dati TLS di Palazzo Ferretti. ....	128

# Introduzione

## 1.1. Obiettivi della ricerca

Il *Building Information Modeling* (BIM) è definito come una riproduzione digitale e completa di un'architettura e racchiude le peculiarità dei modelli parametrici digitali. La sua introduzione nel mondo della rappresentazione ha cambiato il significato dei modelli intesi come sistemi informativi per l'architettura.

La prima definizione di *Heritage Building Information Modeling* (HBIM) è apparsa nel 2009 e indica un sistema di rappresentazione informativa dell'architettura costruita composto da una libreria di oggetti semanticamente strutturati e parametrizzati.

Sin dal principio l'HBIM ha creato nuove possibilità per la condivisione di informazioni differenti all'interno di un unico ambiente digitale e, nell'ambito del patrimonio culturale, si è configurato come un modo per accrescere la portabilità e per fornire dati a una più ampia comunità di utenti per scopi diversi.

Il concetto del lavoro collaborativo è inoculato nel BIM stesso, nel principio di un metodo efficiente di progettazione e manutenzione del costruito impiegato per una gestione efficace delle informazioni durante l'intero ciclo di vita del manufatto.

Nel campo del *Cultural Heritage* una grande potenzialità dell'HBIM è la sua capacità di combinare conoscenze e competenze multidisciplinari: la metodologia BIM applicata al Patrimonio richiede un approccio interdisciplinare e collaborativo che parte dal rilievo e passa per la modellazione, le analisi storiche, l'implementazione di database, ecc. e prosegue con il coinvolgimento di competenze specifiche.

L'HBIM può essere inteso come processo olistico, come strumento grazie al quale mantenere collegati tra loro, attraverso lo spazio e il tempo, informazioni e modelli alle diverse scale e con il quale consentire il lavoro condiviso di esperti con competenze diverse, al fine di raccogliere tutte le informazioni provenienti dalle fasi analitiche per

soddisfare l'esigenza di massimizzare la conoscenza a sostegno della conservazione, della diffusione e valorizzazione.

Le diverse forme di gestione rappresentano il *core* di questa tesi e la validazione di un flusso di lavoro per l'elaborazione di modelli dell'architettura storica spendibili per finalità diverse ne è l'obiettivo principale.

La verifica del *workflow* proposto parte dal rilievo come base di dati e si conclude con l'elaborazione di modelli per la gestione dell'architettura storica spendibili in ambiti di applicazione diversi: l'accessibilità e la valorizzazione, la ricerca documentale-archivistica, la conservazione e l'intelligenza artificiale. Attraverso le applicazioni metodologiche ai casi studio vengono mostrate diverse forme di gestione che consentono di definire una semantica per l'architettura storica.

Il riuso su più fronti della molteplicità dei dati che si hanno a disposizione per il miglioramento dell'accessibilità, della fruizione e per l'accrescimento del valore storico e documentale intrinseco dei beni culturali è un ulteriore obiettivo di questo lavoro. Reimpiegare le informazioni acquisite direttamente o estratte da approfondite ricerche, per fornire un quadro di conoscenza esaustivo e onnicomprensivo è possibile grazie all'integrazione e connessione di saperi e competenze diverse. L'approccio metodologico che viene illustrato con questa tesi mostra come tutte le peculiarità e le caratteristiche essenziali del BIM per l'esistente, possano essere spese per la salvaguardia del patrimonio e per una sua opportuna diffusione consapevole.

Nella prima parte della tesi viene illustrato uno stato dell'arte su quelli che sono gli elementi cardine della modellazione informata e che rappresentano il nucleo essenziale dei sistemi BIM: la semantica, le ontologie, i vocabolari, i livelli di conoscenza e maturazione e l'interoperabilità. Il panorama della letteratura viene inoltre completato con i paragrafi dedicati alle varie declinazioni dei modelli informati nell'ambito del Patrimonio Architettonico storico.

Nel secondo capitolo, relativo alla metodologia e sue applicazioni, vengono mostrati i casi studio selezionati per la dimostrazione degli obiettivi del lavoro di tesi: la Chiesa

di Santa Maria di Portonovo, la Mole Vanvitelliana di Ancona, Palazzo Ferretti di Ancona e il Palazzo Ducale di Urbino.

Ognuno di essi è legato a diverse forme di gestione del Patrimonio, rispettivamente: stampa additiva per la valorizzazione e l'accessibilità, documentazione storica e archivistica per l'implementazione della conoscenza, quarta dimensione per la conservazione e la datazione e segmentazione semantica e la classificazione delle nuvole di punti per l'istruzione di una rete neurale artificiale. Ogni caso studio è articolato secondo paragrafi e sotto paragrafi che consentono di chiarire approfonditamente i temi delle sperimentazioni a partire dalle *research questions* legate a ciascuno di essi.

Nella terza e ultima parte sono presentate le conclusioni al lavoro di ricerca: la trasformazione digitale nell'ambito dei beni culturali passa necessariamente per l'affermazione di paradigmi tecnologici e le diverse forme di gestione mostrate con le applicazioni metodologiche sono parte di questi. Gli approcci sperimentali mostrati hanno carattere innovativo nell'ambito delle attuali ricerche nel settore del disegno e della modellazione: gli obiettivi raggiunti consentono di aprire nuovi orizzonti di indagine e approfondimento.

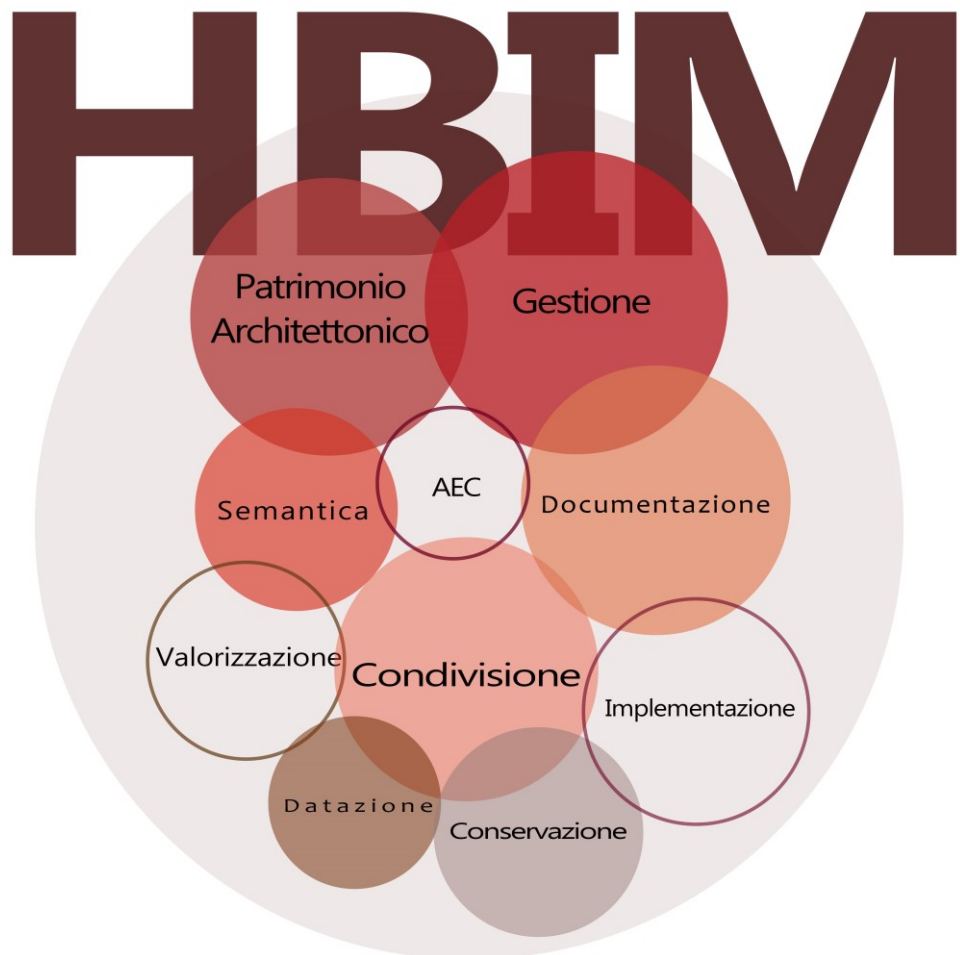


Figura 1. *Heritage Building Information Modeling (HBIM) per il Cultural Heritage.*

## 1.2. Stato dell'arte

Gli sviluppi delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) hanno determinato negli ultimi anni un significativo rinnovamento in diversi settori come la progettazione, la valorizzazione, il restauro e la conservazione degli edifici storici e stanno ancora oggi, implicando la necessità di applicare approcci nuovi al Patrimonio. Le tradizionali tecniche di rappresentazione grafica e di gestione degli edifici sono costantemente rivisitate con nuove conoscenze e aggiornate mediante l'uso appropriato di strumenti di nuova generazione per trasformare il processo di elaborazione delle informazioni in *digital data*.

A tal proposito le conoscenze sviluppate e approfondite nel settore disciplinare del disegno, rilievo e modellazione hanno condotto a un progresso sostanziale sia in termini pratici che teorici e, soprattutto, la trasformazione dei metodi e degli strumenti adottati si è configurata come una vera rivoluzione sia dal punto di vista economico che produttivo.

Al giorno d'oggi, il *Building Information Modeling* è al centro del dibattito scientifico e ha raggiunto importanti traguardi, prima nel campo delle nuove costruzioni e poi in quello degli edifici esistenti. La trattazione dell'HBIM può essere declinata, per il suo carattere a vocazione interdisciplinare e collaborativo, secondo molteplici aspetti.

Data la complessità del tema e la vastità della letteratura si è ritenuto opportuno trattare lo stato dell'arte dividendolo e sviluppandolo in due paragrafi: l'1.2.1 dedicato all'Heritage Building Information Modeling e l'1.2.2 dedicato alle declinazioni dei modelli informati per il Patrimonio Architettonico storico.

Il paragrafo 1.2.1. dopo una prima panoramica sulla definizione, sul significato e sull'essenza del BIM applicato al *Cultural Heritage* è articolato secondo quelli che possono a buon diritto essere considerati i concetti base che sottendono la modellazione informativa: semantica, ontologie e vocabolari, livelli di conoscenza e interoperabilità.



Il paragrafo 1.2.2. invece, presenta lo stato dell'arte relativo ad ogni aspetto della gestione sviluppato con i singoli casi di studio ed è impostato secondo la seguente struttura: valorizzazione e accessibilità, conoscenza e documentazione storica, conservazione e sostenibilità e istruzione di una rete neurale artificiale.

### **1.2.1. L'Heritage Building Information Modeling**

Il BIM ha creato uno strumento di grande innovazione per il settore dell'architettura, dell'ingegneria e della costruzione (AEC), coinvolgendo l'intero processo di costruzione grazie alla possibilità di gestire una grande quantità di dati e informazioni. Dalla sua introduzione il BIM è stato al centro di numerose sperimentazioni raggiungendo importanti traguardi e, nel caso del patrimonio architettonico, i vantaggi del HBIM si accompagnano ancora ad alcune criticità legate allo sviluppo di modelli virtuali che faticano a rappresentare strutture architettoniche reali complesse e alla gestione di informazioni eterogenee secondo una semantica coerente con tutte le fasi del processo di conservazione, valorizzazione e interoperabilità.

La prima definizione di HBIM è apparsa nel 2009 (Murphy, Mcgovern and Pavia, 2009) e indica un modo nuovo di modellare gli organismi edilizi esistenti, generando oggetti tridimensionali intelligenti in grado di contenere e gestire informazioni.

L'implementazione della modellazione informativa digitale sull'architettura storica ha prodotto, nell'ultimo decennio, una letteratura scientifica crescente.

Tuttavia l'applicazione del BIM al patrimonio architettonico, a causa della specificità del *Cultural Heritage* e della complessità delle informazioni che la metodologia dei sistemi informativi deve gestire, presenta, infatti, aspetti non ancora completamente indagati.

Queste problematiche derivano dalla necessità di controllare contemporaneamente indagini analitico-scientifiche, come quelle storico-documentali, metrico-morfologiche, materico-costruttive, stratigrafiche e di degrado, ma anche quelle critico-interpretative legate alla comprensione dei valori materiali e immateriali del patrimonio architettonico, come la sua autenticità.

Da qui l'importanza sia di indagare la trasformazione dello strumento per la conservazione dell'architettura, sia di sperimentare modelli parametrici specifici del dominio, adatti a ciascuna delle numerose attività coinvolte nelle strategie di cura del patrimonio (Daniotti, Gianinetto and Della Torre, 2020) e (Fiorani *et al.*, 2020).

La comunità scientifica nel corso dell'ultimo decennio, ha concordato nell'identificare l'HBIM come un vero e proprio processo di creazione di un modello a partire dai dati di rilievo, finalizzato alla creazione di librerie di oggetti parametrici e combinato con dati informativi per arricchirli.

Molto interessanti ed esaustive a tal proposito risultano essere le rassegne di (Saygi and Remondino, 2013), (Volk, Stengel and Schultmann, 2014) e (F. López *et al.*, 2018) e le considerazioni di (Osello *et al.*, 2016) e (Bianchini, Inglese and Ippolito, 2016) sul ruolo che il disegno ha in questo approccio e sulle principali criticità del BIM in relazione al patrimonio architettonico storico esistente.

I processi HBIM si propongono pertanto, secondo la lettura di settore, come strumenti per una rappresentazione complessa dell'AH, dove la natura onnicomprensiva del Building Information Modeling viene applicata a una realtà esistente (Maiezza and Tata, 2019).

L'irregolarità dell'architettura storica richiede riflessioni specifiche riguardo alla sua modellazione: alcuni studi sono stati dedicati all'integrazione della modellazione BIM con un sistema di conoscenza basato su ontologie (Simeone *et al.*, 2014) (Cursi, Simeone and Toldo, 2015), altri hanno riguardato le potenzialità legate alla parametrizzazione degli elementi architettonici e la conseguente creazione di librerie condivise (Chiabrandò, Lo Turco and Santagati, 2017) (Santagati *et al.*, 2018) (Brusaporci, Maiezza and Tata, 2018).

Oggi gli studi di settore, quindi, propongono diverse metodologie per analizzare i beni storici, ma nonostante ciò, è evidente che alcune questioni necessitano di ulteriori approfondimenti: la precisione e l'affidabilità del rilievo, l'aderenza del modello alla realtà, la gestione del tempo e dei dati storici, etc. (Barba *et al.*, 2020).

Considerando i modelli informativi anche come mezzi di visualizzazione digitale dei beni culturali, un riferimento imprescindibile è la Carta di Londra<sup>1</sup> (Beacham, Denard and Niccolucci, 2006) (Brusaporci and Trizio, 2013) che ha l'obiettivo di stabilire principi metodologici generali per le applicazioni di visualizzazione digitale nel settore della ricerca e della comunicazione dei Beni Culturali. La Carta definisce, inoltre, i presupposti per l'uso dei metodi della visualizzazione digitale in relazione all'integrità intellettuale, all'affidabilità, alla documentazione, alla sostenibilità e all'accessibilità.

Il cardine della Carta è proprio il principio relativo all'atto del documentare: l'organizzazione della documentazione utilizzata per arrivare alla visualizzazione deve essere visibile secondo criteri di trasparenza e rigore scientifico, così come l'individuazione delle ragioni che sorreggono le ipotesi alla base della visualizzazione e l'adeguatezza dei documenti agli standard e alle ontologie di ciascuna comunità di soggetti.

Il BIM, applicato al patrimonio costruito, aumenta enormemente le potenzialità intrinseche del sistema stesso poiché accresce il suo utilizzo nella creazione di modelli dell'esistente non solo come loro restituzione digitale e geometrica, ma soprattutto come collettori intelligenti di dati e informazioni, parametrici e con una semantica ben definita.

Nei sistemi HBIM ogni elaborazione è frutto di un processo di analisi critica che conduce alla modellazione e alla strutturazione semantica attraverso la progettazione

---

<sup>1</sup> "The London Charter for the Computer-based Visualisation of Cultural Heritage was conceived, in 2006, as a means of ensuring the methodological rigour of computer-based visualization as a means of researching and communicating Cultural Heritage [...]. In 2006, Beacham, Denard and Niccolucci published a concise account of the origins and rationale of the London Charter, concentrating on the issue of intellectual transparency".

La Carta di Londra per la *computer-based visualisation* del patrimonio culturale è stata concepita, nel 2006, come mezzo per assicurare il rigore metodologico della visualizzazione computerizzata come mezzo di ricerca e comunicazione del patrimonio culturale [...]. Nel 2006 i professori Richard Beacham, Hugh Denard e Franco Niccolucci hanno pubblicato un breve resoconto delle origini e della logica della Carta concentrandosi sulla questione della trasparenza intellettuale. La citazione, riportata in lingua originale, tradotta dell'autrice della tesi, è estratta da: <http://www.londoncharter.org/introduction.html>, consultato a ottobre 2020.

delle gerarchie delle parti costituenti. Con l'HBIM si applica una sorta di processo di *reverse engineering* sugli edifici esistenti, se ne studiano le evoluzioni costruttive e, nella fase di modellazione del manufatto architettonico, si studiano i procedimenti che hanno portato alla costruzione di quell'organismo edilizio.

I modelli BIM dell'*Architectural Heritage* (AH) sono quindi costituiti da oggetti intelligenti che, nonostante l'unicità del manufatto, possono essere ri-utilizzati e adattati ad altre architetture che presentano analogie costruttive e di stile architettonico. Inoltre gli elementi delle librerie parametriche dei modelli HBIM contengono informazioni reali ed estremamente eterogenee sulla documentazione grafica, la tipologia e le principali caratteristiche costruttive del periodo di costruzione a cui l'edificio appartiene, informazioni che possono essere aggiornate, sostituite e aggiunte. In definitiva il paradigma dell'HBIM è in grado di produrre dei veri *data collector* popolati da informazioni sia geometriche che non geometriche relative a vari temi: documenti storici, dati di monitoraggio, informazioni strutturali, stato di conservazione o di manutenzione. La messa a punto di modello 3D completamente interoperabili e ricchi di contenuti informativi rappresenta un cambiamento sostanziale nella gestione dell'AH (Quattrini *et al.*, 2017).

### **La semantica, le ontologie e i vocabolari**

La conservazione e la trasmissione delle conoscenze sono oggi affidate principalmente al mondo dell'*information technology*. Vantaggi indiscutibili riguardano l'aumento della quantità di informazioni disponibili e delle possibilità di accedervi e, nella maggior parte dei casi, l'accuratezza delle informazioni.

La creazione di archivi, di strumenti per le indagini e per la raccolta di dati richiede la combinazione di competenze tecniche, professionali e accademiche. Questa necessità è ancor di più di primaria importanza nel mondo dell'arte e dell'architettura dove, accanto ai metodi tradizionali di trasmissione della conoscenza, sussiste un processo di codifica basato sull'interpretazione delle immagini (Condotta and Eiche, 2013).

La raccolta, l'organizzazione e l'integrazione dei dati in un'unica struttura grafico-lessicale, unitamente alla costruzione semantica del modello digitale inteso non solo come mezzo per generare la struttura tridimensionale, ma come sistema cognitivo (Apollonio, Gaiani and Sun, 2013), sono il nucleo del sistema BIM. L'implementazione dei processi di raccolta dati e lo sviluppo di modelli 3D semanticamente arricchiti è un modo efficace per migliorare il dialogo tra le tecnologie ICT, i diversi esperti di Beni Culturali, gli utenti e le diverse discipline, sia sociali che tecniche (Di Giulio, Maietti and Piaia, 2016). La strutturazione semantica degli elementi che compongono il modello è un'azione ontologica soggettiva e interpretativa. Nell'ambiente BIM, infatti, l'operazione critica di discretizzazione nel passaggio dai modelli numerici a quelli geometrici prevede che il modellatore proceda dal *continuum* della realtà al digitale compiendo un passo interpretativo ed esplorando un dominio gerarchico in cui gli oggetti digitali trovano la loro collocazione (Inzerillo *et al.*, 2016) (Bianchini and Potestà, 2021).

Nell'ambito del Patrimonio il modello concettuale di riferimento è l'ontologia CIDOC/Conceptual Reference Model (CRM), il cui processo di standardizzazione è iniziato nel 2000 ed è stato completato nel 2006 con la sua accettazione come standard ISO 21127<sup>2</sup>.

Il CIDOC/CRM fornisce definizioni e una struttura formale per descrivere i concetti e le relazioni implicite ed esplicite usate nella documentazione del patrimonio culturale fornendo un quadro semantico comune su cui ogni informazione può essere mappata.

Il CRM si configura come un'ontologia il cui ruolo primario è quello di servire come supporto per la mediazione delle informazioni sul patrimonio culturale, necessaria base per trasformare le odierne fonti di informazione disparate e localizzate in una risorsa globale coerente e di valore (Oldman *et al.*, 2014).

---

<sup>2</sup> Il CIDOC CRM è risultato dai lavori del CIDOC Documentation Standards Group nel Comitato Internazionale per la Documentazione dell'International Council of Museums (ICOM). A partire dal 1996 l'approccio si è indirizzato verso metodologie di modellazione orientate agli oggetti, dando vita nel 1999 al primo CIDOC Conceptual Reference Model (CRM).

Si configura quindi, come linguaggio comune per gli esperti del settore e come guida per una buona pratica di modellazione concettuale.

Dal punto di vista normativo però non esistono regole che definiscano una classificazione univoca degli elementi storici e di librerie, anche la UNI 11337/2017 fa riferimento a nuove costruzioni. Nell'ambito della rappresentazione dell'architettura c'è ancora oggi pertanto la necessità di creare vocabolari comuni e condivisi in cui tutti gli elementi siano definiti. La creazione di modelli 3D semanticamente consapevoli e popolati di dati investigabili per diverse finalità e a più livelli non può prescindere, infatti, dall'identificazione di una logica per la classificazione secondo ontologie e da linguaggi universali che garantiscano una reale interoperabilità nel campo dei Beni Culturali.

Alcuni studi hanno focalizzato l'attenzione sulla modellazione di elementi architettonici usando ontologie e schemi standard per la generalizzazione ad altri edifici del patrimonio storico (Garozzo *et al.*, 2017), altre investigazioni si sono concentrate sulla possibilità di sviluppare una connessione tra ambiente BIM con una rappresentazione appropriata, semanticamente arricchita e flessibile delle informazioni, fornita da un'ontologia basata sul CIDOC/CRM (Acierno *et al.*, 2017). L'applicazione di modelli basati sull'ontologia nella rappresentazione, documentazione e analisi del patrimonio è stata recentemente utilizzata come modo per integrare la semantica nella rappresentazione 3D di artefatti storici, talvolta filtrati attraverso modelli IFC, *Industry Foundation Classes* (Pauwels *et al.*, 2013) o collegandoli direttamente a costruire modelli informativi.

La letteratura offre esempi di lavori di ricerca che hanno indagato strategie di modellazione e di classificazione semantica coerenti con i trattati e creazione di librerie condivise per l'architettura storica (Apollonio, Gaiani and Sun, 2012) (Dore and Murphy, 2013) (De Luca, 2013) (Quattrini, Battini and Mammoli, 2018) (Santagati *et al.*, 2018). Il patrimonio architettonico è estremamente variegato, non presenta una mole di soluzioni progettuali e costruttive omogenee tra loro tali da collocarsi in un insieme di regole unitarie. Nonostante i numerosi studi condotti in merito è evidente

che ancora oggi le librerie parametriche disponibili in ambiente BIM non sono sufficientemente flessibili per essere utilizzate nell'ambito dell'AH.

La strutturazione semantica del modello comporta la verifica delle ontologie preesistenti e dei protocolli di conversione, eventualmente proponendo classificazioni specifiche (Quattrini *et al.*, 2016). Una struttura semantica permette, inoltre, una gestione efficiente dei metadati legati ai modelli 3D stessi e la possibilità di visualizzare e rappresentare i dati relativi al processo ricostruttivo e al livello di accuratezza/precisione, nonché di verificare le diverse versioni dei modelli e di facilitare l'analisi comparativa (Gaiani *et al.*, 2015).

Le ontologie sono rappresentazione formale condivisa di un dominio della conoscenza, esprimono gli elementi principali di un campo specifico e le relazioni che intercorrono tra di essi. Le ontologie condivise, nei casi applicati al patrimonio culturale, sono utilizzate principalmente per sviluppare *tool* di alto livello per l'esplorazione di archivi digitali e contenuti digitalizzati, permettendo l'integrazione di risorse distribuite ed eterogenee e fornendo un quadro generale della conoscenza concettuale dell'edificio (Previtali *et al.*, 2020).

Per quanto riguarda i vocabolari in questo lavoro ci si è riferiti al *Getty Research Institute* che, con l'attività di uno dei suoi dipartimenti, si occupa di costruire e gestire thesauri controllati e gerarchicamente organizzati che contengono una terminologia strutturata per l'arte, l'architettura, le arti decorative, i materiali d'archivio, visivi e bibliografici (Figura 2 e Figura 3).

Secondo la definizione ISO 2788-198 un thesaurus è un vocabolario di un linguaggio di indicizzazione controllato in maniera formalizzata in modo che le relazioni a priori tra i concetti siano rese esplicite. Ai fini del patrimonio, per rispondere alle esigenze della comunità degli utenti, per facilitare la navigazione, la comprensione della struttura del tesoro stesso, sono comunemente utilizzate relazioni gerarchiche e associative. I vocabolari costituiscono un valore aggiunto nella creazione di una conoscenza complessiva condivisa e irrobustire i linguaggi comuni derivanti dalla ricchezza delle informazioni in ambiente BIM è ormai mandatorio. Nella letteratura di

settore i vocabolari rappresentano un passaggio comune nella descrizione del patrimonio in ambiente BIM: considerare un approccio olistico indica la possibilità di incrementare una visione organica di tutti gli aspetti coinvolti dall'HBIM, ovvero geometria, informazione, valori tangibili e intangibili, all'interno di una rete (Brumana, Ioannides and Previtali, 2019).

I vocabolari proposti dal *Getty* sono conformi agli standard internazionali e si configurano quindi come un punto di riferimento autorevole, per i catalogatori e i ricercatori, per migliorare l'accesso a database e siti web (Condotta and Eiche, 2013).

Collegare dati ed informazioni riferendosi al *Getty Art & Architecture Thesaurus* (AAT)<sup>3</sup> consente quindi una congruenza nella catalogazione degli elementi richiesti e contestualmente un più efficiente recupero delle informazioni in modo standardizzato (F. J. López *et al.*, 2018).

---

<sup>3</sup> <http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/>








[New Search](#)

[Previous Page](#)

[View Selected Records](#)

[Clear All](#)

Click the  icon to view the hierarchy.

Check the boxes to view multiple records at once.














-  Top of the AAT hierarchies
-  .... Objects Facet
-  ..... Components (hierarchy name)
-  ..... components (objects parts)
-  ..... <components by specific context>
-  ..... architectural elements
-  ..... <surface elements and surface element components>
-  ..... surface elements (architectural)
-  ..... <moldings and molding components for architecture>
-  ..... architectural moldings
-  ..... <architectural moldings by form>
-  ..... <architectural moldings by form: section>
-  ..... scotias

Figura 3. *Art & Architecture Thesaurus (AAT)*, Getty Research Institute, visualizzazione gerarchica per la scozia.

L'ID *Cultural Heritage Object Code* è stato introdotto proprio dal *Getty Vocabulary*, sottolineando l'unicità di ogni oggetto e allo stesso tempo la necessità di collegare progressivamente tutti gli oggetti grazie alla semantica e alla definizione dei contenuti.

## I livelli di conoscenza

Le funzionalità BIM richiedono una certa accuratezza, ricchezza di informazioni e concretezza dei dati necessari per soddisfare le loro finalità. Per descrivere la ricchezza di informazioni degli oggetti BIM, un concetto spesso utilizzato è *Level of Detail* (livello di dettaglio) o *Level of Development* (livello di sviluppo) indicato dall'acronimo LOD, che definisce informazioni geometriche e non degli attributi del modello. Nella norma UNI di riferimento (UNI 11337- 4, 2017), il LOD di un oggetto digitale viene considerato come risultato della combinazione del *Level of Geometry*, livello di sviluppo geometrico (LOG) e del *Level of Information*, livello di sviluppo informativo (LOI). Pertanto la diffusione della procedura BIM nelle applicazioni professionali ha permesso di testare e avvalorare le diverse specifiche e qualità sul LOD che non è solo qualità grafica dell'elemento, ma anche consapevolezza delle sue caratteristiche, seguendo la definizione e i protocolli dell'*American Institute of Architects*<sup>4</sup>. Secondo le indicazioni dell'AIA. Infatti, in generale nel BIM, il LOD del progetto deve essere rappresentato, in modo da determinare il grado di certezza, precisione e ricchezza delle informazioni contenute nell'elemento modellato e per valutare l'uso specifico a cui tali informazioni sono destinate.

La classificazione dei LOD, secondo la normativa UNI sopracitata, va dal grado A al G di completezza e semplificazione grafica dell'oggetto<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> Il protocollo AIA (<https://www.aiacontracts.org/contract-documents/19016-project-bim-protocol>) fa riferimento al documento AIA G202-2013, modello il cui scopo è quello di convalidare le procedure concordate che regolano sviluppo, trasmissione, uso e scambio di modelli di informazioni di costruzione su un progetto. Esso stabilisce i requisiti per il contenuto del modello a cinque livelli di sviluppo e gli usi autorizzati. Il documento definisce inoltre, la misura in cui gli utenti possono fare affidamento sul contenuto del modello, chiarendone la proprietà e stabilendo gli standard di modellazione delle informazioni di costruzione e i formati dei file.

<sup>5</sup> Secondo la UNI11337/2017: LOD A, oggetto digitale simbolico; LOD B, oggetto digitale generico; LOD C, oggetto digitale definito; LOD D, oggetto digitale dettagliato; LOD E, oggetto digitale specifico; LOD F, oggetto digitale eseguito e LOD G, oggetto digitale aggiornato. La suddivisione della serie di LOD prevede che i gradi dalla A alla E siano relativi alla progettazione architettonica e scala F e G legati invece alla rappresentazione costruita e al restauro.

Oltre al livello di sviluppo, soprattutto per quanto concerne la documentazione degli edifici esistenti, particolare importanza viene assunta dalla precisione del modello rispetto all'esistente.

A questo proposito negli ultimi anni in letteratura sono stati indagati altri livelli di conoscenza dei modelli BIM per il Patrimonio: alcuni studi interessanti (Bianchini and Nicastro, 2018a) (Bianchini and Nicastro, 2018b) hanno definito il *Level of Reliability*, livello di affidabilità (LOR) e il *Level of Evolution*, livello di Evoluzione (LOE) e loro criteri metodologici. La restituzione dei dati acquisiti avviene seguendo processi di ricostruzione per oggetti digitali e osservando strategie che si impostano sulla conoscenza e sull'interpretazione critica dell'operatore. In riferimento a questi concetti è possibile affermare che l'affidabilità dell'informazione rappresentata, e quindi il LOR, non è legata solo alle proprietà degli strumenti e agli approcci di misurazione, ma anche e soprattutto al processo di elaborazione critica dei dati, al modo in cui vengono gestiti. Il LOR viene definito come il livello di coerenza globale del processo in grado di definire qualsiasi oggetto digitale (Bianchini and Nicastro, 2018a). Per quanto concerne l'affidabilità intesa rispetto alle caratteristiche geometriche, alcune ricerche (Chiabrando, Lo Turco and Santagati, 2017) (Santagati, Lo Turco and Garozzo, 2018) (Garozzo, Santagati and Lo Turco, 2019) hanno investigato il *Level of Accuracy*, livello di precisione, del modello BIM rispetto alle nuvole di punti da cui è stato generato e definito il *Graphic Detail*, dettaglio grafico, secondo il livello di precisione relativo al rilievo metrico. Ulteriori riflessioni sull'accuratezza in termini di precisione complessiva, sono state condotte con il lavoro di (Campi, Di Luggo and Scandurra, 2017) che dimostra come sia possibile ottenere un modello tridimensionale ottimale per la conoscenza del patrimonio architettonico nonostante la mancanza di protocolli convergenti per conseguire la precisione richiesta per la modellazione e la rappresentazione.

## **L'interoperabilità**

L'interoperabilità è la capacità di scambiare informazioni e dati tra piattaforme *software* e applicazioni destinate a diverse funzionalità. I passaggi di dati sono possibili sia direttamente, sia attraverso formati di scambio proprietari o non proprietari. Lo scambio di dati e il lavoro condiviso sono le fondamenta della metodologia BIM, per questo creare un linguaggio comune tra le parti diventa imprescindibile al fine di standardizzare il flusso di lavoro, integrare e scambiare dati senza perdita di informazioni e rendere collaborativo il lavoro ai vari livelli della catena di progettazione e gestione (Osello, 2012) (Bruno, 2018).

Il formato generalmente associato al concetto di interoperabilità, quando ci si riferisce alla cooperazione nel mondo BIM, è l'*Industry Foundation Classes* (IFC). L'IFC è il più noto formato interoperabile, internazionale e aperto, sviluppato da BuildingSMART e nato per l'industria *Architecture, Engineering and Construction* (AEC), regolarizzato attraverso standard ISO 16739-1: 2018, atto a promuovere funzionalità neutre e collaborazione tra utenti.

Da quando è iniziata la sua diffusione, il formato IFC ha significativamente modificato i processi di interoperabilità riguardanti le entità architettoniche e tecniche in termini semantici, ma ad oggi non soddisfa ancora pienamente le esigenze dei beni culturali non esistendo una classificazione di tale formato per gli edifici storici esistenti (Diara and Rinaudo, 2020). Le difficoltà di archiviazione e portabilità tra i soggetti del patrimonio culturale che si occupano di tecnologie 3D, sono un ostacolo alla realizzazione di un modello completamente interoperabile che indubbiamente rappresenterebbe un cambiamento molto importante verso una gestione più efficiente del patrimonio architettonico storico.

Nel mondo del CH i problemi di interoperabilità sono spesso indagati per la trasferibilità in altri ambienti desktop, ad esempio dal BIM al FEM (Bassier *et al.*, 2016) (Quattrini *et al.*, 2019) e simulazioni MEP, in cui è importante ottenere risultati pratici lungo il processo di progettazione (Biagini *et al.*, 2016) , grazie ad un'elevata

precisione dei dati restituzione. Recentemente sono stati condotti nuovi studi nell'ambito del *data management e migration*, che hanno dimostrato come sia possibile utilizzare dei dati, provenienti da modelli BIM, in *software* di modellazione tridimensionale e visualizzazione interattiva (Roupé *et al.*, 2016), creando un sistema semiautomatico per il trasferimento di informazioni in database indagabili che permettono di ricreare automaticamente campi e valori relativi al modello 3D (Quattrini, Battini and Mammoli, 2018). Ulteriori linee di ricerca hanno investigato l'utilizzo della tecnologia *semantic-web* come punto di svolta grazie al quale il processo di interoperabilità per l'AH, per il quale non è stato ancora implementato un framework completamente interoperabile, può essere potenziato (Quattrini, Pierdicca and Morbidoni, 2017).

L'impiego degli standard *semantic-web*, ovvero *Resource Data Framework* (RDF) e *Ontology Web Language* (OWL), come linguaggio formale di rappresentazione della conoscenza, infatti, hanno mostrato numerosi risultati e diversi vantaggi (Costa and Madrazo, 2015).

In generale un modello BIM informato ed interoperabile può essere esportato, modificato, convertito e rinnovato in base alle diverse applicazioni, configurandosi come un vero e proprio database che permette all'utilizzatore di interrogarlo, modificarlo e aggiornarlo evitando le difficoltà derivanti dalle continue conversioni e differenze di *software*. Nel caso specifico dei BIM per il costruito questa esigenza risulta essere ancora più stringente, i dati semantici degli edifici storici e dei beni del patrimonio richiedono una condivisione di conoscenze, il più completa possibile, al fine di comprendere l'evoluzione dei manufatti stessi e di prevedere azioni di conservazione, intervento e tutela efficaci.

### **1.2.2. Le declinazioni dei modelli informati per il Patrimonio Architettonico**

I modelli parametrici informati e informativi, semanticamente strutturati e ontologicamente consapevoli possono essere impiegati per finalità diverse sfruttando le potenzialità che sono essenza stessa della metodologia BIM. Come già anticipato in principio del paragrafo 1.2., la trattazione dell'HBIM può essere declinata, per il suo carattere a vocazione interdisciplinare e collaborativo, secondo molteplici forme: ogni aspetto della gestione indagato con questo lavoro consente di porre l'attenzione su temi di grande attualità quali la valorizzazione e l'accessibilità, la documentazione storico-archivistica, la conservazione e non per ultimo, l'interazione con l'Intelligenza Artificiale.

Le procedure di modellazione parametrica finalizzate alla gestione del patrimonio culturale prevedono, per una profonda e completa tutela e comprensione del patrimonio storico architettonico, la costruzione di archivi digitali, quali sono di fatto i modelli BIM, che si configurano come strumenti di analisi che sfruttano la modellazione tridimensionale e le tecnologie per la visualizzazione dei dati.

I processi di conservazione, restauro, manutenzione, protezione, valorizzazione e riuso dei dati del patrimonio costruito, richiedono una conoscenza completa e accurata degli aspetti tangibili e intangibili dei beni architettonici. Una consapevolezza assoluta e chiara del patrimonio passa necessariamente per la sua digitalizzazione e la ricchezza e la varietà di informazioni sono la base essenziale per migliorarne la gestione.

#### **La valorizzazione e l'accessibilità**

Negli ultimi venti anni le politiche di valorizzazione del patrimonio culturale sono diventate centrali nella comunità europea. L'importanza attribuita all'uso del patrimonio come capitale culturale e come fattore potenziale per il turismo, ha generato una maggiore attenzione anche agli aspetti legati all'accessibilità e all'educazione al patrimonio stesso.

Lo stesso Codice dei beni culturali e del paesaggio (Decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42) all'articolo 3 si esprime a riguardo definendo la tutela come azione che "consiste nell'esercizio delle funzioni e nella disciplina delle attività dirette, sulla base di un'adeguata attività conoscitiva, ad individuare i beni costituenti il patrimonio culturale ed a garantirne la protezione e la conservazione per fini di pubblica fruizione". All'articolo 6, inoltre, il Codice chiarisce la valorizzazione come azione che "consiste nell'esercizio delle funzioni e nella disciplina delle attività dirette a promuovere la conoscenza del patrimonio culturale e ad assicurare le migliori condizioni di utilizzazione e fruizione pubblica del patrimonio stesso, anche da parte delle persone diversamente abili, al fine di promuovere lo sviluppo della cultura".

Se si parla di accesso al nostro patrimonio culturale comune, le esigenze delle persone non possono essere categorizzate in maniera schematica. Accade talvolta che si siano menomazioni fisiche o cognitive e l'azione di abbattimento delle barriere architettoniche non riguarda solo la possibilità di migliorare l'accesso ai servizi, ma anche di garantire che siano riconosciuti diritti ed esigenze.

Senza dubbio per quanto concerne la percezione e la comunicazione visiva ed extra visiva degli utenti, il disegno ha un ruolo centrale, soprattutto per le implicazioni che esso ha a livello sociale e dal punto di vista della rappresentazione del rapporto simbolo/disegno/rilievo.

I bisogni delle persone con disabilità sensoriale vengono indagate con il tema dell'*Universal Design* e si trasformano in esigenze figurative e di conoscenza. La grafica e la progettazione della comunicazione per i disabili visivi conducono inevitabilmente alla selezione di pochi segni e simboli riconoscibili e percepibili con il tatto o con gli altri sensi (Empler, 2013).

Gli oggetti tridimensionali, prodotti di operazioni di rilievo, disegno e modellazione, unitamente alle nuove tecnologie per la loro comunicazione, consentono ad ogni visitatore di interagire con il bene originale attraverso la gestualità, la voce e l'input visivo, generando così nuove opportunità di godibilità e conoscenza.



La letteratura scientifica di riferimento riconosce sempre più al patrimonio e ai luoghi che lo accolgono, lo conservano e lo espongono, un ruolo strategico, soprattutto in termini formativi. In questo senso le tecnologie digitali assolvono a una funzione importante, in relazione soprattutto al processo di partecipazione e ricreazione del patrimonio medesimo (Brunelli, 2014) (Luigini and Panciroli, 2018).

L'uso di tecnologie crea valore per i musei, per i luoghi della cultura e per i visitatori, che valorizzano la loro esperienza in modo personalizzato e interattivo, creando così nuove prospettive nel contesto del patrimonio culturale (Cantoni, Mosconi and Setti, 2019).

Nell'ultimo decennio il ruolo dei musei e dei circuiti museali ha subito cambiamenti radicali, trasformandosi da luogo contenitore a spazio pronto ad accogliere e formare pubblici sempre più eterogenei. Attraverso riflessioni interdisciplinari che coinvolgono pedagogia, didattica e tecnologia, alcuni studi esplorano il potenziale ruolo delle tecnologie immersive nel favorire l'apprendimento dall'esperienza di fruizione dell'arte (Coppola and Zanazzi, 2020).

A tal proposito le strutture museali hanno iniziato a adottare con più frequenza sperimentazioni tecnologiche innovative per un godimento delle opere sempre più accattivante e attrattivo, aumentando il grado di coinvolgimento del pubblico, anche prima che questo arrivi fisicamente alla sede del museo (Pignatelli, 2013) e diffondendo buone pratiche e paradigmi di fruizione meno tradizionali.

Alcuni studi propongono riflessioni sulla possibilità di dare risposte alle istanze più attuali del sistema dei musei, nell'era della riproducibilità fisica e digitale tridimensionale delle opere d'arte (Clini, Frapiccini, et al., 2018) (Puma, 2018).

Molti musei mostrano le loro collezioni temporanee o permanenti con criteri inclusivi, offrendo audioguide, modellini in scala, mappe tattili fisse e permanenti dei locali, nonché una selezione di pezzi delle loro collezioni da esplorare con il senso del tatto.

Nel campo della riproduzione digitale di contenuti, le applicazioni disponibili, la maggior parte delle volte, sono orientate alla vista.

Tra le più moderne tecnologie che troviamo a disposizione al giorno d'oggi, nell'ottica della quarta rivoluzione industriale, è stato introdotto un concetto che prevede nuovi processi di realizzazione di manufatti in modo totalmente diverso da quello tradizionale.

L'introduzione delle tecniche di *Additive Manufacturing* (AM) e delle cosiddette stampanti 3D ha dato inizio ad una nuova era, dimostrando di essere una tecnologia in grado di adattarsi a moltissimi settori industriali e di avere un'elevata efficienza in moltissimi altri campi applicativi, come i settori *automotive*, aeronautico, edilizia, beni di lusso, ecc. La tecnica di AM in questi ultimi anni ha conosciuto un forte sviluppo e si sta dimostrando estremamente efficace in numerosi campi di applicazione, in particolare è sempre più utilizzata per la creazione di riproduzioni tangibili di modelli digitali del CH.

La stampa additiva, attraverso la realizzazione di copie tangibili a partire da modelli virtuali digitali, rappresenta una delle tecnologie utilizzate per rendere più accessibile e fruibile il vasto patrimonio artistico. Infatti, l'evoluzione della tecnologia di AM ha aperto nuove opportunità per la riproduzione di modelli tattili che consentono anche alle persone con disabilità visive di accedere a siti culturali, ai reperti e qualsiasi altro oggetto riproducibile (Rossetti *et al.*, 2018).

La prototipazione rapida è una tecnica che permette la produzione di copie materiali di oggetti con geometrie complesse a partire dal modello matematico acquisito con tecniche laser scanner o fotografiche in tempi relativamente brevi e spesso senza essere costosa (Balletti, Ballarin and Guerra, 2017) (Xu, Ding and Love, 2017) (Sgherri and Anzani, 2017).

L'accuratezza nella riproduzione dei modelli *reality based* ha raggiunto livelli eccellenti nonostante l'attuale filiera della stampa 3D presenti ancora diverse difficoltà. La fabbricazione digitale è inoltre, molto adattabile - può essere ridimensionata o modificata - e ai fini dell'accessibilità ai beni culturali, essendo, per questo può migliorare notevolmente le informazioni fornite dalla rappresentazione tangibile di un artefatto (Scopigno *et al.*, 2017).

Gli oggetti riprodotti possono configurarsi non solo come ausilio alla comprensione e alla scoperta dei beni, ma anche come strumenti di supporto nel campo della diagnosi, del restauro, delle sperimentazioni educative museali, della comunicazione, della divulgazione e formazione dell'eredità culturale (Jo *et al.*, 2016) (Balletti, Ballarin and Vernier, 2018).

Le copie tridimensionali consentono, ad utenti museali generici o appartenenti a target specifici, un'esperienza multisensoriale andando oltre la classica percezione visiva, sostituendo temporaneamente o permanentemente l'originale.

L'AM, se assecondata dalla trasformazione del modello museale, può essere impiegata per garantire la qualità della conoscenza delle persone disabili, reintegrando il senso del tatto nelle esperienze culturali (Clini, Mehtedi, *et al.*, 2018).

### **La conoscenza e la documentazione storica**

Le diverse applicazioni delle piattaforme BIM sul patrimonio storico impongono una riflessione sulla qualità dei modelli che devono poter descrivere le deformazioni e le irregolarità dell'architettura costruita. La possibilità di annotare sui modelli informazioni che riguardano lo stato di conservazione, le fasi di trasformazione e cambiamento del manufatto costituisce uno dei *focus* più rilevanti circa l'utilizzo di tali strumenti nella gestione del costruito.

La comprensione dell'evoluzione del manufatto attraverso la mappatura delle fonti archivistiche passa necessariamente dalla fase del rilievo e della rappresentazione. L'atto del rilievo è inteso, infatti, come accurata metodologia di analisi, osservazione e interpretazione che sottende un processo di astrazione analitica selettiva e di sintesi finalizzata alla scelta del segno e dell'ordine gerarchico degli elementi da rappresentare, in funzione dei luoghi e dello scopo della rappresentazione (Pellegrini, 2015). Unitamente all'azione del rilievo quella del disegno che, non solo è inteso come segno di restituzione grafica, ma anche come testimonianza di architetture perdute e soprattutto della cultura del periodo in cui viene sviluppato e letto, una forma di rappresentazione e testimonianza di entità attuali e storiche (Pellegrini, 2016).

I beni architettonici sono definiti attraverso continui processi di modificazione e trasformazione: il sistema costruttivo ha un ruolo di primo piano e si configura come testimone delle culture architettoniche e costruttive succedutesi nel tempo. Il rilievo e la descrizione del sistema costruttivo richiedono un atto critico, in quanto usualmente non direttamente esperibile, ma studiato e ricavato sulla base di analisi dirette ed indirette (Brusaporci and Trizio, 2013).

La realizzazione di un modello BIM per l'architettura storica consente una maggiore conoscenza e consapevolezza del patrimonio architettonico, in termini qualitativi e quantitativi, e permette di migliorare la comunicazione tra gli operatori coinvolti nel rilievo e nelle successive operazioni (Inzerillo *et al.*, 2016).

La letteratura mostra come l'introduzione del concetto di BIM nei Beni Culturali richieda una particolare attenzione al fine di supportare conservazione preventiva, condivisione di informazioni e diffusione della conoscenza del patrimonio, per i professionisti, le istituzioni pubbliche e gli esperti coinvolti (Brumana, Ioannides and Previtali, 2019). Alcune ricerche recenti hanno proposto *tool software* per la modellazione di informazioni storiche sugli edifici consentendo la modellazione semantica dei dati 3D e l'ulteriore arricchimento con informazioni non geometriche degli edifici attraverso l'inclusione di nuovi concetti su documenti storici, immagini, prove di degrado o deterioramento (Garozzo *et al.*, 2017).

Altri studi hanno presentato protocolli per facilitare l'organizzazione delle informazioni nella fase precedente alla realizzazione del modello, in accordo con la metodologia HBIM collaborativa. L'applicazione di tali protocolli comporta un miglioramento nella gestione del materiale documentario, dei progetti, degli interventi e degli usi del bene al fine di ottenere una gestione efficace (García-Valdecabres, López González and Cortes Meseguer, 2020).

Nel campo della conservazione del patrimonio l'implementazione delle informazioni e l'arricchimento dei dati sono elementi significativi per migliorare la conoscenza storica e la documentazione delle architetture a cui fanno riferimento.

Preservare la memoria culturale ha condotto nel corso degli ultimi anni a riflessioni sulla democratizzazione degli strumenti digitali che, nel contesto dei beni culturali, hanno reso accessibile, ad un vasto panorama di utenti, una maggiore quantità di informazioni. Indubbiamente l'apporto tecnologico ha cambiato il modo di percepire la rappresentazione del passato, soprattutto da un punto di vista quantitativo, introducendo enormi archivi digitali che immagazzinano un numero esponenziale di dati e immagini (Cataldo, 2020). L'ampia gamma dei dati derivanti dalle diverse tipologie di informazioni che vanno ad arricchire i modelli contribuiscono a definire il patrimonio storico stesso (Dezen-Kempton *et al.*, 2018) e l'HBIM può essere considerato a tal proposito un potente strumento per attrarre contenuti utili agli esperti del dominio della conoscenza storico-documentale.

La metodologia BIM può essere considerata un ponte tra la documentazione d'archivio e il modello digitale, rivelandosi uno strumento efficace come *repository* di dati, orientato semanticamente, costituito non solo dalla geometria, ma anche da attributi alfanumerici (Parisi, Lo Turco and Giovannini, 2019). I modelli HBIM intesi come contenitori di dati, in ambito documentale rappresentano le architetture tenendo conto del passato e del presente come risultato di modifiche, estensioni e diverse classificazioni d'uso nel tempo.

Il re-impiego dei dati è stato affrontato anche dall'ICCD, Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione che ha predisposto delle linee guida che vedono i propri riferimenti normativi nel Codice dei beni culturali e del paesaggio (Decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42), nel Codice dell'Amministrazione digitale (Decreto legislativo 7 marzo 2005, n. 82) e nella Direttiva 2003/98/CE relativa al riutilizzo di documenti e dell'informazione nel settore pubblico. L'articolo 17 del Codice del 2004 spiega come le procedure e le modalità di catalogazione siano stabilite con decreto ministeriale e che a tal fine il Ministero, con il concorso delle regioni, individua e definisce metodologie comuni di raccolta, scambio, accesso ed elaborazione dei dati a livello nazionale e di integrazione in rete delle banche dati dello Stato, delle regioni e degli altri enti pubblici territoriali.

Per rendere possibile la circolazione dei dati e il loro riutilizzo da parte di tutti gli utenti interessati, infatti, sono state predisposte tre diverse piattaforme di accesso aperto al patrimonio catalografico del SIGECweb, in relazione ai diversi target di utenza: *Open Data*<sup>6</sup>, *Harvester OAI Provider*<sup>7</sup> e *SPARQL Endpoint e Linked Open Data*<sup>8</sup>.

## La conservazione

Il progetto di conservazione del costruito storico trova i suoi fondamenti, oltre che nella cultura, nella storia e nelle teorie del restauro, nell'applicazione di metodologie e conoscenze scientifiche e tecniche. Fra le diverse potenzialità del BIM vi è quella legata alla gestione diacronica dei contenuti semantici dei modelli digitali che può rivelarsi supporto essenziale già a partire dalla fase conoscitiva, imprescindibile premessa per qualsiasi progetto di conservazione e valorizzazione di architetture e siti storici. Come è noto, l'approccio al costruito esistente presuppone la definizione cronologica di tutte le strutture costituenti il manufatto attraverso analisi di carattere stratigrafico, di norma realizzate mediante disegni bidimensionali che inevitabilmente trascurano la relazione tridimensionale tra le parti. Il processo del rilievo, da cui il disegno e la rappresentazione prendono forma, non si esaurisce con la semplice

---

<sup>6</sup> OpenICCD è un'applicazione sviluppata sulla piattaforma open source DKan che espone dataset in formato aperto riferiti a diverse tipologie di contenuti: dati di catalogo, statistiche della catalogazione, soggetti produttori. I *dataset* vengono via via resi disponibili, anche in base al monitoraggio delle richieste dei fruitori, al fine di incontrare le esigenze degli utenti.

<sup>7</sup> L'OAI Provider gestisce le richieste secondo il protocollo OAI-PMH che è stato sviluppato dalla *Open Archives Initiative* ed è utilizzato per il recupero (o *harvesting*) dei dati. L'accesso avviene attraverso delle *query* al *provider* che restituisce le informazioni relative alle schede di catalogo pubblicate. Attualmente i dati sono pubblicati secondo gli standard PICO e *Dublin Core* in formato XML.

<sup>8</sup> Il sito [dati.beniculturali.it](http://dati.beniculturali.it) è la piattaforma di pubblicazione dei *Linked Open Data* (LOD) del MiC (Ministero della Cultura). Si tratta un'interfaccia machine-to-machine (m2m) che offre *linked open data* interrogabili direttamente da qualsiasi applicazione, rispondendo in tal modo alle esigenze di disporre di dati standardizzati e interoperabili espresse da varie comunità di sviluppatori e utilizzatori. L'accesso al sistema è libero e le informazioni sono a disposizione di chiunque voglia riutilizzare i dati per costruire applicazioni, interfacce *user-friendly* e servizi utili per i cittadini, gli studenti, i ricercatori, i turisti e altre categorie di utenti.

misurazione e rappresentazione grafica, ma costituisce la prima e indispensabile fase di un più ampio e impegnativo lavoro di valutazione critica dei manufatti documentati, durante il quale condurre anche analisi sull'autenticità delle strutture e sulle probabili trasformazioni subite nel tempo (Pellegrini and Salvetti, 2019).

L'analisi stratigrafica del costruito storico è un metodo scientifico-analitico di recente formazione, i cui principi, mutuati prima dalla geologia e poi dall'archeologia, vengono applicati per lo studio degli organismi architettonici a partire dagli anni Ottanta del Novecento. Questa metodologia di indagine, la cui validità si afferma laddove utilizzata come strumento di controllo del progetto di restauro contro l'alterazione e l'azzeramento della leggibilità stratigrafico-costruttiva, ha prodotto interventi esemplari, fondati sull'esigenza di "conoscere per conservare, conservare per conoscere" (Alagna, 2015).

Dallo stato dell'arte attuale emerge come nel settore della conservazione, l'archeologia dell'architettura imponga all'architetto un modo diverso di trovare una sintesi, un approccio che preveda l'analisi delle pratiche costruttive e dell'uso tradizionale dei materiali (Pittaluga *et al.*, 2020).

La letteratura di settore ha più volte evidenziato specifiche difficoltà nella realizzazione della cosiddetta Matrice di Harris, ovvero l'output più significativo di questo tipo di analisi, soprattutto in casi di architetture con articolazioni spaziali e volumetriche complesse interessate da profonde trasformazioni nei secoli.

Raccogliere e organizzare gerarchicamente le informazioni di trasformazione fisica del manufatto, automatizzare i processi di costruzione e graficizzazione delle sue fasi evolutive, nonché gestire i dati eterogenei risultanti dall'analisi conoscitiva diventano obiettivi da truardare per arricchire e rinnovare la metodologia consolidata di indagine del patrimonio architettonico. In questo paragrafo viene illustrata una metodologia che, a partire dall'evento, per lo più trasformativo dell'architettura storica, affronta il tema della sua modellazione in ambiente HBIM, e focalizzandosi sulla lettura stratigrafica degli elevati arriva al processo di conservazione e gestione di quel patrimonio con ricadute a più livelli.

La filiera di ricerca proposta lega finalità proprie di due ambiti disciplinari, il disegno e rilievo dell'architettura e il restauro e stressa metodologie consolidate con l'obiettivo di definire una strategia ottimale per modellare in ambiente HBIM la quarta dimensione del patrimonio architettonico, il tempo, quale coordinata essenziale per la sua interpretazione nel presente e fattore determinante per la sua coerente conservazione futura.

Sempre più negli ultimi anni l'applicazione del BIM è stata sfruttata per testare le sue potenzialità nel campo dei Beni Culturali: risultati interessanti, orientati all'ottenimento di modelli tridimensionali intesi come raccoglitori di dati e informazioni, sono stati raggiunti. Il sistema BIM è stato sfruttato per la gestione di documentazione, l'analisi di strutture storiche, nonché per la produzione di visualizzazioni a supporto della conservazione degli edifici storici (Tobiasz *et al.*, 2019).

L'HBIM ha dimostrato come la flessibilità nella gestione di dati eterogenei (geometrie, elementi decorativi, etc.) e delle fasi costruttive dell'oggetto architettonico siano dei punti di forza dei modelli digitali ottenuti dall'approccio BIM nella sua declinazione al Patrimonio Costruito. Nonostante ciò l'impatto effettivo nel campo degli interventi sugli edifici esistenti è ancora limitato e le sperimentazioni perfettibili – soprattutto in termini di creazione di modelli semanticamente consapevoli e ontologicamente strutturati (Murphy, McGovern and Pavia, 2013) (Simeone, Cursi and Acierno, 2019) (F. J. López *et al.*, 2018). Recentemente le ricerche sul tema si sono moltiplicate pur lasciando ancora alcune questioni aperte, tra queste quella relativa all'arricchimento semantico (Quattrini *et al.*, 2015) (Apollonio, Gaiani and Sun, 2016) (Di Giulio, Maietti and Piaia, 2016) (Gargaro, Giudice and Ruffino, 2018) (Maietti *et al.*, 2018) e all'implementazione di librerie mediante parametri specifici per la descrizione del patrimonio e la costruzione di database interrogabili (Santagati and Lo Turco, 2016).

In questa prospettiva, un tema non ancora sufficientemente investigato è proprio quello dell'analisi stratigrafica, della lettura sincronica delle fasi di sviluppo diacronico dell'architettura storica come chiave di conoscenza e molto più (Brusaporci *et al.*, 2018) (Spallone, Piano and Piano, 2016) (Trizio *et al.*, 2019).



La disciplina del restauro nutre dall'archeologia l'analisi dei dati stratigrafici per documentare l'evoluzione degli alzati. La diffusione della pratica di condivisione dei dati archeologici coinvolge in modo diversificato, le varie componenti della documentazione, interessando l'archivio dello scavo stratigrafico che rappresenta, proprio con la matrice di Harris, la base essenziale della conoscenza (Costa, 2019).

La stratigrafia archeologica, intesa come lo studio della sequenza delle azioni compiute nel passato, fornisce una solida metodologia per acquisire e gestire i dati, che può essere applicata a scavi archeologici, edifici esistenti, oggetti e altri contesti dove è possibile distinguere diverse le fasi di costruzione (dati 4D relativi all'evoluzione temporale). Con la matrice di Harris la formalizzazione dei passaggi coinvolti in ogni valutazione di affidabilità e visualizzazione si configurano quali fonti scelte e utilizzate nella ricostruzione virtuale (Demetrescu, 2015).

In un modello tridimensionale BIM, la sperimentazione di procedure per la rappresentazione della matrice di Harris, che fornisca una lettura chiara di ciascuno dei suoi elementi attraverso una metodologia di visualizzazione affidabile per i simboli e regole definite nella letteratura, (Borin, Bernardello and Grigoletto, 2020) è ancora allo stato embrionale. E' bene ricordare che quando si parla di progettazione BIM ci si riferisce non solo alla parametrizzazione e all'arricchimento dati, ma anche alla possibilità di governare contestualmente le sette dimensioni del progetto, con specifico riferimento agli aspetti legati alla modellazione tridimensionale (3D), al tempo (4D), ai costi (5D), alla gestione (6D) e alla sostenibilità (7D) (COMMITTE, 2017).

La quarta dimensione, nel caso di modelli BIM di edifici storici, è di fondamentale importanza in quanto base dati utile per l'organizzazione delle successive dimensioni cui già si è fatto cenno. Lo stesso CIDOC-CRM, l'ontologia di riferimento per il patrimonio culturale, evidenzia il ruolo preponderante del tempo. Esso infatti, organizza l'informazione secondo una logica "evento-centrica" in cui cioè il passato viene analizzato sulla base dell'evoluzione storica come una successione di eventi discreti nello spazio e nel tempo (Biagetti 2016).

## **L'istruzione di una rete neurale artificiale**

La metodologia laser scanner viene oggi ampiamente utilizzata per ottenere accurate rappresentazioni digitali 3D ed è adottata da architetti, archeologi e studiosi del patrimonio culturale. Le rappresentazioni digitali si presentano sotto forma di nuvole di punti, che però mancano di informazioni strutturate e semantiche e sono spesso insufficienti per condurre ulteriori analisi e studi sulla conservazione, sulla mappatura dei diversi stati di degrado, sull'identificazione dei materiali, etc. Per questo motivo, le nuvole di punti sono frequentemente utilizzate, all'interno di ambienti *software* BIM dedicati, come punto di partenza per costruire rappresentazioni 3D parametriche, che incorporano informazioni semantiche e dove gli elementi architettonici vengono identificati e adeguatamente classificati.

Il patrimonio architettonico costruito richiede infatti, per poter essere esplorato ed esaminato in modo significativo, elaborazioni che consentano di ottenere modelli HBIM semanticamente consapevoli e che siano interoperabili e arricchiti (Quattrini, Pierdicca and Morbidoni, 2017). A tale proposito la letteratura ha validato un flusso di lavoro che prevede la trasformazione di nuvole di punti in BIM, *Scan-to-BIM process* (Dore and Murphy, 2013) (Quattrini *et al.*, 2015) (Banfi, Stanga and Brumana, 2018). I diversi tipi di elementi architettonici devono essere identificati a partire dalla nuvola di punti, modellati, correttamente posizionati sulla scena e annotati secondo i vocabolari di dominio e le ontologie. Tale procedura, anche se molto affidabile in quanto realizzata manualmente da esperti di dominio dell'AH, risulta dispendiosa in termini di tempo e comporta la perdita di una numerosa quantità di dati dato che un'acquisizione ha molte più informazioni rispetto a quelle necessarie per descrivere un oggetto parametrico. L'evoluzione delle tecnologie e degli strumenti digitali, unitamente alla necessità di metodi sempre più automatizzati e affidabili che possano parzialmente superare l'attuale imprescindibile azione degli operatori del settore, ha recentemente orientato quindi, il focus della comunità di ricerca ad indagare possibili

meccanizzazioni della procedura (Previtali and Banfi, 2018) (Murtiyoso and Grussenmeyer, 2019) (Malinverni *et al.*, 2019).

C'è una grande necessità di automatizzare parzialmente il processo *Scan-to-BIM*, sviluppando metodologie e strumenti che siano in grado di assistere gli esperti del settore, rendendo l'intero processo più agile e veloce.

Recentemente sempre più attenzione è stata posta al tema dell'automazione della *pipeline* di ricostruzione partendo dalle nuvole di punti.

Nel corso degli ultimi anni, infatti, con la nascita di soluzioni di Intelligenza Artificiale (AI) sono comparsi sviluppi e risultati interessanti di automazione. In particolare, i metodi *Machine* e *Deep Learning* (ML/DL) hanno permesso lo sviluppo di algoritmi che consentono alle macchine di prendere decisioni basate su dati empirici di formazione (Grilli, Özdemir and Remondino, 2019).

Nel *Digital Cultural Heritage* la segmentazione semantica delle nuvole di punti con tecniche di DL o ML può aiutare a riconoscere i diversi tipi di elementi architettonici storici e quindi a velocizzare il processo di costruzione delle rappresentazioni parametriche del patrimonio architettonico.

Nel contesto degli edifici storici l'attività di identificazione automatica degli elementi, ovvero la segmentazione semantica delle *point cloud*, implica la classificazione di ogni punto nella nuvola come appartenente ad una particolare classe di oggetti architettonici (muri, finestre, solai, colonne, volta, etc.) e, trattandosi di patrimonio culturale, questa operazione è particolarmente impegnativa data la complessità e l'irregolarità delle geometrie e l'elevata eterogeneità degli oggetti rilevati.

Per questi motivi applicare strategie di ML o DL al dominio del DCH è molto difficile e i gruppi di ricerca impegnati su questo fronte stanno cercando di ottimizzare lo sfruttamento delle nuvole di punti per la loro classificazione semantica e segmentazione.

Mentre le tecniche di ML e DL si sono dimostrate efficaci nel segmentare semanticamente oggetti 2D, per quanto riguarda le nuvole di punti 3D le sperimentazioni nel campo del DCH sono ancora ridotte e le applicazioni limitate.

Alcuni risultati interessanti sono stati raggiunti mediante l'applicazione di tecniche di *deep learning* specificamente progettate per gestire le nuvole di punti (Qi, Su, *et al.*, 2017) (Qi, Yi, *et al.*, 2017).

Derivare nuvole di punti sintetiche annotate da modelli 3D esistenti con l'obiettivo di ottenere una massa interpretativa di dati da cui apprendere, senza la necessità di annotazioni manuali dispendiose in termini di tempo, di enormi quantità di dati TLS risulta senza dubbio innovativo. Sebbene le nuvole di punti sintetiche siano relativamente facili da ottenere, sono intrinsecamente diverse dai dati TLS reali, poiché hanno una struttura più regolare, non considerano gli errori accidentali degli strumenti topografici e, in genere, catturano un livello di dettaglio inferiore.

Lo stato dell'arte attuale fa principalmente riferimento a nuvole di punti utilizzate per il riconoscimento e la ricostruzione di geometrie relative a modelli BIM (Tamke *et al.*, 2016) (Macher, Landes and Grussenmeyer, 2017) e per il rilevamento automatico di fenomeni di degrado (Galantucci *et al.*, 2020).

Le sperimentazioni condotte sul Patrimonio costruito con tecniche di ML o DL (Grilli, Özdemir and Remondino, 2019) (Pierdicca *et al.*, 2020) e investigazioni sul confronto tra i metodi di apprendimento automatico per la segmentazione semantica dell'*Heritage* (Matrone *et al.*, 2020) sono ancora poche, pertanto si è deciso di approfondire questo aspetto all'interno del lavoro di tesi dimostrando la flessibilità dei modelli di gestione.

In letteratura, l'uso di *dataset* sintetici coinvolge diversi campi di applicazione. Il primo lavoro risale al 1975 quando Miller (Miller and Melton, 1975) generò dati di test appropriati per ottenere il miglioramento della qualità del *software* utilizzando una metodologia che metteva in relazione i dati di test del *software* funzionale con le sue specifiche formali per ottenere una corrispondenza.

Partendo da una singola immagine bidimensionale è possibile ricostruire la geometria 3D dell'oggetto completo usando un algoritmo di *deep learning* in grado di generare la rappresentazione della nuvola di punti 3D e di prevedere la forma reale dell'oggetto (Fan, Su and Guibas, 2017).

Ulteriori approcci basati sull'apprendimento supervisionato riguardano la classificazione di scene urbane reali 3D acquisite da Terrestrial, Vehicle e Aerial Laser Scanner (Li *et al.*, 2017) e inoltre, altre ricerche (Ros *et al.*, 2016) hanno mostrato come un *dataset* di immagini sintetiche di scene urbane, estratto automaticamente, sia in grado di migliorare le prestazioni di segmentazione semantica 2D.

Per quanto concerne il patrimonio culturale il problema principale è la mancanza di dati annotati: alcuni studi recenti (Martínek, Lenc and Král, 2019) hanno addestrato un classificatore di rete neurale ricorrente convoluzionale utilizzando un *dataset* sintetico e avvalorato il loro approccio con un *dataset* reale annotato. Altri invece (Xu *et al.*, 2018), hanno utilizzato un *dataset* sintetico che presenta scene sia con forme generate sia reali per addestrare Relight-Net, una profonda rete neurale convoluzionale.

Un ulteriore studio interessante per irrobustire lo stato dell'arte di questa sperimentazione è quello rappresentato dall'approccio di (Tran and Khoshelham, 2019) che ha utilizzato sia un *dataset* sintetico sia quello di riferimento ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*)<sup>9</sup> per valutare le prestazioni nel rilevamento delle differenze tra un modello informativo e una nuvola di punti di un ambiente interno.

Le reti neurali profonde sono progettate specificamente per affrontare l'irregolarità delle nuvole di punti, gestendone direttamente i dati grezzi, anziché passare a una rappresentazione regolare intermedia. Una delle reti neurali di riferimento è senza dubbio PointNet che tiene conto dell'intorno dei punti, anziché agire su ciascuno di essi separatamente, consentendo così lo sfruttamento delle caratteristiche locali e migliorando le prestazioni del modello di base (Qi, Su, *et al.*, 2017).

La DGCNN, rete analizzata da (Wang *et al.*, 2019) e punto di riferimento per l'avanzamento di questo caso studio, introduce l'operazione EdgeConv che è un modulo in grado di descrivere le relazioni tra un punto e i suoi intorni. Questo modulo è progettato per essere invariante alla disposizione dei punti vicini ed alle permutazioni.

---

<sup>9</sup> <https://www.isprs.org/data/>

# Metodologia e sue applicazioni

## 2.1. Premesse metodologiche

Prima di illustrare più nel dettaglio l'aspetto metodologico e le applicazioni nei casi studio scelti, si ritiene opportuno riportare, seppur brevemente, quelle che sono state le premesse fondamentali al lavoro di ricerca svolto.

Come già emerso dallo stato dell'arte presentato nel capitolo precedente (cfr. 1.2.), quando si parla di BIM occorre tenere presente che si intende un processo che riguarda lo sviluppo, l'analisi e la gestione di un edificio a partire dalla creazione di un modello 3D intelligente. Il modello BIM del patrimonio costruito è un modello intelligente che contiene e gestisce informazioni e si configura come un vero e proprio *data collector* utile in diversi ambiti applicativi per l'ottenimento di risultati specifici.

Il processo di realizzazione di un HBIM parte dall'oggetto reale ossia dal Bene Culturale, e non da un progetto ideale, e arriva al modello, cioè ad un'astrazione della realtà.

Nella specificità dell'HBIM il processo si propone come un nuovo sistema per la modellazione, la documentazione, la gestione, la pianificazione e la manutenzione di architetture storiche. È possibile affermare quindi che, considerando l'approccio BIM applicato agli edifici storici i vantaggi di questa metodologia, oltre a quelli precedentemente delineati, sono molteplici e riguardano il controllo della complessità dell'architettura, la progettazione di interventi di restauro e conservazione, l'analisi strutturale e non ultime, le rappresentazioni 3D interattive per fini e usi culturali ed educativi.

Data la complessità e l'articolazione degli edifici storici le applicazioni HBIM implicano che vengano affrontate diverse problematiche e che siano esaminate esigenze e limiti legati a questa metodologia:

- una sistematica standardizzazione degli elementi architettonici dell'edificio, utile per la realizzazione di librerie dedicate ai beni culturali intese come *digital libraries* parametrizzate e riutilizzabili;
- la necessità di classificare gli elementi architettonici, strutturando non solo idealmente, ma anche a livello pratico il manufatto in categorie a diversi livelli gerarchici e creando in questo modo un *database* per l'inserimento di nuove librerie;
- la modellazione e la parametrizzazione di nuovi *smart object* che rappresentano gli elementi architettonici la cui complessità richiede sia una conoscenza approfondita delle tecniche costruttive storiche sia capacità di modellazione e interpretazione dei dati geometrici acquisiti. L'importanza culturale, storica e artistica del bene oggetto della modellazione HBIM richiede una necessaria ed attenta progettazione dei passi necessari alla realizzazione tridimensionale digitale. La procedura di ricostruzione virtuale del CH non è semplice: gli oggetti da modellare sono costituiti da componenti con morfologie eterogenee, complesse e irregolari. Pertanto è essenziale partire da approcci tecnici, come le nuvole di punti, per modellare le diverse componenti parametriche virtuali e ottenere un modello *BIM as Built* del patrimonio architettonico analizzato.

Il flusso di lavoro dall'acquisizione dati al modello tridimensionale HBIM è ormai consolidato (Quattrini *et al.*, 2015) e consiste in una sequenza di fasi operative chiave nel processo per la realizzazione di modelli per la gestione del patrimonio architettonico storico. Come è possibile vedere in figura (Figura 4) la colonna centrale rappresenta le fasi necessarie per la costruzione del processo e la creazione del modello.

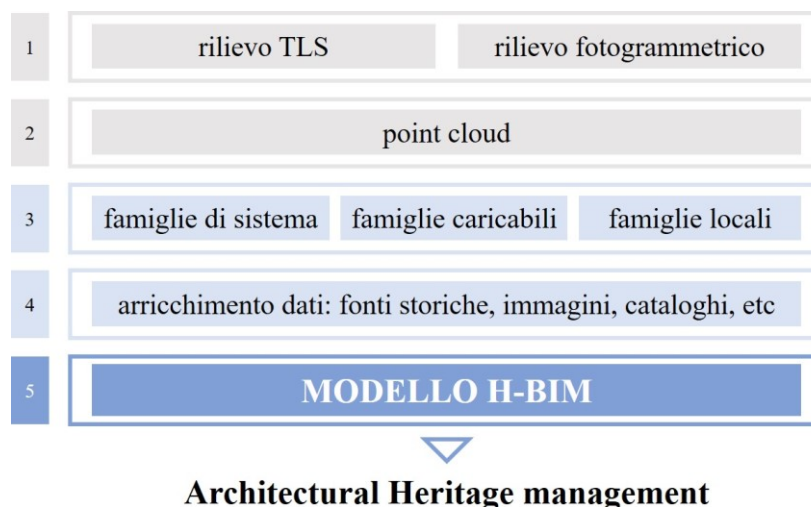


Figura 4. *Workflow: from scan to H-BIM*

Le nuvole di punti ottenute dall'integrazione del rilievo TLS e fotogrammetrico costituiscono la base del flusso di lavoro e consentono di specificare le condizioni esistenti di un edificio. Prima di poter essere associata in ambiente di lavoro Autodesk Revit, una nuvola di punti deve essere indicizzata con Autodesk ReCap.

A tal proposito, dai *software* di elaborazione delle *point cloud*, risulta fondamentale l'esportazione di file in formati gestibili all'interno di ReCap. La mole di dati acquisita è molto elevata e, per questo motivo, i modelli di Revit contengono collegamenti alle nuvole di punti come riferimento, consentendo la creazione di più istanze per ciascuno di essi.

Proseguendo con la lettura delle fasi si passa alla creazione delle famiglie all'interno di progetti per giungere poi allo step del *data enrichment* con l'inserimento nel modello *reality based* di diversi tipi di dati ed informazioni: documenti storici, immagini, cataloghi, tabelle, dati strutturali, stato di conservazione e così via.

La somma delle fasi precedentemente illustrate è un modello 3D intelligente, completo in termini descrittivi geometrico – dimensionali, popolato da contenuti informativi e interoperabile.



Nella rappresentazione del patrimonio architettonico o nella ricostruzione virtuale di architetture non più esistenti l'HBIM offre la possibilità di ottenere costruzioni semantiche dei modelli digitali e di mostrare la somiglianza concettuale tra i trattati e i sistemi informativi (Apollonio, Gaiani and Sun, 2013). Il modello parametrico, combinando il disegno e la comprensione spaziale, cambia il modo di studiare e sviluppare forme e oggetti (Bianconi, Filippucci and Meconi, 2018). Inoltre, gli ordini architettonici definiscono un approccio grammaticale nella decostruzione degli elementi semantici e i trattati esaminano l'elaborazione delle regole grammaticali, la struttura del loro linguaggio architettonico (Morolli, 1986) (Morolli, 2013).

A conclusione di questo paragrafo si ritiene utile riportare un primo approfondimento operativo condotto in ambiente di lavoro Autodesk Revit: la modellazione parametrica dell'ordine dorico che in quanto facilmente identificabile e replicabile nelle architetture storiche, è stato scelto come *benchmark* della sperimentazione.

L'analisi dell'ordine classico secondo i Trattati, in particolare quello vitruviano (Gros, 1997), ha permesso, sulla base della semantica, di strutturare un modello 3D parametrico organizzato secondo un vocabolario controllato, di raggruppare ogni suo elemento in unità coerenti e di scegliere un tipo di rappresentazione in grado di estrarre dalle forme le informazioni necessarie (De Luca, 2014).

La geometria delle modanature dell'ordine ha comportato lo studio delle regole geometriche che sottendono le proporzioni e le relazioni tra il modulo e le sue parti. Queste hanno rappresentato il *core* della fase di modellazione e hanno consentito di implementare e definire famiglie ontologicamente e semanticamente consapevoli in grado di descrivere completamente l'ordine stesso.

Un primo passo fondamentale è stato, infatti, la strutturazione formale dell'oggetto di studio e l'attribuzione di una tassonomia che seguisse la divisione dell'ordine e dei suoi elementi costitutivi: le modanature (Figura 5). La morfologia delle famiglie caricabili presenti nelle librerie del *software* non avrebbe consentito il mantenimento delle proporzioni per questo, per quanto riguarda la parametrizzazione, sono state realizzate tre famiglie caricabili: trabeazione, colonna e base.

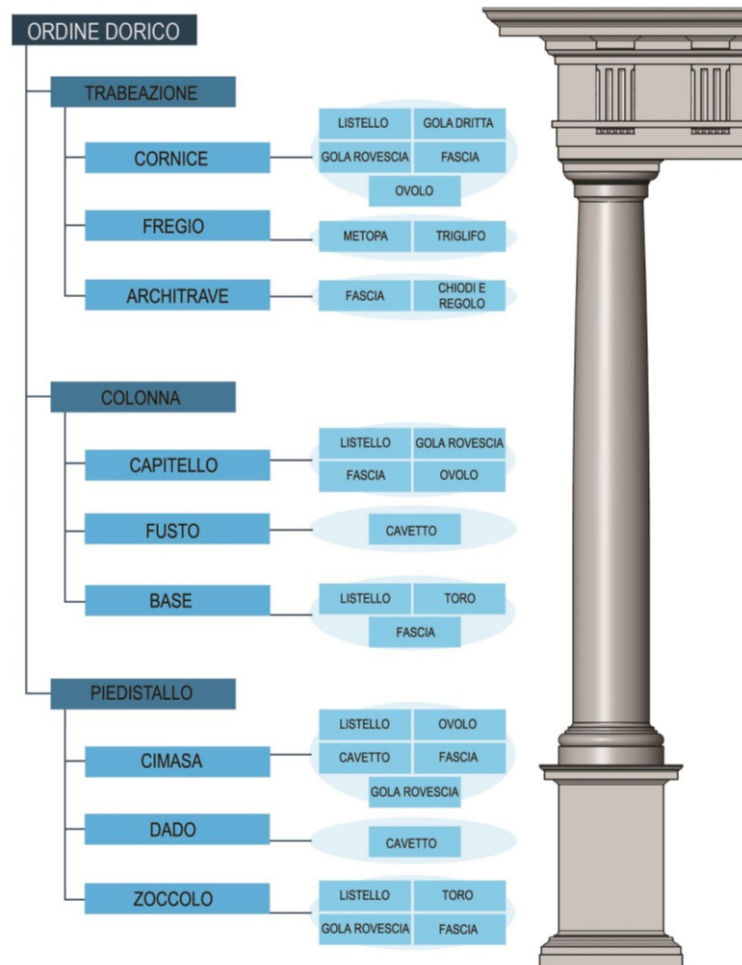


Figura 5. *Strutturazione formale dell'Ordine dorico, la tassonomia segue la divisione dell'Ordine nelle sue modanature.*

Nella fase di creazione delle stesse particolare attenzione è stata posta nell'impostazione dei parametri istanza creati per le modanature che sono state definite secondo formule matematiche che permettono un collegamento generale delle singole parti al modulo assunto a elemento di controllo dell'intero ordine (Figura 6).

Come in tutti gli ordini, il modulo controlla le parti che descrivono le dimensioni geometriche, quindi una volta definiti tutti i parametri dell'istanza, questi sono stati

messi in relazione ad esso, utilizzando formule matematiche precedentemente validate dalla trattatistica (Barrozio da Vignola, 1562).

Questa prima parte della ricerca ha permesso di comprendere alcuni dei concetti chiave della logica HBIM: la definizione di una semantica di base e di vocabolari condivisi, per l'implementazione di librerie parametriche per una conoscenza e gestione del patrimonio architettonico il più possibile esaustive.

Parametro	Valore	Formula	Blocca
<b>Vincoli</b>			
Modulo (default)	1080.00	=	<input type="checkbox"/>
<b>Dimensioni</b>			
Aggetti (default)	270.00	= Modulo / 4	<input type="checkbox"/>
Aggetti 2 (default)	225.00	= Aggetti - Toro 9	<input type="checkbox"/>
Altezza Cimasa (default)	270.00	= Modulo / 4	<input type="checkbox"/>
Altezza Dado (default)	2160.00	= Modulo * 2	<input type="checkbox"/>
Altezza Zoccolo (default)	450.00	= Modulo / 3 + (Modulo / 3) / 4	<input type="checkbox"/>
Cavetto 4 (default)	22.50	= Listello 1	<input type="checkbox"/>
Cavetto 7 (default)	67.50	= Altezza Dado / 32	<input type="checkbox"/>
Cimasa (default)	67.50	= Modulo / 16	<input type="checkbox"/>
Fascia 11 (default)	112.50	= (Altezza Zoccolo / 5) + Listello 1	<input type="checkbox"/>
Fascia 12 (default)	180.00	= (Altezza Zoccolo / 5) * 2	<input type="checkbox"/>
Fascia 5 (default)	112.50	= (Altezza Cimasa / 4) + (Altezza Cimasa / 6)	<input type="checkbox"/>
Gola Rovescia 10 (default)	90.00	= Toro 9 * 2	<input type="checkbox"/>
Gola Rovescia 6 (default)	67.50	= Altezza Cimasa / 4	<input type="checkbox"/>
Larghezza Cimasa (default)	2025.00	= Modulo + (Modulo * 3 / 8) + Aggetti * 2	<input type="checkbox"/>
Larghezza Dado (default)	1485.00	= Modulo + (Modulo * 3 / 8)	<input type="checkbox"/>
Larghezza Zoccolo (default)	2025.00	= Larghezza Cimasa	<input type="checkbox"/>
Listello 1 (default)	22.50	= (Altezza Cimasa / 6) / 2	<input type="checkbox"/>
Listello 3 (default)	11.25	= Listello 1 / 2	<input type="checkbox"/>
Listello 8 (default)	22.50	= Listello 1	<input type="checkbox"/>
Ovolo 2 (default)	33.75	= Listello 1 + (Listello 1 / 2)	<input type="checkbox"/>
Toro 9 (default)	45.00	= Listello 1 * 2	<input type="checkbox"/>
Gola Rovescia 10_X1 (default)	55.00	= Gola Rovescia 10 - Gola Rovescia 10_X2	<input type="checkbox"/>
Gola Rovescia 10_X2 (default)	35.00	= Gola Rovescia 10 - Gola Rovescia 10_X1	<input type="checkbox"/>
<b>Dati identità</b>			

Figura 6. Creazione di un parametro istanza: tipo di famiglia, nome del parametro, valore e formula. Il Modulo controlla e regola le dimensioni geometriche delle singole modanature.

## 2.2. Casi studio

La conoscenza, la gestione e la conservazione del patrimonio culturale necessitano di riflessioni e attività svolte a diverse scale e livelli di dettaglio. Le metodologie operative in uso nel vasto mondo dei Beni Culturali sfruttano le potenzialità offerte dalla sempre crescente implementazione di tecnologie digitali innovative. Il *Building Information Modeling* si colloca tra di esse, come un sistema in grado di offrire strumenti che consentano l'interoperabilità tra informazioni e dati in diversi tipi e formato e la collaborazione interdisciplinare.

Dalla sua introduzione, il BIM, essendo sviluppato principalmente per la progettazione, la costruzione e il management, ha prodotto notevoli vantaggi nel settore delle nuove costruzioni. Sempre più negli ultimi anni l'applicazione del BIM è stata sfruttata per testare le sue potenzialità nel campo dei Beni Culturali: risultati interessanti, orientati all'ottenimento di modelli tridimensionali intesi come raccoglitori di dati e informazioni su più livelli, sono stati raggiunti.

Successivamente alla prima applicazione (cfr.2.1) il lavoro di tesi si è concentrato su quattro casi studio principali che hanno permesso di declinare il tema della gestione secondo aspetti diversi.

Ad ognuno dei casi qui di seguito presentati, è legata, infatti, una specifica forma di gestione che mostra le potenzialità del sistema BIM per il patrimonio storico architettonico.

Come illustrato precedentemente (cfr. 1.2), l'HBIM è utilizzato, sempre con più frequenza, per la generazione di documentazione per i conservatori, per gli storici, per l'analisi delle strutture storiche, per la valorizzazione, per la produzione di visualizzazioni a supporto della conservazione degli edifici (Murphy, McGovern and Pavia, 2013) (Oreni *et al.*, 2013) (Dore and Murphy, 2017) (Campi, Di Luggo and Scandurra, 2017) (Simeone, Cursi and Acierno, 2019), per le analisi stratigrafiche degli elementi costruttivi, per comprendere l'archeologia degli edifici (Spallone, Piano and

Piano, 2016) (Borin, Bernardello and Grigoletto, 2020) e per sfruttarne le potenzialità in intelligenza semantica (Pierdicca *et al.*, 2019) (La Russa and Santagati, 2020).

I casi studio dimostrano come la metodologia HBIM sia spendibile per finalità e campi di applicazione diversi e abbia un carattere fortemente interdisciplinare:

- Chiesa di Santa Maria di Portonovo: valorizzazione e accessibilità del Patrimonio. Integrazione dei *know how* del mondo del rilievo e del disegno, della fruizione e della prototipazione rapida;
- Mole Vanvitelliana: documentazione e implementazione della conoscenza storica. Mappatura delle fonti archivistiche per una più completa comprensione dell'evoluzione del manufatto e per l'individuazione di una metodologia per la gestione documentale condivisa con esperti storici;
- Palazzo Ferretti, Museo Archeologico Nazionale delle Marche: conoscenza, gestione della quarta dimensione e analisi della stratigrafia e dell'evoluzione del bene storico. Integrazione e sperimentazione di metodologie della rappresentazione e del restauro architettonico;
- Cortile d'Onore del Palazzo Ducale di Urbino: modellazione a servizio delle conoscenze e applicazioni nell'ambito dell'intelligenza artificiale.

## **2.2.1 Un modello per la valorizzazione e l'accessibilità del Patrimonio: la Chiesa di Santa Maria di Portonovo**

### **Research questions**

Negli ultimi anni le tecnologie stanno rapidamente cambiando gli approcci alla conservazione, valorizzazione e fruizione del patrimonio e la riproduzione digitale viene sempre maggiormente messa a servizio dei beni culturali.

I nuovi sistemi di digitalizzazione e comunicazione dei manufatti artistici hanno permesso la definizione di paradigmi di accesso e godimento dei beni, consentendone contemporaneamente una maggiore conoscenza. A questo proposito la realizzazione di modelli tridimensionali *reality based* consente una lettura complessiva dei beni culturali e fornisce strumenti in grado di portare ad una maggiore diffusione della conoscenza del patrimonio stesso. Proprio per le varie possibilità che i modelli 3D offrono in termini di apprendimento, recentemente sono state testate numerose proposte per rendere più accessibile il patrimonio artistico a diversi target di utenti.

Nella creazione e divulgazione delle visualizzazioni digitali, infatti, si dovrebbero tenere in considerazione i modi in cui i risultati del lavoro possono contribuire allo studio, alla conoscenza, all'interpretazione e alla gestione del patrimonio culturale.

Gli scopi, i metodi e i piani di divulgazione della visualizzazione digitale dei beni culturali dovrebbero considerare con attenzione quanto può migliorare l'accesso ai beni stessi, che risultano altrimenti inaccessibili (EPOCH, 2009).

La realizzazione mediante processo di Additive Manufacturing (AM) di un facsimile in scala della chiesa di Santa Maria di Portonovo, si colloca all'interno della filiera della valorizzazione e dell'accessibilità del Patrimonio costruito e del grande tema del riuso di dati e modelli.

La stampa tridimensionale è stata frutto di un'operazione che ha visto la collaborazione di esperti provenienti da settori disciplinari diversi. L'integrazione dei *know how* del mondo del rilievo e del disegno, della fruizione e della prototipazione rapida, l'insieme

di saperi e abilità, competenze ed esperienze di ciascun partner del progetto<sup>10</sup> hanno consentito di raggiungere l'obiettivo primario del lavoro: l'accessibilità al patrimonio architettonico.

La stampa fisica del modello non può prescindere dalla percezione completa del luogo riprodotto poiché per conoscere un oggetto, sia esso un bene mobile o immobile, non si può fare a meno della sua forma fisica. La presenza di una fedele riproduzione del Bene, delle sue componenti artistiche e architettoniche, costituisce una soluzione alla barriera cognitiva di un pubblico di fruitori ipovedenti.

La chiesa oggetto di questa parte di ricerca è un capolavoro dell'architettura romanica marchigiana ed è l'unica sopravvivenza di un complesso monastico realizzato a metà dell'XI secolo.

L'impianto originale di Santa Maria di Portonovo combina una croce greca ed una latina e si sviluppa secondo tre navate che terminano con absidi semicircolari. La navata centrale e le due laterali sono composte da sette campate sormontate, rispettivamente, da volte a botte e a crociera. La centralità della pianta è sottolineata dalla presenza di una cupola ellittica di ispirazione bizantina che all'esterno si trasforma in elemento ottagonale.

### **La ricostruzione digitale**

Il processo ricostruttivo permette l'acquisizione di una comprensione profonda di aspetti geometrici, logiche progettuali, problematiche strutturali e tecnologiche che mirano a integrare il patrimonio di conoscenze derivanti dalle fonti. La ricostruzione digitale di architetture storiche si basa, oltre che sui dati ottenuti in campagna di

---

<sup>10</sup> "ARTEINSIEME. La Chiesa di Santa Maria di Portonovo, un'esperienza multisensoriale". Promosso da: Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio delle Marche, Servizi Educativi. Modello 3D realizzato dal gruppo di ricerca Distori Heritage, responsabile scientifico prof. Paolo Clini. Prototipo 3D: responsabile dott.ssa Ramona Quattrini, realizzazione dott.ssa Raissa Mammoli. Modello mediante tecniche di fabbricazione additiva: responsabile prof. Mohamad El Mehtedi, realizzazione dott. Tommaso Mancia. Supervisione alla realizzazione del modello tattile: dott. Aldo Grassini, Presidente Museo Omero.

rilievo, su testimonianze iconografiche e materiali che senza dubbio agevolano l'elaborazione del modello tridimensionale (Figura 7).

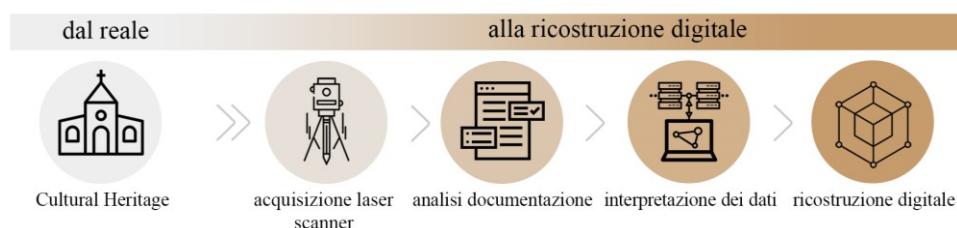


Figura 7. Processo metodologico dal reale alla ricostruzione digitale.

In questo caso studio il metodo di ricostruzione virtuale prima e fisica poi, si è composto di due fasi chiave per l'interpretazione e la fruizione del bene architettonico: la modellazione per la ricostruzione digitale, preceduta dal rilievo laser scanner e dalla caratterizzazione semantica e la stampa additiva 3D, con l'ottimizzazione del modello. La fase di raccolta e acquisizione dei dati disponibili ha preceduto necessariamente la fase di creazione del modello della Chiesa di Santa Maria di Portonovo e si è basata su un rilievo geometrico realizzato con TLS (Quagliarini, Clini and Ripanti, 2017) (Quattrini *et al.*, 2015).

Il modello numerico ottenuto dalle registrazioni delle scansioni laser scanner effettuate (Figura 8), l'analisi della documentazione raccolta e la trascrizione delle informazioni che si possono dedurre da essa (informazioni morfologiche, misure, struttura semantica), hanno permesso di procedere con un altro *step* chiave nei processi ricostruttivi: l'interpretazione dei dati.



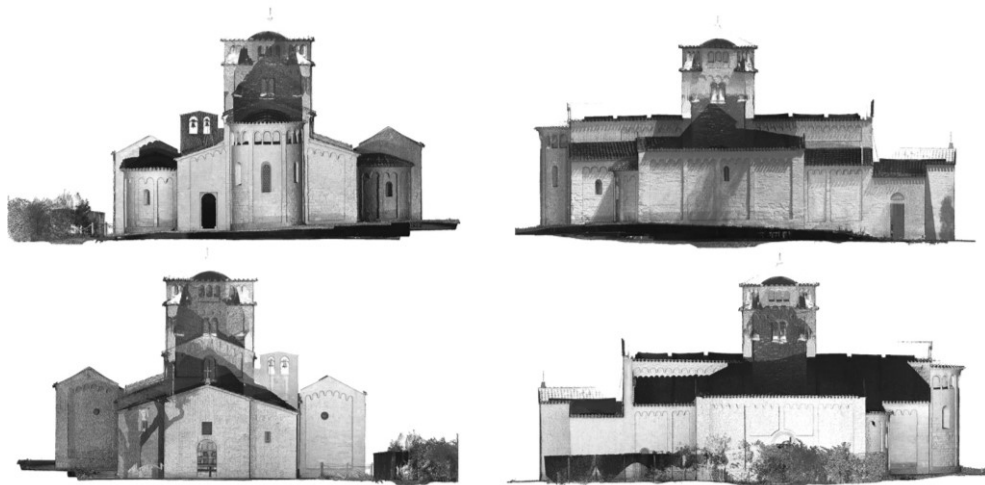


Figura 8. Cyclone, vista della nuvola di punti della Chiesa di Santa Maria di Portonovo: prospetti.

La fase di interpretazione è consistita nel trasformare i dati raccolti e acquisiti in una evidenza scientifica condivisibile: ha riguardato, infatti, i processi cognitivi soggettivi relativi al concetto di ricostruzione virtuale gestita attraverso l'uso di strumenti di visualizzazione e nuovi approcci.

La discretizzazione e rappresentazione del Patrimonio, ossia il processo *from point to cloud* è stato proceduto da un'attenta analisi e impostazione del progetto nell'ottica della realizzazione di un modello HBIM (Figura 9) del quale si sono sviluppate ontologie e librerie condivise (Quattrini, Pierdicca and Morbidoni, 2017).

A livello metodologico si sono dovute affrontare le questioni tipicamente legate alla modellazione parametrica e informata: la mancanza di standardizzazione degli elementi architettonici costituenti l'edificio, la necessità di classificare i componenti, strutturando ontologicamente il bene secondo gerarchie utili per la realizzazione di librerie dedicate parametrizzate e riutilizzabili e non per ultimo la modellazione con l'ausilio della conoscenza delle tecniche costruttive storiche. È evidente pertanto come la procedura di ricostruzione virtuale del CH non sia stata semplice: morfologie eterogenee, complesse e irregolari caratterizzavano l'architettura romanica della Chiesa oggetto di approfondimento.



Figura 9. Revit, vista renderizzata del modello completo.

La modellazione è stata realizzata principalmente in ambiente di lavoro Revit e, in un secondo momento, integrata con il *software* Rhinoceros che ha consentito di definire accuratamente, seguendo la logica della modellazione matematica NURBS, le geometrie più complesse dell'architettura romanica (Figura 10).

La modellazione dello spazio costruito non è stata concepita per avere un output finale che fosse solo coerente con la *point cloud* elaborata dal rilievo, ma che fosse soprattutto ottimale per la stampa additiva.

In fase di modellazione le difficoltà maggiori si sono presentate per gli elementi architettonici a linee generatrici curve quali le absidi e gli archi e con la fase di controllo delle intersezioni tra le varie superfici delle pareti dell'edificio e della complanarità delle stesse.

La mancanza di una complanarità delle murature perimetrali esterne della chiesa, che consentisse semplici estrusioni di profili secondo percorsi definiti da curve direttrici, ha

comportato la creazione delle superfici a partire da più curve di bordo (due, tre o quattro a seconda dei casi). Un'altra difficoltà è stata quella della modellazione delle absidi e degli archi per i quali non sono state create superfici a partire da semplici operazioni di rivoluzione. Le superfici degli elementi curvi, infatti, sono state create facendole passare per una serie di curve di profilo e due curve di bordo, oppure per una serie di curve di profilo che ne definissero la forma.

Per quanto riguarda gli archetti pensili e le lesene delle murature perimetrali, le procedure di creazione delle superfici sono state le medesime descritte precedentemente.

Il modello tridimensionale *as built* ottenuto per la stampa risponde alle buone prassi necessarie ai fini di una migliore fruizione da parte del pubblico, con particolare attenzione a quello ipovedente. A tale proposito le conoscenze e l'esperienza dei professionisti e protagonisti del mondo della fruizione con disabilità visiva sono state imprescindibili per ottenere la giusta integrazione dei *know-how* necessari.

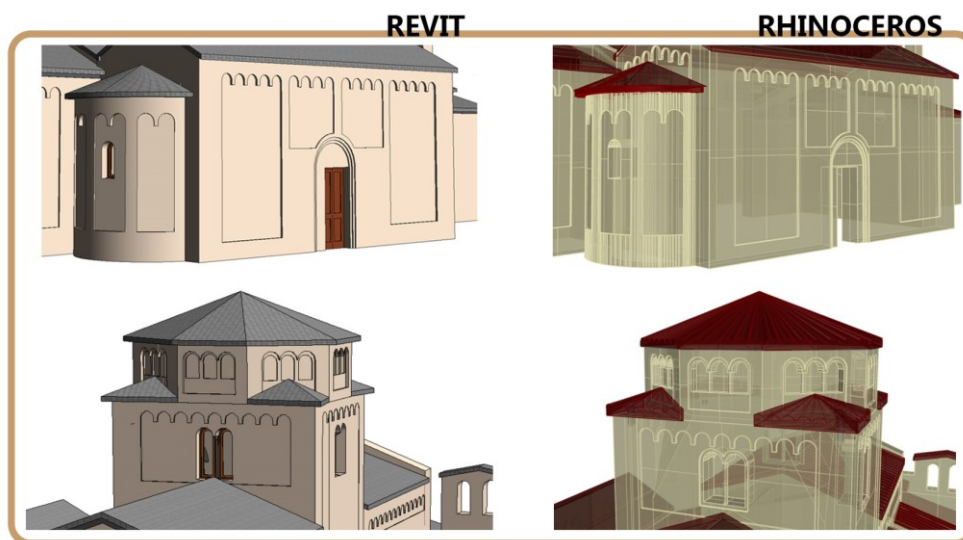


Figura 10. Confronto del modello in ambiente di lavoro Revit (sinistra) e Rhinoceros (destra). Il modello *as built* è stato importato in Rhinoceros per la sua ottimizzazione in funzione della fase di stampa.

Nella fase di ricostruzione questo passaggio si è rivelato fondamentale ai fini di una modellazione consapevole: il rispetto delle soglie tattili e il non affollamento di informazioni percettive in uno spazio ristretto sono stati elementi indispensabili a garantire la corretta percezione del modello. Non sono state semplicemente create delle superfici, ma sono stati generati spessori, aggetti, sporti o curvature, che fossero esplorabili tattilmente e consentissero una vera e propria conoscenza del manufatto.

L'architettura del caso studio non presentava particolari dettagli o apparati decorativi, questo ha comportato un notevole vantaggio modellazione in quanto non è stato necessario ricorrere ad una semplificazione geometrica delle superfici per migliorarne la comprensione sia a livello tattile sia a livello visivo.

Operativamente gli spigoli sono stati smussati per evitare i contorni taglienti, lo spessore delle coperture, delle aperture (monofore, bifore e portali di ingresso) e del modesto apparato decorativo delle pareti non è mai sceso al di sotto dei 0,5 mm. Alcune riflessioni sono state condotte sui materiali: trattandosi di un modello destinato ad un pubblico di ipovedenti ci si è interrogati, infatti, su quali espedienti impiegare per rendere anche matericamente l'oggetto architettonico.

La pietra del Conero che costituisce le murature perimetrali della chiesa è stata resa nel modello con superfici lisce, mentre per le coperture realizzate in coppi di laterizio, si è provveduto a realizzare superfici con profili ondulati che in qualche modo potessero suggerire al fruitore un'idea di discontinuità materica.

Le bucatore, sia le finestre sia le porte sono state modellate come fori passanti e, nella fase finale di ricomposizione del modello, sono state tamponate con materiali diversi per agevolare la lettura del manufatto. Oltre a questi accorgimenti in fase di modellazione si è dovuto tenere conto della necessità di realizzazione in scala 1:50. Tuttavia, le dimensioni del manufatto, anche se ridotte in scala, non erano sufficientemente piccole per poter permettere una stampa complessiva unitaria dell'intera chiesa.

Per questo motivo il modello è stato riprogettato e ripensato e i singoli elementi architettonici sono stati raggruppati in dodici macro-blocchi comprendenti tutte le murature e le relative coperture per poter poi essere assemblato successivamente.

Per facilitare l'assemblaggio finale sono stati previsti fori e perni di centraggio posti in corrispondenza delle parti da assemblare così da far risultare più agevole sia il corretto posizionamento delle parti, l'una rispetto all'altra, sia il riconoscimento delle giuste parti da far combaciare.

### **La stampa additiva**

Le tecniche di riproduzione contemplate dall'AM sono molteplici e possono essere suddivise in tre macro aree principali, basate sulle caratteristiche di consistenza della materia prima: polvere, liquido o solido. Alla prima categoria appartengono quelle basate sulla sinterizzazione o fusione di polveri o sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo.

Sul fronte delle tecnologie a materiale liquido vi sono da una parte quelle che si basano sulla fotopolimerizzazione tramite lampade UV e dall'altra quelle che stampano a getto. Infine, per le tecnologie che utilizzano materiali allo stato solido si individuano quella basata sull'incollaggio stratificato di fogli o quella basata sull'estrusione di un materiale solido o semi solido. L'impiego di una specifica tecnologia è una scelta da effettuare in base a una serie di parametri molto differenti: tipo di materiale, resistenza meccanica e finitura superficiale desiderate del pezzo, velocità di produzione, investimento necessario e costo finale. Una delle tecniche più diffuse tra le stampanti in commercio, sia per la sua semplicità di funzionamento, che per la sua economicità è quella del *Filament Deposition Modeling* (FDM).

Il principio di funzionamento sfruttato da questa tecnologia è l'estrusione. Partendo da una bobina di filo di materiale termoplastico, attraverso l'ugello di un estrusore riscaldato, viene depositato un filamento, in uno stato semisolido, a formare una sezione della parte che si sta creando.

La deposizione e l'indurimento progressivo degli strati consente la fabbricazione dell'oggetto dal basso verso l'alto.

Nel caso della Chiesa di Santa Maria di Portonovo la tecnica FDM è stata preferita alle altre perché permette ottenere pezzi realizzati in breve tempo e con consumo di materiale relativamente basso, a fronte di qualità superficiali non eccellenti, ma che comunque possono essere definite più che buone.

La scelta si è basata soprattutto sul fatto che questa tecnologia permette di generare strutture reticolari che possono essere utilizzate come strutture di riempimento per i blocchi relativi alle murature senza dover ricorrere al riempimento totale.

Nello specifico, per ogni singolo strato, una volta depositato il materiale per formare le pareti esterne (in questo caso di spessore pari a 0.8 mm), il filamento viene rilasciato a formare tante fasce parallele, distanziate tra loro in base alla percentuale di riempimento del pezzo. Nello strato superiore, invece, quest'ultime sono disposte trasversalmente rispetto alle precedenti, al fine di generare comunque una struttura interna in grado di dare solidità all'intero pezzo, ma al tempo stesso di renderlo leggero, evitando un grosso spreco di materiale e riducendo di molto i tempi di stampa.

Lo strumento utilizzato per la realizzazione della chiesa è la stampante commerciale Fortus 250MC della Stratasys.

Il materiale di stampa adottato per la realizzazione dei modelli è l'ABSplus P430, che garantisce ottime prestazioni meccaniche in termini di resistenza a trazione e resistenza agli urti. Per la deposizione del materiale modello è stato utilizzato anche un materiale di supporto la cui peculiarità è quella di essere solubile e che, quindi, non prevede l'intervento manuale per la sua rimozione. Infatti, al termine di ogni fase di stampa, i blocchi realizzati sono stati immersi in un bagno a base di acqua dove sono disciolti sali particolari in grado di sciogliere il materiale di supporto senza danneggiare il modello.

Il processo di stampa ha previsto una prima fase in cui i file tridimensionali dei blocchi, generati con il *software* Rhinoceros 6 ed esportati nel formato STL, sono stati elaborati dal *software* di *slicing* Insight, fornito dalla Stratasys per questa specifica

macchina, che è in grado di suddividere il pezzo 3D in strati generando anche il percorso che dovrà seguire la testa che depositerà il materiale scelto per la stampa. Grazie allo stesso *software* è stato possibile anche gestire la programmazione della stampa orientando i blocchi su un piano che rappresenta il piatto su cui poi verranno stampate le parti.

Da questo *software* è stato possibile anche valutare i tempi e il consumo dei materiali, in modo da prevedere l'eventuale sostituzione delle cartucce al loro esaurimento e la rimozione delle parti una volta finite facendo partire la stampa successiva.

La realizzazione complessiva di murature e coperture ha richiesto il consumo di quasi 2500 cm<sup>3</sup> di materiale per il modello e di più di 1100 cm<sup>3</sup> di quello per il supporto per una durata totale del solo processo di stampa di circa 270 ore.

In Figura 11 il processo completo: dalla *point cloud* al modello stampato.

**dalla point cloud al  
modello stampato**



Figura 11. *Processo dalla point cloud al modello stampato. A sinistra la Chiesa di Portonovo in ambiente Cyclone, al centro il modello in Revit e a destra il fac-simile stampato.*



## **Risultati**

Creare un modello pienamente idoneo all'esplorazione tattile non è un processo automatico. Come affermato all'inizio della sezione dedicata a questo caso studio, le tecnologie offrono numerose risorse, ma queste necessitano del supporto di esperti che hanno il compito di valutare il risultato dell'interpretazione automatica della strumentazione rispetto all'armonia delle forme e dei volumi che si intende realizzare.

Nelle operazioni di ricostruzione digitale, oltre alle capacità di comprensione del manufatto da parte del rilevatore, si sono tenute presenti alcune informazioni relative al profilo degli utenti ai quali è destinato il modello stampato. Indispensabile a tal proposito è stato l'apporto del tiflogo che ha fornito la propria esperienza per valutare la scala più opportuna al fine di individuare la miglior dimensione per l'esplorazione senza sacrificare troppo la presentazione dei dettagli.

Le strategie di lettura adottate, così come la possibilità di accedere alla memoria tattile, sono elementi necessari per comprendere le convenzioni grafiche alle quali far riferimento in funzione di un'accessibilità il più possibile completa del Patrimonio.

Il ruolo della memoria tattile per i non vedenti è un aspetto di primaria importanza e, nel considerare l'aspetto dell'accessibilità, è bene tenere in considerazione che l'esplorazione avviene in modo sequenziale mentre, al contrario, il fenomeno della percezione visiva è simultaneo e richiede quindi meno tempo per assimilare le informazioni.

Il caso studio della Chiesa di Santa Maria di Portonovo ha mostrato come i processi e le tecnologie impiegate producano benefici e abbiano un grande impatto sociale.

La collaborazione tra le parti coinvolte è risultata fondamentale per ottenere un modello tattile perfettamente ottimizzato e esplorabile in ogni sua parte.

Il flusso di lavoro seguito è risultato agile nella prima fase di modellazione basata sul rilievo laser scanner, mentre più oneroso in termini di tempo nella fase del perfezionamento.

Le geometrie degli elementi architettonici a linee generatrici curve hanno necessitato di una modellazione *ad hoc* e la fase di preparazione del modello con il *software* di *slicing* è risultata piuttosto complessa.

Relativamente a questa fase una parte importante del lavoro è stato, infatti, come spiegato nella sezione precedente, lo studio delle intersezioni dei piani e delle superfici geometriche.

I risultati ottenuti in fase di stampa sono stati molto buoni sia in termini di percezione tattile sia visiva. Il modello è percettibile nella sua complessità.

La stampa additiva con la sua grande flessibilità e duttilità, si presta perfettamente agli obiettivi di progetti di valorizzazione e accessibilità e con essa la riproduzione di un artefatto diventa una realtà tangibile, uno strumento importante per la conservazione e la riproduzione dei manufatti del patrimonio culturale.

## 2.2.2 Un modello per l'implementazione della conoscenza storica e la documentazione: la Mole Vanvitelliana di Ancona

### Research questions

La Convenzione di Faro<sup>11</sup> è un testo fondamentale per il concetto di *Cultural Heritage* poiché con essa è stata introdotta la nozione di eredità - patrimonio culturale intesa come un insieme di risorse ereditate dal passato che le popolazioni identificano, indipendentemente da chi ne detenga la proprietà, come riflesso ed espressione dei loro valori, credenze, conoscenze e tradizioni, in continua evoluzione.

Azioni di implementazione della conoscenza e della documentazione del CH si legano ai principi di questa Convenzione che vede mettere in luce il valore dell'eredità culturale attraverso la sua identificazione, studio, interpretazione, protezione, conservazione e presentazione. Analizzare, comprendere, rappresentare e comunicare una testimonianza architettonica sono punti cardine dei processi di documentazione del Patrimonio inteso come lascito culturale.

A questa questione si lega anche il concetto di riuso dei dati e dei modelli: una volta acquisite le informazioni e predisposto il modello secondo un'organizzazione gerarchica è bene interrogarsi sul ri-utilizzo dello stesso. Sovente i modelli tridimensionali non vengono sfruttati in domini esterni rispetto a quelli in cui vengono concepiti e spesso non si assiste ad una loro chiara e facile comprensione o a un loro uso da utenti non esperti. Da qui l'esigenza di realizzare non solo un modello tridimensionale informato in grado di raccontare e documentare storicamente la propria evoluzione e trasformazione, ma anche la necessità di ottenere un *output* spendibile da

---

<sup>11</sup> La Convenzione di Faro (2005) è una convenzione quadro del Consiglio d'Europa sul valore dell'eredità culturale per la società. Tale Convenzione è un accordo secondo il quale i Paesi partecipanti si impegnano nel riconoscere che "il diritto all'eredità culturale è inerente al diritto a partecipare alla vita culturale, così come definito nella Dichiarazione universale dei diritti dell'uomo", come si legge nell'Articolo 1 della Parte I della Convenzione, e che la "conservazione dell'eredità culturale, ed il suo uso sostenibile, hanno come obiettivo lo sviluppo umano e la qualità della vita", come specificato nell'Articolo 2.

esperti archivisti che con la loro conoscenza contribuiscono alla strutturazione dell'apparato informativo.

Il Lazzaretto pentagonale di Luigi Vanvitelli ad Ancona (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) è un singolare e affascinante complesso monumentale commissionato da Clemente XII durante il suo pontificato che, nell'immaginario della comunità, è stato a lungo metafora di potenzialità inespressa e che per questo meritava di essere approfondito essendo ad oggi uno dei poli più attrattivi del panorama culturale cittadino.

I lazzaretti possono essere considerati un microcosmo in cui perseguire la storia della medicina, la storia culturale, la storia sociale e la storia della cultura materiale. Poiché i lazzaretti venivano utilizzati come stazioni di quarantena permanenti per le persone e le merci in movimento, si stabilirono soprattutto in importanti centri commerciali e città portuali lungo le rotte marittime del Mediterraneo (penisola italiana e balcanica, Mar Ionio e costa meridionale della Francia). Queste architetture costituivano un sistema di punti nodali che collaboravano alla prevenzione della peste e condividevano informazioni sulle epidemie, sulle norme di quarantena e sui modelli architettonici.



Figura 12. *Vista della Mole Vanvitelliana dal Belvedere di Piazza San Gallo. Foto personale, marzo 2019.*

Ancona per la sua posizione geografica si affaccia sull'ansa naturale del porto che si configura come scena sulla quale il Vanvitelli può intervenire con la sua costruzione, prescindendo da ogni adeguamento stilistico e locandosi come emergenza assoluta.

Di seguito si riporta un estratto dell'introduzione con la quale venne descritta dalle fonti dell'epoca la cerimonia della posa della prima pietra nel 1733<sup>12</sup>: “La somma instancabile munificenza della Santità di N.S. Papa Clemente XII, avendo dichiarato Porto franco questo porto di Ancona, e volendo inoltre accrescere il vantaggio con la nuova erezione di un Lazzaretto sporco per il comodo del Commercio, e delle mercanzie, che vengono giornalmente trasportate dalle molte navi che da varie parti giungono in questo porto; si compiacque però la Santità di N.S. di dare al virtuoso Architetto Sig. Luigi Vanvitelli la commissione d'ideare la Pianta di d. Lazzaretto; come infatti eseguì fino a giugno passato”.

Il Lazzaretto fu costruito sia come edificio di quarantena che come fortezza militare e il progetto originario prevedeva che fosse collegato al rivellino, una sorta di fortificazione indipendente posta a protezione di una porta di accesso ad una cittadella più grande.

La storia di questa iconica architettura anconetana è estremamente ricca, di sicuro interesse sono i cambi di destinazione d'uso dell'edificio che, per le sue caratteristiche peculiari, nel 1860 divenne un forte militare, nel 1884 una raffineria di zucchero e nel 1947 manifattura tabacchi.

Le continue trasformazioni funzionali hanno inevitabilmente mutato l'originario assetto del Lazzaretto che, ancora oggi, testimonia con tracce visibili lo scorrere del tempo e il susseguirsi degli eventi storici che lo hanno coinvolto direttamente (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Le trasformazioni che questa architettura ha subito nel corso degli anni, infatti, hanno compromesso l'apprezzamento del valore

---

<sup>12</sup> La notificazione della cerimonia della posa della prima pietra riporta la data del 1733, anche se dalle fonti iconografiche reperite all'Archivio Comunale di Ancona il progetto originario del Vanvitelli è datato 1732. L'estratto della notificazione è tratto da Bucciarelli, G., Mezzetti, C., Pugnali, F. (1979). *Il Lazzaretto di Ancona, un'opera dimenticata*. Ancona: Cassa di Risparmio di Ancona/Industrie Grafiche F.lli Anibaldi.

spaziale proposto dal Vanvitelli. Nonostante le continue alterazioni l'insularità del complesso vanvitelliano è di fatto conservata, le sistemazioni e i rinterrì circostanti, dovuti a un irreversibile processo industriale della zona, ne hanno pregiudicato però l'effetto e il significato.

Le facciate esterne prospicienti il Rivellino sono state meno coinvolte nei processi di trasformazione dell'edificio, infatti, è ancora chiaramente leggibile l'articolazione in due ordini del corpo di fabbrica e la triplice scansione delle murature in laterizio mediante paraste che incorniciano le aperture centrali e di estremità (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Il Tempietto di San Rocco, a seguito dell'abbassamento del livello del cortile che ha comportato la modifica dei rapporti tra la cappella a pianta centrale e le facciate interne, risulta visivamente alterato nelle proporzioni.

Nel cortile interno, al centro del quale si colloca il tempietto, il rapporto tra l'architettura e gli alloggi è riconducibile allo schema teatrale della scena e della platea, quasi a voler rimandare al rapporto urbanistico in essere tra la città e il porto.



Figura 13. Ortofoto del prospetto sud - est, lato interno del Lazzaretto. Sulla facciata sono identificabili chiaramente le tracce di una delle fasi storiche del Lazzaretto: la manifattura tabacchi. I segni presenti sulle murature indicano lo spazio che, dal 1947 al 1997, è stato occupato dai magazzini.



Figura 14. Ortofoto del prospetto sud - ovest, lato esterno del Lazzaretto. La facciata, restaurata a partire dal 1997, mostra gli ordini del corpo di fabbrica e la scansione delle murature mediante paraste che incorniciano le aperture centrali e di estremità.

### **La modellazione parametrica**

La Mole Vanvitelliana nel corso dei secoli ha subito molti cambi di destinazione d'uso ed è stata oggetto di numerosi interventi di restauro e manutenzione ordinaria e straordinaria che ne hanno modificato l'assetto e inevitabilmente segnato la storia.

L'obiettivo principale di questa applicazione metodologica è quello di realizzare un modello HBIM per l'implementazione della conoscenza storica del manufatto architettonico, un modello consapevole della propria evoluzione storica, coerente sia dal punto di vista strutturale sia funzionale con le indagini archivistiche. Da questo intento sono derivati i passi operativi relativi alla modellazione e successiva implementazione dei dati e di gestione dei documenti.

La modellazione ha riguardato principalmente due fasi storiche della Mole: quella originaria del diciottesimo secolo e quella attuale (riferita allo stato di fatto dell'architettura al momento dell'acquisizione dei dati, 2016-2017).

Per quanto riguarda lo stato attuale, il modello HBIM del Lazzaretto è stato ottenuto seguendo il consolidato *workflow* che dal rilievo conduce al modello informato organizzato secondo gerarchie e ontologie predefinite. La campagna di rilievo<sup>13</sup> è stata

---

<sup>13</sup> Il rilievo è stato condotto nell'ambito del Laboratorio del corso di Rilievo dell'Architettura, anni accademici 2016/2017 e 2017/2018. Sono stati rilevati integralmente il cortile ed il rivellino esterno che circonda la Mole. Una parte degli spazi interni sono stati acquisiti in occasione della mostra temporanea "Ecce Homo. Da Marino Marini a Mimmo Paladino: la scultura di figura in Italia".

condotta posizionando 24 stazioni di presa esterne e 20 interne che hanno acquisito complessivamente 207 milioni di punti (Figura 16 e Figura 17).

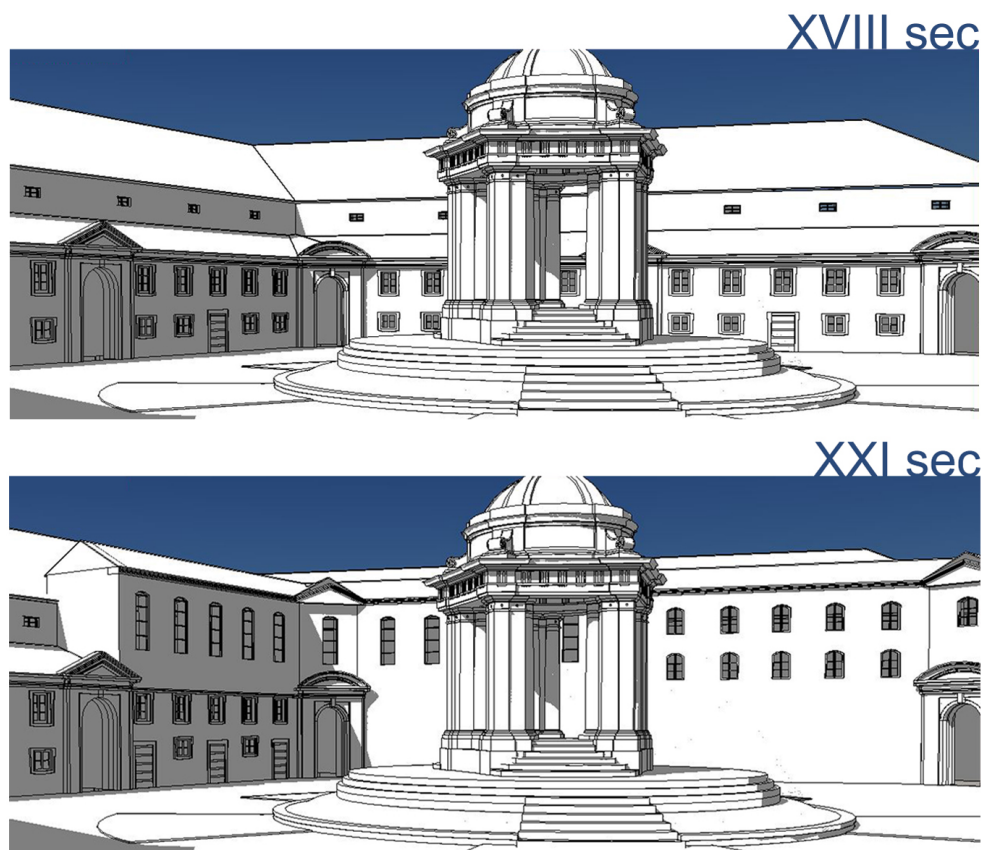


Figura 15. Revit, vista del cortile interno del Lazzaretto e tempietto di San Rocco secondo le due fasi di modellazione: XVII secolo e XXI secolo.

In fase di acquisizione sono stati collocati dieci target del tipo *tilt and turn* funzionali alle successive operazioni di registrazione dei dati rilevati. Per ogni singola stazione sono state impostati i valori relativi a: ampiezza dell'angolo di presa, risoluzione e tempo di scatto, della fotocamera interna al laser scanner, al fine di ottenere una buona esposizione delle foto. Per quanto riguarda l'ampiezza dell'angolo di presa questa è



stata sempre impostata come *target all 360°*, la risoluzione è stata impostata come risoluzione media, ovvero 1 cm a 10 m. L'impostazione che variava di volta in volta era quella relativa all'esposizione che a seconda delle condizioni di illuminazione naturale veniva settata ad hoc.

La registrazione della nuvola di punti è avvenuta sia tramite metodo *target* sia tramite metodo *cloud to cloud*. L'errore massimo registrato è stato di 5 mm ed il medio di 2 mm.

La modellazione in ambiente di lavoro Revit ha seguito il tradizionale processo *Scan-to-Bim* (Figura 18) ed è illustrata più dettagliatamente nel corso del presente paragrafo. Per comprendere al meglio la composizione e la distribuzione funzionale degli spazi della Mole (Figura 19), si è fatto riferimento al testo (Bucciarelli, Mezzetti and Pugnali, 1979) e alle informazioni riportate nelle trascrizioni archivistiche (cfr. appendice A.1.).



Figura 16. *Cyclone*, vista della nuvola di punti del cortile interno della Mole e Tempio di San Rocco.



Figura 17. Cyclone, vista della nuvola di punti degli spazi interni della Mole.

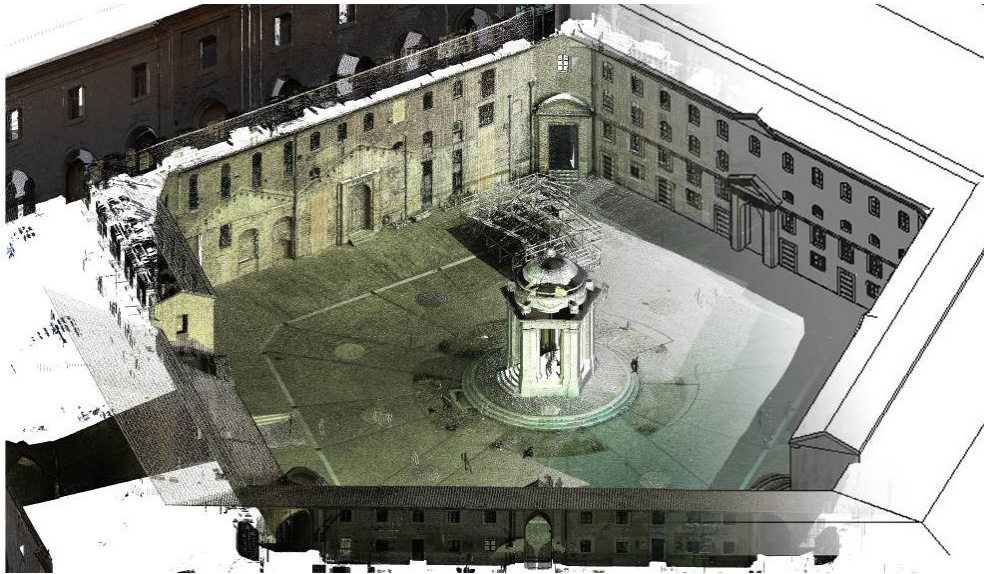


Figura 18. Dalla nuvola di punti al modello HBIM.

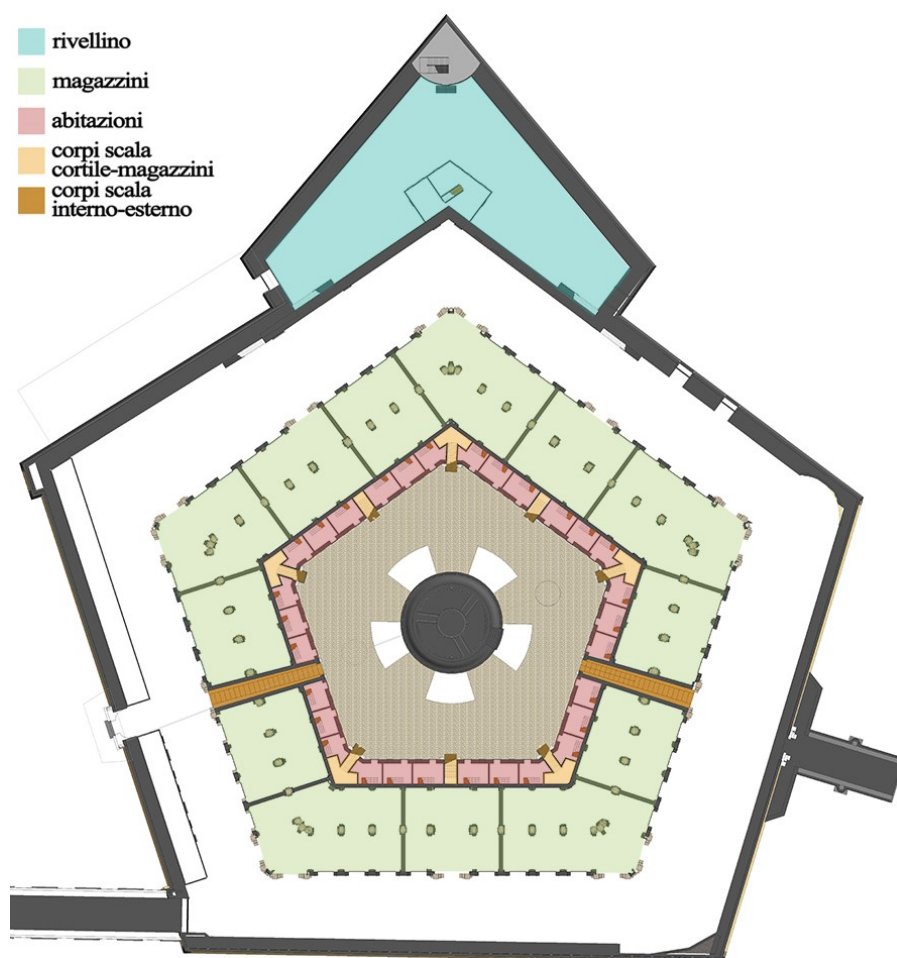


Figura 19. *Pianta del Lazzaretto: distribuzione funzionale.*

A tal proposito si ritiene utile richiamare alcune parti estratte<sup>14</sup> da entrambe le fonti: “Nella parte che dà sul cortile interno erano presenti trenta abitazioni, sei su ogni lato, ciascuna composta da due piani collegati da una ripida scala lignea, la cui funzione era quella di accogliere i viaggiatori in ingresso al porto cittadino. Sul lato esterno dell’edificio, invece, erano collocati tredici magazzini, anch’essi di due piani. Il primo livello presentava una copertura composta da novantasei volte a crociera, mentre il

<sup>14</sup> Le frasi riportate sono state parafrasate e sintetizzate dall’autore.

secondo piano era coperto da un sistema di travi a cui erano appoggiate sessantotto capriate zoppe (due per ogni pilastro). I due livelli dei magazzini non erano tra di essi collegati e pertanto l'accesso al secondo livello era possibile solo per mezzo degli scaloni che partivano dal cortile interno. Ad oggi sia gli spazi in passato destinati alle residenze sia ai depositi, ospitano le sale del Museo Statale tattile Omero e sono sede di associazioni comunali.

I corpi scala erano e sono attualmente collocati in ogni angolo del pentagono e su tre dei cinque lati. Nei restanti due bracci i collegamenti verticali sono sostituiti da due gallerie con copertura voltata a botte, che collegano il camminamento esterno con il cortile. Il rivellino è costituito da scale che raggiungono il camminamento in cima alla cinta muraria e da una caserma, oggi dismessa, composta da due piani”.

La modellazione parametrica ha riguardato la totalità dell'edificio e gli elementi architettonici principali sia esterni sia interni quali: cornici delle porte e delle finestre delle abitazioni affacciate sul Cortile, soluzioni angolari, trabeazioni, archi, portali di accesso, sistemi voltati e corpi scala.

Per la modellazione della semantica del manufatto allo stato del rilievo, i dati acquisiti sono stati integrati con lo studio dei Trattati dell'architettura classica che hanno contribuito alla creazione di librerie parametriche.

Su questi elementi architettonici significativi, nonostante, ad eccezione del Tempietto centrale, l'apparato decorativo complessivo non sia molto articolato, sono stati identificati tre livelli di dettaglio LOD. In Figura 20 è possibile vedere la suddivisione semantica degli elementi principali.

Per quanto riguarda gli ambienti esterni il complesso vanvitelliano è caratterizzato da due tipologie di arco (Figura 21): esterno lato camminamento, ripetuto continuamente su tutte le facciate, e esterno lato cortile, collocato sia in corrispondenza degli spigoli del pentagono e dei corpi scala che collegano il livello di calpestio ai Magazzini sia in mezzera delle facciate.

I frontoni e le trabeazioni (Figura 22) del Vanvitelli, seppur evidentemente neoclassiche, non sono afferibili a nessuno dei cinque ordini classici studiati nei

Trattati per integrare i dati provenienti dall'acquisizioni, le loro modanature sono state parametrizzate secondo regole e rapporti matematici indicati da (Barrozio da Vignola, 1562) (Chitham, 1987) e modellate come estrusioni di profili su percorso. Analogamente si è proceduto per le cornici delle aperture prospicienti il cortile.

Per gli elementi architettonici degli spazi interni del primo livello, la restituzione in ambiente HBIM si è basata, oltre che sui dati di rilievo integrato e della trattatistica, sulle informazioni reperibili dalla documentazione della ricerca archivistica. Si è fatto riferimento ai disegni bidimensionali conservati presso i due archivi principali consultati (cfr. paragrafo successivo) e alle tecniche costruttive settecentesche e si è proceduto secondo un livello di dettaglio geometrico minore rispetto a quello adottato per l'architettura modellata *reality-based*.

I sistemi degli orizzontamenti, composti dalle volte a crociera del primo livello dei magazzini, dalle capriate lignee del secondo livello e dai solai interpiano delle abitazioni, nonostante la fabbrica architettonica sia stata più volte oggetto di restauri complessi e importanti, non sono stati alterati o stravolti.

Per la modellazione delle volte a crociera è stata fondamentale l'azione della parametrizzazione: la luce tra i pilastri a croce su cui si impostano è estremamente variabile e lavorare con parametri istanza ha evitato di dover creare ogni singolo elemento.

Particolare attenzione è stata riservata alle volte poste in angolo, il cui piano di imposta è a base trapezoidale.

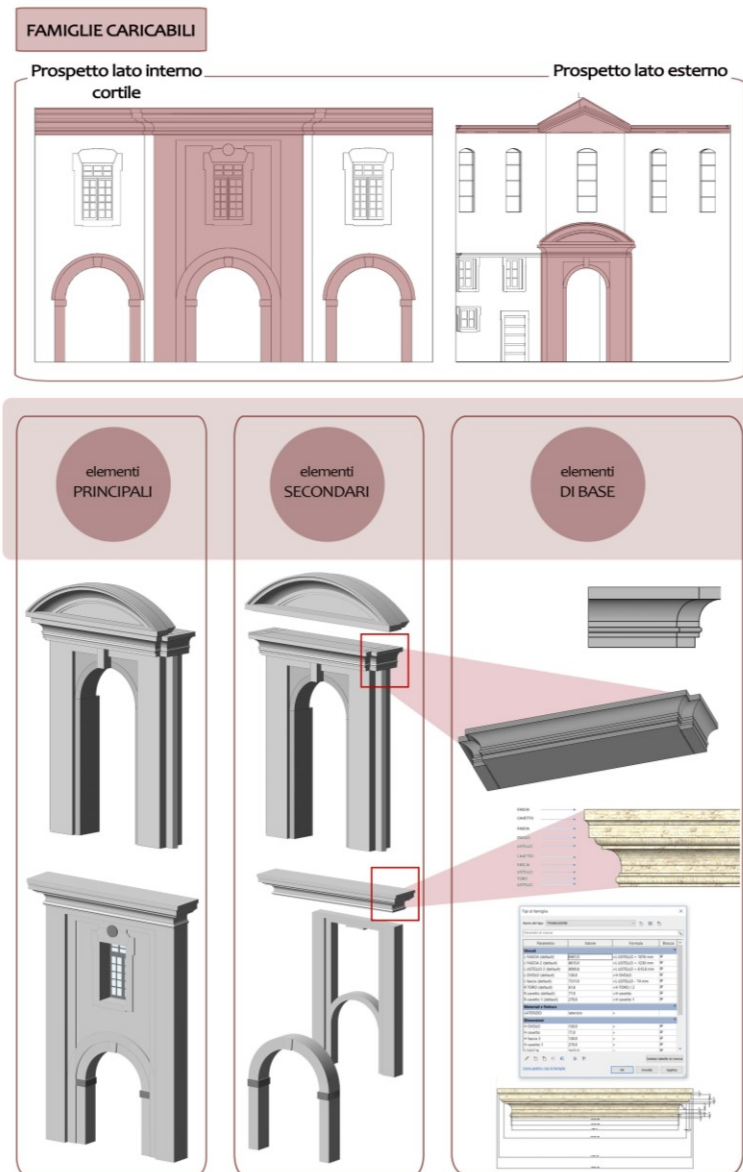


Figura 20. *Suddivisione semantica del sintagma arco-trabeazione che costituisce rispettivamente le facciate esterne e interne rispetto al cortile centrale. Sono stati individuati gli elementi principali poi scomposti in quelli secondari e in quelli di base. Di quest'ultimi, rappresentati nella colonna di destra, viene illustrata la parametrizzazione.*



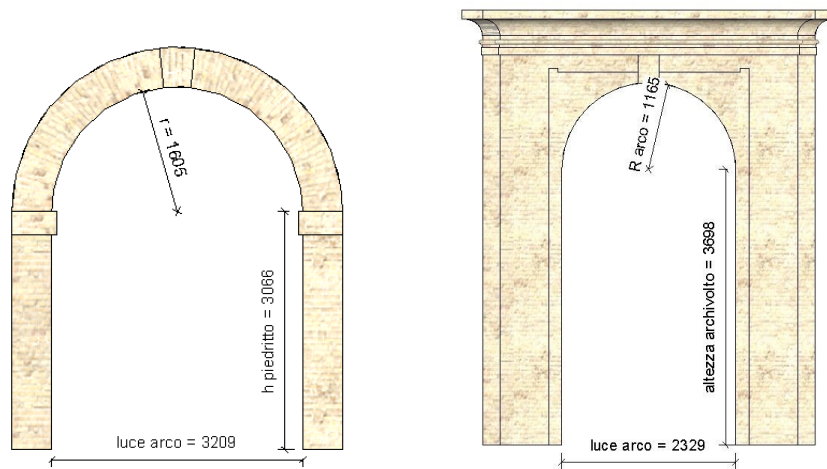
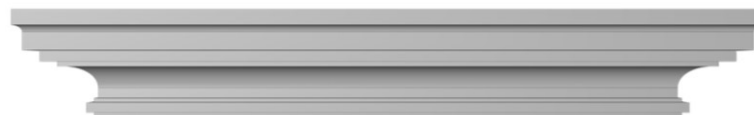


Figura 21. Revit, modellazione parametrica dell'arco esterno lato rivellino (sinistra) e dell'arco esterno lato cortile (destra).



Tipi di famiglia

Nome del tipo:

Parametri di ricerca

Parametro	Valore	Formula	Blocc
<b>Vincoli</b>			
L FASCIA (default)	8461.0	=L LISTELLO + 1076 mm	<input checked="" type="checkbox"/>
L FASCIA 2 (default)	8615.0	=L LISTELLO + 1230 mm	<input checked="" type="checkbox"/>
L LISTELLO 2 (default)	8000.8	=L LISTELLO + 615.8 mm	<input checked="" type="checkbox"/>
L OVOLO (default)	130.0	=H OVOLO	<input checked="" type="checkbox"/>
L fascia (default)	7311.0	=L LISTELLO - 74 mm	<input checked="" type="checkbox"/>
Prospetto di default	0.0	=	<input type="checkbox"/>
R TORO (default)	61.8	=H TORO / 2	<input checked="" type="checkbox"/>
R cavetto (default)	77.0	=H cavetto	<input checked="" type="checkbox"/>
R guscio (default)	270.0	=H guscio	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Materiali e finiture</b>			
LATERIZIO	LATERIZIO	=	<input type="checkbox"/>
<b>Dimensioni</b>			
H OVOLO	130.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
H cavetto	77.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
H fascia 3	130.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>

Gestisci tabelle di ricerca

OK Annulla Applica

Figura 22. Revit, modello e parametri per la famiglia trabeazione.

## **Il data enrichment e la gestione documentale**

Per documentare, conservare e valorizzazione i beni del Patrimonio Architettonico è necessario costruire una conoscenza approfondita e multidisciplinare. Attualmente tuttavia il processo di gestione delle informazioni e delle analisi derivanti dal rilievo e della documentazione conservata presso archivi cartacei e digitali è complesso e non sempre facile. La ricerca storico archivistica è un considerevole supporto alla comprensione dell'edificio nella sua complessità evolutiva e storica, le indagini ricreano i passaggi più importanti per una chiara e ordinata comprensione degli eventi cronologici. Nelle pratiche consuete, le informazioni acquisite sono raccolte sotto forma di documenti cartacei o digitali, spesso onerosi da consultare e gestire, soprattutto se si confrontano dati legati a periodi cronologici diversi.

Nell'ultimo decennio il tema della dematerializzazione dei documenti e degli atti cartacei, della digitalizzazione degli stessi, ai fini di una migliore conservazione e di una più agevole fruizione, ha trovato una collocazione di ampio rilievo.

I processi di gestione cartacea dei documenti sono caratterizzati dalla difficile condivisione e archiviazione, dai tempi di ricerca elevati, etc. pertanto sempre più frequentemente si sta procedendo verso la gestione documentale informatizzata e la sostituzione dei supporti tradizionali in favore del documento informatico e di una sua più agevole accessibilità. Anche la Direzione Generale per gli Archivi, in continuità e coerenza con le politiche culturali nazionali ed europee sulle reti immateriali, si è impegnata nell'ultimo decennio secondo questa direzione.

Il patrimonio documentario, attraverso il Sistema Archivistico Nazionale (SAN), inizia ad essere, infatti, disponibile come risorsa online e gli archivi si configurano sempre più come mezzo di accesso democratico alla conoscenza.

Gestire un insieme di documenti affidabili per la conoscenza profonda di un edificio e delle sue trasformazioni nel corso dei secoli richiede necessariamente l'integrazione di un'indagine storico – archivistica. Il concetto di gestione degli archivi storici è recepito come strategia complessiva finalizzata alla conoscenza, alla valorizzazione e alla manutenzione dei sistemi documentari di natura storica e dei relativi strumenti di



accesso. La gestione è considerata un aspetto fortemente qualificante dell'intero processo di tutela, descrizione e valorizzazione del patrimonio documentario e le attività correlate alla gestione sono finalizzate a garantire la memoria storica assicurata dagli archivi (Valacchi, 2006).

La metodologia individuata per la gestione documentale di questo caso studio passa per la fase dell'arricchimento dati ed è condivisa con specialisti storici.

In accordo con il terzo principio della Carta di Londra, per assicurare l'integrità intellettuale dei metodi e dei risultati della visualizzazione tridimensionale, le fonti impiegate a giustificazione e a supporto della modellazione del Lazzaretto sono state identificate e valutate in maniera strutturata da esperti di dominio<sup>15</sup>. Di concerto con la Carta, le fonti prese in considerazione sono state le informazioni, digitali e non, che hanno influito direttamente sulla creazione del modello nelle sue due fasi costruttive.

La documentazione analizzata per la realizzazione del modello tridimensionale e della sua conseguente implementazione sono derivate da diversi archivi: l'Archivio Nazionale di Stato del Comune di Ancona (ASAn) e l'Archivio del DICEA, Sez. Architettura (Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura dell'Università Politecnica delle Marche) che hanno fornito rispettivamente atti, documenti cartacei e disegni. La biblioteca comunale Luciano Benincasa di Ancona, la biblioteca Federiciana di Fano e il Museo Statale tattile Omero di Ancona hanno fornito per lo più disegni che sono stati usati a integrazione del materiale archivistico cartaceo.

L'HBIM è stato indagato come strumento con il quale gestire documentazione archivistica al fine di implementare la conoscenza storica del bene architettonico.

Per garantire una strutturazione organica e funzionale della documentazione, in modo da assicurare la reperibilità delle informazioni, è fondamentale, infatti, considerare la gestione degli archivi secondo una corretta classificazione che ne consenta un'agevole identificazione.

---

<sup>15</sup> L'indagine archivistica è stata condotta in collaborazione con la Dott.ssa Marina Inì, dottoranda di ricerca in storia presso il Girton College, Università di Cambridge, la cui ricerca si concentra sui lazzaretti nel Mediterraneo.

Come l'architettura storica nel sistema BIM è modellata nel rispetto di vocabolari condivisi e predefiniti, allo stesso modo anche per la documentazione archivistica c'è la necessità di rimandare a degli standard.

Per le trascrizioni dei documenti d'archivio del caso studio della Mole Vanvitelliana, il riferimento usato è quello all' ISAD (G) (*General International Standard Archival Description*)<sup>16</sup>, standard utilizzato per definire delle norme generali per l'elaborazione di descrizioni archivistiche, per identificare il contesto e il contenuto della documentazione anche in ambito informatico.

Il rispetto della denominazione utilizzata nei documenti d'archivio permette di mantenere un'organizzazione razionale del modello digitale coerente con la documentazione d'archivio raccolta.

Sfruttando le potenzialità del *software* utilizzato per la modellazione del Lazzaretto è stato possibile implementare nel modello la mappatura puntuale delle informazioni ricavate dai testi storici e le fonti stesse.

Le indicazioni dell'ISAD sulla classificazione e nomenclatura delle fonti archivistiche sono state riportate all'interno del modello HBIM come parametri di progetto e per ogni elemento architettonico di cui si aveva traccia documentale sono state collegate sia le fonti iconografiche sia le trascrizioni e i loro commenti (cfr. appendici A.1., A.2. e B.1.) (Figura 23).

Questa modalità di organizzazione dei dati, risulta di facile lettura per gli esperti storici che vengono facilitati nella navigazione ed esplorazione dei contenuti all'interno del modello. Nella Tabella 1 è possibile vedere la descrizione dei documenti d'archivio implementati secondo gli standard ISAD.

---

<sup>16</sup> L'International Council on Archives ha definito lo standard ISAD che è stato adottato dal Comitato per gli standard descrittivi a Stoccolma nel settembre 1999.

<b>Documenti d'archivio ASAn</b>	
<i><b>Cisterna e cisterne situate nella Piazza del Lazzaretto</b></i>	
Istituto di Conservazione	Archivio di Stato di Ancona
Fondo	Archivio Comunale di Ancona
Sub-fondo	Antico Regime, II
Serie	Ufficio di Sanità
Fascicolo	2
Titolo o denominazione originale	Libbro Preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica delli Nuovi Lazzaretti e tutto ciò che concernono le materie di Sanità. Notizie utili e diverse come di ogni altra cosa che si riferisce alli detti Nuovi Lazzaretti di Ancona.
Data	Dal 1734
Unità documentaria (carta)	62 r. - 63 r.
<i><b>Magazzini delli Nuovi Lazzaretti</b></i>	
Istituto di Conservazione	Archivio di Stato di Ancona
Fondo	Archivio Comunale di Ancona
Sub-fondo	Antico Regime, II
Serie	Ufficio di Sanità
Fascicolo	2
Titolo o denominazione originale	Libbro Preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica delli Nuovi Lazzaretti e tutto ciò che concernono le materie di Sanità. Notizie utili e diverse come di ogni altra cosa che si riferisce alli detti Nuovi Lazzaretti di Ancona.
Data	Dal 1734.
Unità documentaria (carta)	110 v.
<i><b>Seppulture delli Contumaci</b></i>	
Istituto di Conservazione	Archivio di Stato di Ancona
Fondo	Archivio Comunale di Ancona
Sub-fondo	Antico Regime, II
Serie	Ufficio di Sanità
Fascicolo	2
Titolo o denominazione	Libbro Preordinato contenente tutto quello che riguarda

originale	la sontuosa fabbrica delli Nuovi Lazzaretti e tutto ciò che concernono le materie di Sanità. Notizie utili e diverse come di ogni altra cosa che si riferisce alli detti Nuovi Lazzaretti di Ancona.
Data	Dal 1734.
Unità documentaria (carta)	150 r. - 151 r.
<b><i>Polveriera Situata nel Centro del Baloardo delli Novi Lazzaretti</i></b>	
Istituto di Conservazione	Archivio di Stato di Ancona
Fondo	Archivio Comunale di Ancona
Sub-fondo	Antico Regime, II
Serie	Ufficio di Sanità
Fascicolo	2
Titolo o denominazione originale	Libbro Preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica delli Nuovi Lazzaretti e tutto ciò che concernono le materie di Sanità. Notizie utili e diverse come di ogni altra cosa che si riferisce alli detti Nuovi Lazzaretti di Ancona.
Data	Dal 1734.
Unità documentaria (carta)	196 r. - 197 v.

Tabella 1. *Elementi caratterizzanti il Lazzaretto: descrizione dei documenti d'archivio con indicazione della nomenclatura di catalogazione richiesta dallo standard ISAD.*

Per quanto concerne la documentazione iconografica le informazioni riguardanti le collocazioni originali dei disegni a disposizione sono alquanto lacunose<sup>17</sup>.

I fondi e le collocazioni non sono indicati né nell'archivio DICEA né nella principale pubblicazione di riferimento (Bucciarelli, Mezzetti and Pugnalone, 1979). Nonostante ciò le fonti sono state catalogate secondo le indicazioni ISAD.

Nella tabella che segue vengono mostrati i dati implementati nel modello e l'immagine relativa.

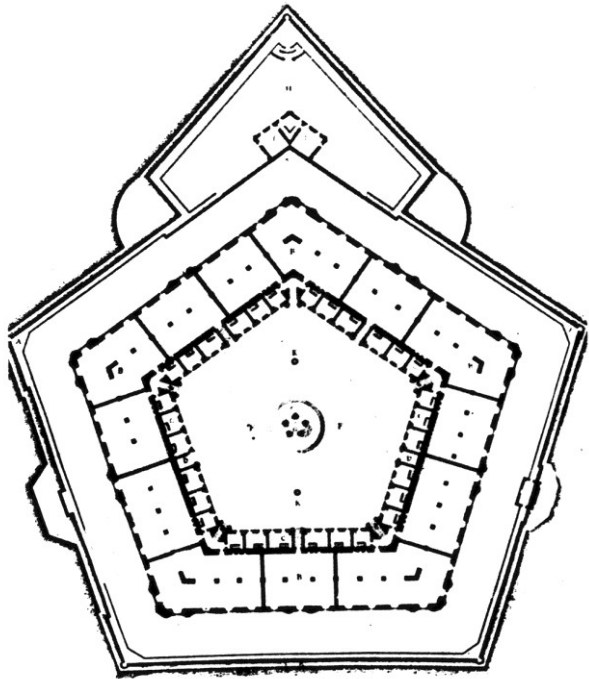
---

<sup>17</sup> In alcuni casi, come per i disegni conservati alla Biblioteca Comunale Benincasa di Ancona, è stato impossibile reperire le informazioni anche a causa della chiusura per restauri del palazzo sede della biblioteca al momento della ricerca d'archivio.

**Documentazione iconografica**

*Pianta del lazzeretto di Ancona*

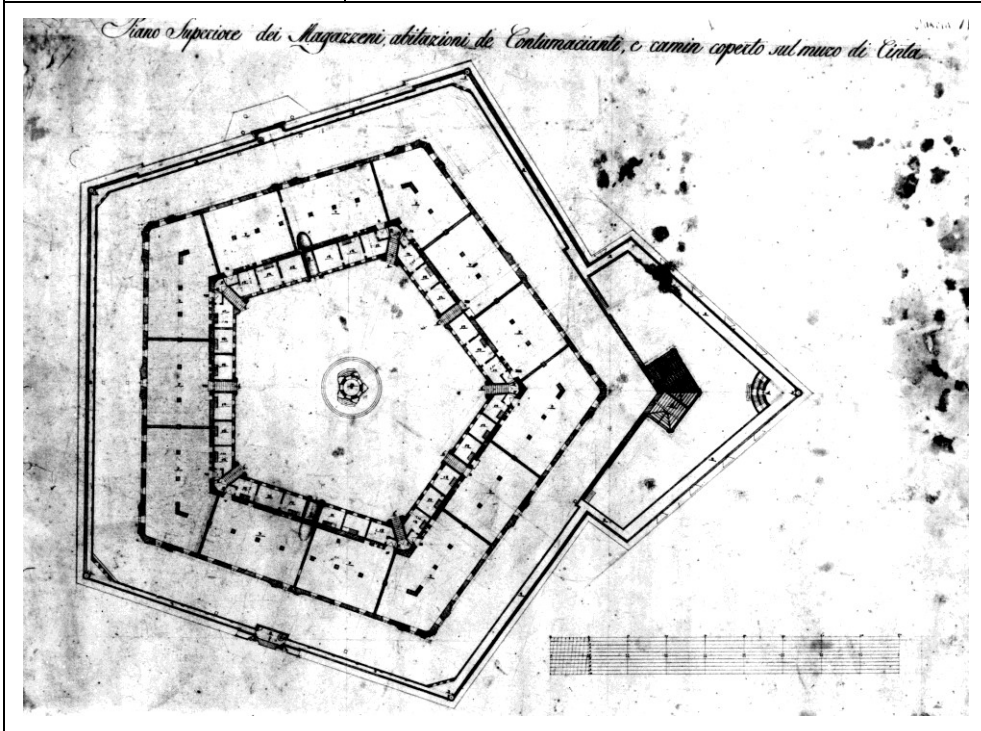
Istituto di Conservazione	Sconosciuto
Titolo o denominazione originale	Pianta del lazzeretto di Ancona.
Autore	Attribuibile al Vanvitelli
Data	XVIII sec.
Luogo	Sconosciuto
Collocazione	Archivio DICEA
Note	Non si conosce la collezione originale in quanto in Bucciarelli, Mezzetti e Pugnaroni (p. 189) si fa riferimento ad un'altra pubblicazione da cui l'immagine è tratta: Cesare De Seta, "Disegni di Luigi Vanvitelli architetto e scenografo", in <i>Luigi Vanvitelli</i> , Napoli, 1973.



*Disegno di Luigi Vanvitelli*

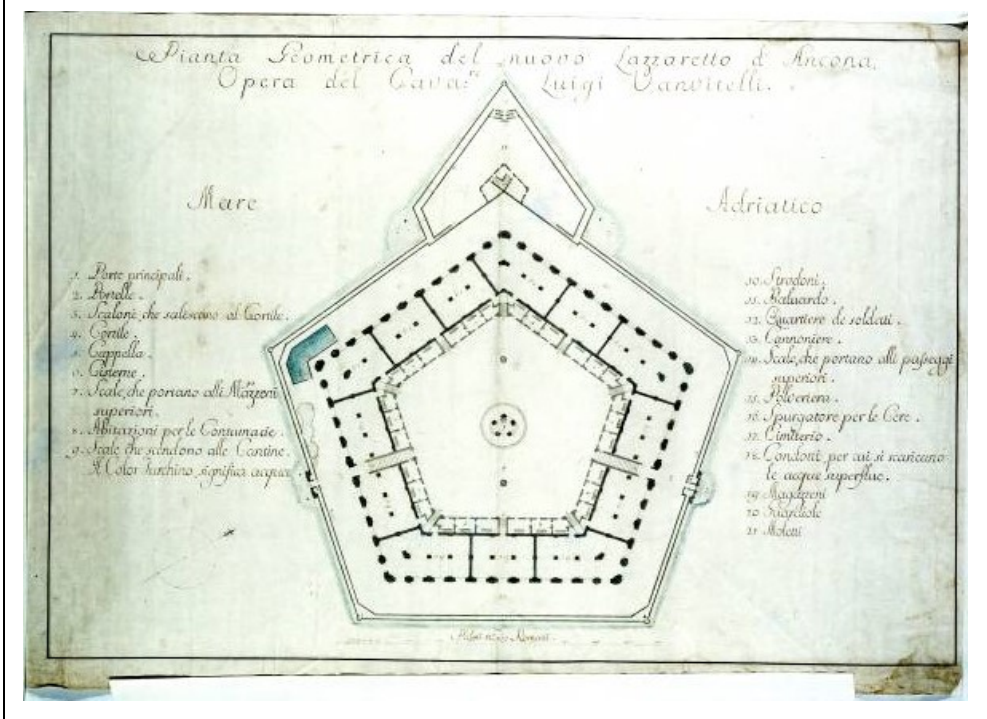
*Pianta del piano superiore del lazzaretto*

Istituto di Conservazione	Biblioteca Comunale Benincasa
Titolo o denominazione originale	Pianta del piano superiore del lazzaretto.
Autore	Sconosciuto
Data	XVIII sec.
Luogo	Ancona
Collocazione	Archivio DICEA
Note	vedi Bucciarelli, Mezzetti e Pugnali, p. 229.



**Pianta del piano terra del lazaretto**

Istituto di Conservazione	Biblioteca Federiciana di Fano
Titolo o denominazione originale	Pianta del piano terra del lazaretto.
Autore	Sconosciuto
Data	XVIII sec.
Luogo	Fano
Collocazione	Archivio DICEA
Note	Nessuna

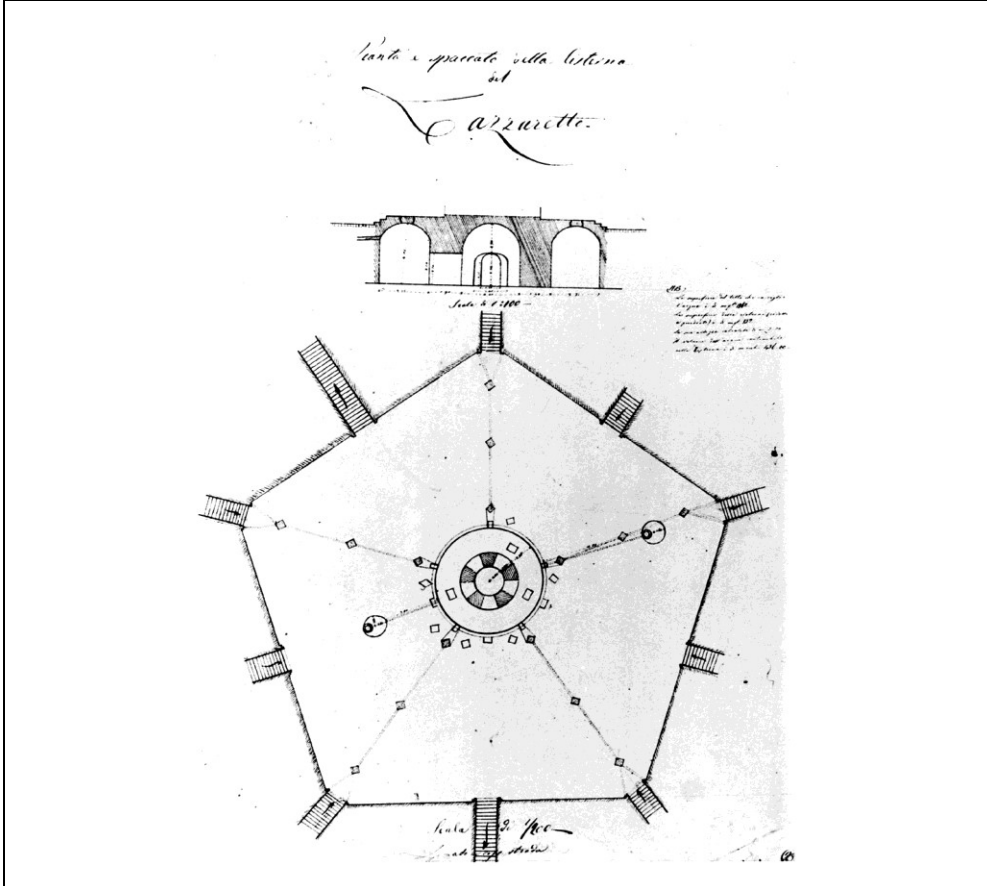






***Pianta e sezione della cisterna del lazaretto con indicazione del sistema di raccolta e smaltimento dell'acqua***

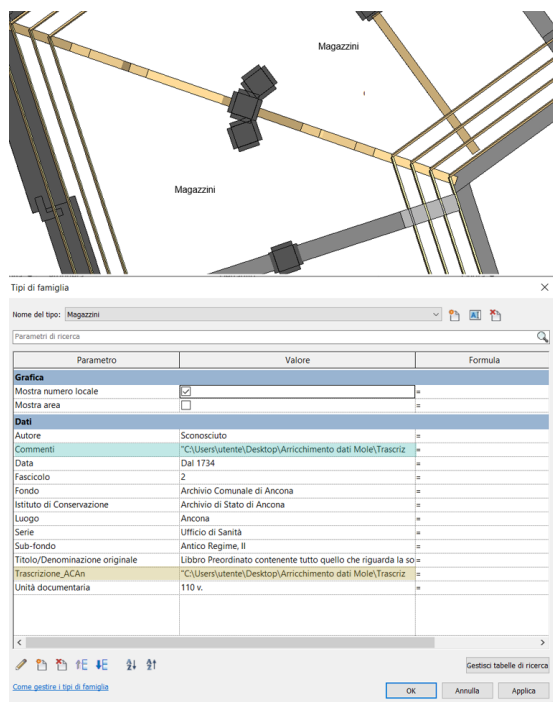
Istituto di Conservazione	Biblioteca Comunale Benincasa
Titolo o denominazione originale	Pianta e sezione della cisterna del lazaretto con indicazione del sistema di raccolta e smaltimento dell'acqua.
Autore	Sconosciuto
Data	XVIII sec.
Luogo	Ancona
Collocazione	Archivio DICEA
Note	vedi Bucciarelli, Mezzetti e Pugnaroni, p. 168.



<i>Pianta del piano terra del lazaretto</i>	
Istituto di Conservazione	Biblioteca Comunale Benincasa
Titolo o denominazione originale	Pianta del piano terra del lazaretto.
Autore	Sconosciuto
Data	XVIII sec.
Luogo	Ancona
Collocazione	Archivio DICEA
Note	vedi Bucciarelli, Mezzetti e Pugnali, p. 178.

Tabella 2. Documentazione iconografica conservata presso Archivio DICEA, Biblioteca comunale Benincasa di Ancona e Biblioteca Federiciana di Fano. Descrizione dei disegni d'archivio con indicazione della nomenclatura di catalogazione richiesta dallo standard ISAD.



Archivio Comunale di Ancona (ACAN), Antico Regime, II, Ufficio di Sanità, 2 (Libbro preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica dei nuovi lazzeretti...)

110 v.

#### Magazzini degli Nuovi Lazzeretti

La Fabbrica dei Nuovi Lazzeretti contiene nel suo interno circondario numero 26 Magazzini tutti ampi e spaziosi. Nel Primo ripiano di una tal fabbrica vi sono situati n. 13 Magazzini tutti à volta viva con suoi pavimenti di selciato con grosse rastellate che si chiudono nel secondo ripiano e sulla piazza di detti lazzeretti vi sono parimenti altri n. 13 Magazzini della stessa lunghezza e latitudine dell inferiori del Primo Ripiano e questi sono tutti à tetto nudo costruiti con grosse travature ed hanno tutti li loro pavimenti mattonati con grandi e larghi finestroni aperti con soli controsouti di legno assai robusti ed hanno una sola porta per cadama, che introduce nell medesimi hanno altresì per ogni Magazzino il Cammino, sciacquatolo e luogo commodo, affinché a misura di circostanze possono così servire per contumaciarsi anche le persone non che le merci, come tante e tante volte è seguito. A questi si ascende per otto scaloni coperti situati nel la suriferita piazza della nuovi lazzeretti. Li sopradetti Magazzini pochi anni dopo che vennero aperti li enumerati nuovi lazzeretti poi cessata l'affluenza delle contumacie nel mesi precedenti alla fiera di Simgalla

#### Magazzini degli Nuovi Lazzeretti

La Mole Vanvballiana era stata progettata e costruita per accogliere un gran numero di passeggeri in quarantena e, soprattutto, grosse quantità di merci provenienti dalla sponda opposta dell'Adriatico e dal Levante Ottomano. I 13 magazzini del piano terra avevano grandi arcate aperte mentre quelli al piano superiore grandi finestre poiché era importante lasciar aneggiare le merci in modo che si spurgassero e disinfezzassero. Al piano terra, per impedire l'ingresso e la contaminazione di persone non autorizzate, i magazzini erano chiusi da "restelli" cioè cancellate di legno. Il documento sottolinea come i 26 magazzini fossero dotati di latrina, camino e acquio in modo da poter permettere ai guardiani e ai mercanti che lo volessero di passare la quarantena nei magazzini (per controllare il proprio carico e risparmiare sui costi di quarantena). Latrina e camino, oltre a espletare le ovvie funzioni, erano anche di fondamentale importanza per mantenere l'ambiente privo di miazimi. La latrina allontanava ogni odore prodotto dai rifiuti umani mentre il fumo e il calore prodotto dal camino erano considerati dei correttivi dell'aria pestilente e quindi svolgevano un ruolo fondamentale nel mantenere un ambiente salubre.

Figura 23. Revit, data enrichment: i vani identificati come magazzini sono stati implementati con parametri di progetto che raccolgono le informazioni archivistiche secondo lo standard ISAD. I documenti .pdf sulla destra sono i collegamenti diretti alle trascrizioni dall'ASAn e ai commenti dello storico.

Un elemento della ricerca su cui si ritiene opportuno porre l'attenzione è quello dell'acqua, del rapporto dell'architettura con essa e del sistema di raccolta e smaltimento. Senza dubbio, come già illustrato nei paragrafi precedenti, il lazzeretto di Ancona ha una connessione particolare con l'acqua e ne è testimonianza non solo la sua collocazione, ma anche il sistema di cisterne che si sviluppa sotto il piano di calpestio del cortile interno.

La presenza di sorgenti d'acqua naturali e la possibilità di immagazzinarne grandi quantità era di fondamentale importanza per un istituto di quarantena.

Il valore dato alla presenza di acqua non era solo dovuto ai passeggeri tenuti in quarantena e alle loro necessità, ma anche al mantenimento di un ambiente salubre e

privo di miasmi. La presenza di pozzi, sorgenti, cisterne e canali per le acque reflue e avanzati sistemi di distribuzione dell'acqua è comune in molti lazzaretti precedenti, contemporanei e successivi alla Mole Vanvitelliana.

Dalle fonti storiche consultate è emerso che Vanvitelli progettò con gran cura la cisterna e il sistema di raccolta e deflusso delle acque dopo aver studiato attentamente i lazzaretti di Venezia, Genova.

Nella trascrizione di cui all'appendice A.1., carta documentaria 62 r. si può notare come venga sottolineata la provenienza dell'acqua raccolta dalla cisterna: solo quella proveniente dai tetti dei magazzini veniva immagazzinata nella cisterna, quella proveniente dai tetti delle abitazioni che ospitavano i passeggeri, essendo potenzialmente contaminata, veniva scaricata in mare mediante un sistema di tubazioni e canali interrati. Dai punti di raccolta, ancora oggi visibili nel cortile, l'acqua veniva convogliata in tre cisterne, una grande centrale collocata esattamente al di sotto del tempietto e due, di dimensioni minore, poste sotto i pozzetti.

In Figura 24 la rappresentazione planimetrica e tridimensionale del sistema di raccolta e scolo delle acque.

Selezionando nel modello gli elementi architettonici che costituiscono le cisterne è possibile vedere l'implementazione dei dati effettuata.

## **Risultati**

Gli edifici storici sono il risultato di processi di modificazione e stratificazione avvenuti nel tempo, quindi testimoniano gli eventi storici, i caratteri e le culture costruttive che si sono succeduti nei secoli, pertanto una loro documentazione consapevole risulta fondamentale.

Il modello HBIM della Mole Vanvitelliana, ottenuto dall'integrazione delle *expertise* di rilevatori, modellatori e storici, è un modello consapevole della propria storia, uno strumento per l'implementazione della conoscenza del manufatto: questa applicazione dimostra le potenzialità offerte dalla metodologia HBIM al patrimonio storico.

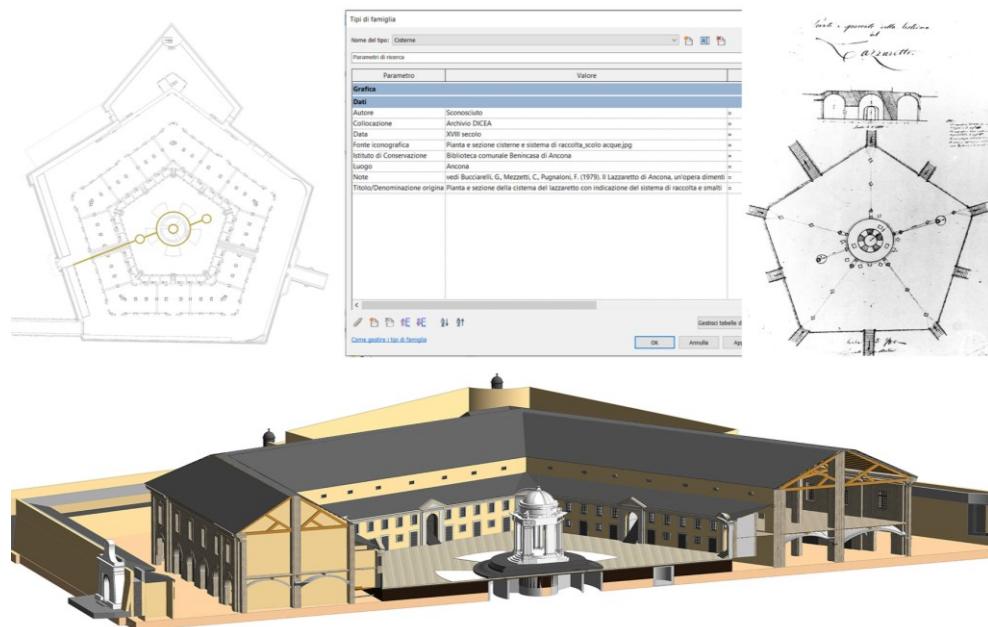


Figura 24. Revit, data enrichment per le cisterne.

Il processo seguito ha garantito una maggiore conoscenza degli aspetti costitutivi e delle peculiarità del manufatto nel rispetto dei principi di implementazione, fonti della ricerca e documentazione emanati dalla Carta di Londra per la visualizzazione digitale dei Beni Culturali. Nell'ambito del processo HBIM la fase di ricerca bibliografica e di materiale d'archivio, infatti, come indicato nel terzo capitolo della Carta, è stata ampiamente indagata e valutata in modo strutturato.

Il rigore della strutturazione della ricerca archivistica implementata ha garantito che i processi di elaborazione critica sul Patrimonio.

La metodologia applicata ha validato la modellazione degli spazi esterni ed interni della fase del XVIII secolo: il materiale archivistico raccolto e implementato nel modello ha consentito di effettuare scelte consapevoli e trasparenti, del tutto coerenti con la documentazione investigata.

Senza dubbio questo caso studio dimostra come una collaborazione tra esperti di domini diversi, ma complementari, sia fondamentale per definire buone prassi e per

individuare una metodologia condivisa. Nonostante le operazioni di digitalizzazione compiute sul patrimonio documentale e archivistico siano ormai consolidate nella pratica comune dell'indagine storica, manca un nesso reale tra queste e i Beni oggetto della catalogazione.

L'applicazione metodologica della Mole Vanvitelliana ha permesso di connettere la documentazione digitalizzata all'oggetto architettonico, configurandosi come uno strumento valido di consultazione per gli storici e di comprensione profonda delle evoluzioni del manufatto architettonico.

I modelli informati del Patrimonio rappresentano, infatti, un vantaggio straordinario per coinvolgere la ricchezza delle informazioni raccolte durante le ricerche e gli interventi, la tutela e le attività di conservazione all'interno di un intero sistema costruttivo architettonico.

### **2.2.3 Un modello per la gestione della quarta dimensione e per la conservazione: Palazzo Ferretti di Ancona**

#### **Research questions**

Le tecnologie digitali hanno contribuito ad aprire scenari di grande interesse per la conservazione del patrimonio culturale e a fornire strumenti abilitanti per affrontare adeguatamente alcuni dei problemi cruciali che mettono a rischio il patrimonio.

Negli ultimi anni, in particolare in Italia, tale questione è diventata estremamente urgente, per la necessità teorica e legislativa di rendere la gestione del patrimonio coerente, coordinata e pianificata (Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio 42/2004, art. 29). Numerose ricerche sono state incentrate, infatti, sulla sperimentazione di adeguati strumenti digitali, come l'HBIM che attraverso la costruzione di modelli ben informati, informabili e interrogabili, può supportare processi a lungo termine di conservazione e gestione di edifici e siti storici

La modellazione della quarta dimensione, essendo la gestione diacronica dei contenuti semantici concretizzabile in ambiente HBIM, consente di incorporare informazioni semanticamente arricchite con il fine di sviluppare database spazio-temporali in grado di trasmettere e mostrare chiaramente come l'edificio si è evoluto nel tempo.

Questa è una questione importante nella rappresentazione della conoscenza e nella gestione delle ontologie quando si fa riferimento sia al restauro sia alla conservazione preventiva del patrimonio storico.

L'approccio ad un edificio esistente richiede sempre la classificazione cronologica delle sue strutture attraverso analisi stratigrafiche, che sono abitualmente rappresentate da disegni bidimensionali che trascurano la relazione tridimensionale tra le parti. Inoltre, la letteratura di settore ha più volte evidenziato specifiche difficoltà nella realizzazione della Matrice di Harris, che è la visualizzazione simbolica del processo di formazione e trasformazione dell'edificio e quindi l'output più significativo di questo tipo di analisi, soprattutto nel caso di architetture con strutture spaziali e volumetriche complesse.

Organizzare gerarchicamente i dati sulle trasformazioni degli edifici storici, automatizzando al contempo il sistema di rappresentazione di tutte le fasi evolutive, sono obiettivi da raggiungere per rinnovare la metodologia consolidata di indagine del patrimonio architettonico verso la sua conservazione. Poiché le strategie di conservazione passano da processi ermeneutici arricchiti dalla costruzione della conoscenza, ogni strumento digitale indirizzato alla protezione del patrimonio culturale può non fornire un'adeguata rappresentazione della conoscenza.

Per questo motivo, è essenziale integrare consapevolmente il potenziale delle nuove tecnologie nella gestione di sistemi di dati complessi con le questioni umanistiche legate alle attività del patrimonio culturale.

Dal punto di vista delle *digital humanities*, la modellazione di un *HBIM 4D-aware* può offrire diversi benefici: da un lato, arricchisce la fase di conoscenza del processo di conservazione e contribuisce ad affermare l'autenticità fisica e materiale degli edifici storici. Si tratta di una questione fondamentale se si considera che, nel tempo, il concetto di autenticità ha registrato un progressivo spostamento dalla fisicità del patrimonio culturale verso domini sempre più concettuali - basti pensare alla Carta di Burra (1979) che proponeva un approccio alternativo alla materia della conservazione che quasi trascende la materialità del patrimonio (artt. 1-2) (Australia ICOMOS, 2013). Dall'altro lato, supporta e migliora le strategie di gestione, a cui è stata data crescente attenzione negli ultimi anni, come ha dimostrato l'impegno dell'UNESCO nei confronti dei siti del patrimonio mondiale.

Attraverso la modellazione del tempo, è possibile acquisire una conoscenza approfondita delle trasformazioni edilizie nel tempo: tale presupposto contribuisce a ridurre l'esposizione del patrimonio al rischio, sia straordinario, poiché le interfacce tra le strutture diacroniche sono chiare, sia ordinario, supportando così l'attuazione di piani di conservazione preventiva.



## **L'acquisizione e l'analisi stratigrafica**

Come già spiegato in principio al capitolo (cfr. 2.2) con questo caso studio il flusso di lavoro seguito ha portato all'elaborazione di un modello per la gestione e l'analisi della quarta dimensione e dell'evoluzione stratigrafica di una porzione di edificio.

Palazzo Ferretti è uno delle più interessanti architetture di Ancona, sita nel cuore della città storica e oggi sede del Museo Archeologico Nazionale delle Marche<sup>18</sup>.

Il manufatto vanta una complessa articolazione riconducibile alle addizioni volumetriche succedutesi nel tempo: eretto nel XVI secolo, ampliato e sopraelevato nel XVIII secolo, danneggiato dai bombardamenti della Seconda guerra mondiale così come da quelli tellurici, ricostruito parzialmente e interessato da diversi interventi di restauro.

La scelta del caso studio si giustifica sia per il sistema di tracce stratigrafiche ancora leggibili e non approfonditamente indagate, sia per continuità di studio essendo stato di recente oggetto di una ricerca condotta dal Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura dell'Università Politecnica delle Marche che, dal rilievo architettonico, ha portato alla realizzazione di un modello *reality based* validando un flusso di lavoro finalizzato a ottenere informazioni accurate e affidabili da un HBIM inteso come strumento operativo di conoscenza (Moreira *et al.*, 2018).

A partire dai risultati ottenuti, con questo caso applicativo si intende approfondire la mappatura delle unità stratigrafiche del sistema di facciate esterne di sud-ovest così da definire una metodologia per modellare gli aspetti materiali e costruttivi di trasformazione del bene sfruttando suddivisione semantica e tassonomia dettagliate del modello.

Considerando sia gli attributi geometrici (LoG) sia il livello informativo (LoI) che un BIM può garantire, è evidente come questo possa contribuire massivamente ad

---

<sup>18</sup>Le attività di rilievo sono state autorizzate su concessione del MiBACT Ministero per i Beni e le Attività Culturali e per il Turismo - Direzione Regionale Musei Marche ora MiC (Ministero della Cultura). Le elaborazioni prodotte sono di proprietà della Direzione Regionale Musei Marche - Museo Archeologico Nazionale delle Marche.

assumere un ruolo attivo all'interno del processo di conoscenza del patrimonio costruito.

Il flusso di lavoro seguito può essere riassunto nelle seguenti fasi chiave:

1. L'acquisizione fotogrammetrica a sostegno della metodologia tradizionalmente impiegata per le letture dei paramenti murari nell'archeologia degli elevati;
2. L'analisi stratigrafica per la comprensione dell'evoluzione e delle trasformazioni;
3. La modellazione 3D e l'arricchimento dati per permettere la transizione dalla tradizionale rappresentazione stratigrafica con viste 2D associata a un progetto di restauro, a una mappatura stratigrafica 3D per sostenere le attività di conservazione a lungo termine;
4. La visualizzazione della matrice di Harris per sperimentare la possibilità di rappresentare e aggiornare in modo semi-automatico le trasformazioni dell'architettura, dato che l'edificio cambia nel tempo di fronte sia a nuove scoperte riguardanti il passato che a modifiche future.

#### *L'acquisizione*

Data la mole di dati acquisiti da precedenti campagne di rilievo e l'importanza dell'oggetto architettonico, Palazzo Ferretti si configurava come caso studio interessante su cui testare nuove metodologie e approcci non ancora completamente sviluppati dei sistemi BIM sul CH.

La base scientifica imprescindibile delle attività dell'HBIM è l'acquisizione strumentale che, come in (Inzerillo *et al.*, 2016) va intesa come perfezionamento dei processi di integrazione dei dati. Gli approfondimenti e le indagini proprie del restauro e condotte sui manufatti, necessitano del rilievo inteso come imperativo supporto agli approcci metodologici.

La campagna di acquisizione laser scanner, svolta prima dell'inizio del lavoro di tesi e di cui si riportano alcuni dati principali, ha riguardato la totalità degli spazi esterni, alcune sale interne e una selezione di reperti archeologici. Il rilievo TLS del complesso

di Palazzo Ferretti è composto di 69 scansioni di cui 40 stazioni per il rilievo esterno dell'edificio e 20 per il rilievo interno. Queste scansioni sono state acquisite con una risoluzione di 1 cm a 100 m, alcune parti in cui erano necessari maggiori dettagli, sono state acquisite una risoluzione di 0,5 cm a 100 m.

La *point cloud* finale ottenuta dall'allineamento delle nuvole di tutte le 78 scansioni è composta da 1,2 miliardi di punti con errore assoluto medio di 1 mm e errore massimo riscontrato di 5 mm (Figura 25).

Per seguire la metodologia consolidata e validata dal restauro architettonico e comprendere a fondo le relazioni temporali esistenti tra gli elementi architettonici della facciata e i loro rapporti, la *point cloud* ottenuta dal rilievo laser scanner è stata integrata con l'acquisizione fotogrammetrica.

La facciata sud-ovest del Palazzo è stata acquisita utilizzando due macchine fotografiche: Sony Alfa 9 full frame e Sony ILCE 6500 APS-C con distanza focale rispettivamente di 50 e 24 mm montate su cavalletto o su asta telescopica.

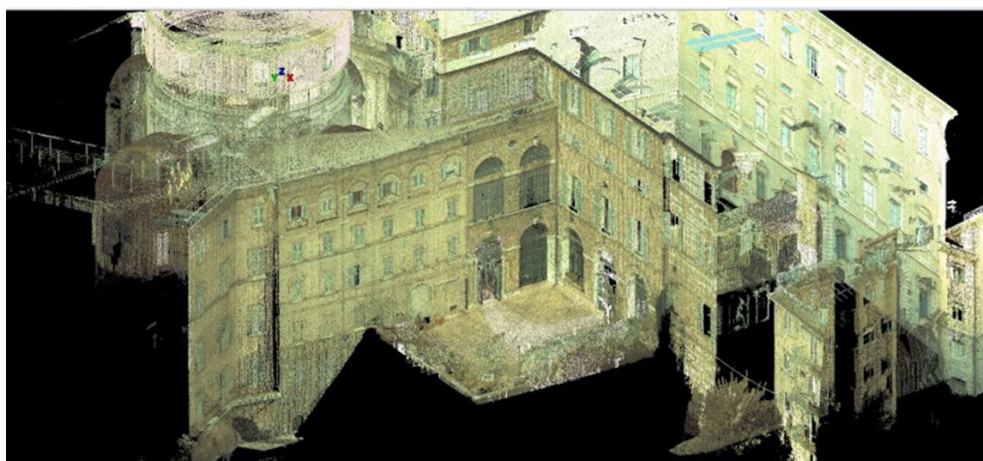
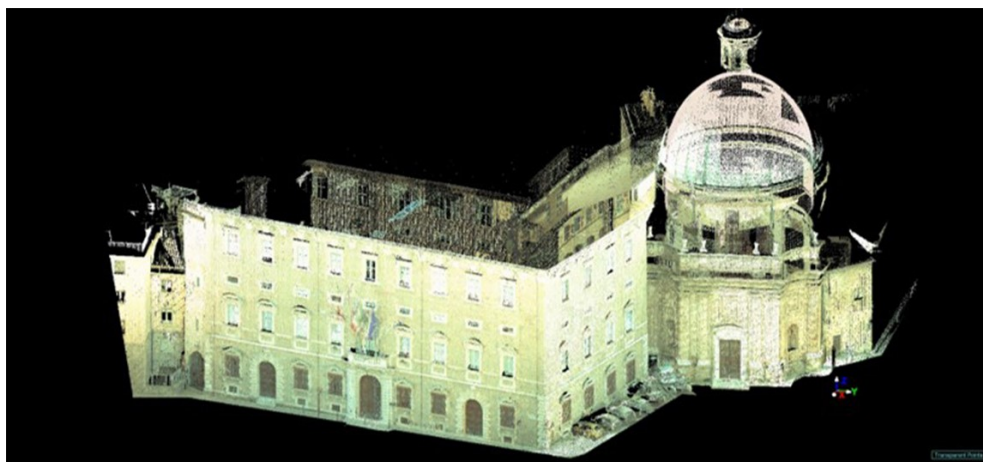
Le dimensioni della facciata scelta (460 m<sup>2</sup> circa) hanno suggerito la necessità di dividere la porzione da acquisire in due aree distinte per ciascuna delle quali è stato impostato un progetto di presa fotografica.

I due obiettivi usati e le distanze di presa calcolate hanno garantito un *Ground Sampling Distance* (GDS) e quindi una risoluzione pressoché omogenea.

L'utilizzo simultaneo di due camere ha consentito di coprire in maniera più speditiva e ottimale l'intera area oggetto di approfondimento.

L'elaborazione dei dati è stata eseguita con il *software* Agisoft Metashape.

Il primo processo di calcolo ha determinato la posizione e l'orientamento di ogni camera utilizzata per la ricostruzione del modello, generando una nuvola sparsa, la seconda elaborazione è consistita nella generazione della *Dense Cloud*, la terza nella generazione di una *mesh* triangolare (con una densità di mesh relativa al numero di punti calcolati nella nuvola densa) (Figura 26) e la quarta elaborazione è ha condotto alla generazione di un'ortofoto ad alta risoluzione (Figura 27 e Figura 28): necessaria base di lavoro per lo step successivo dell'analisi delle singole unità stratigrafiche.



*Figura 25. Point cloud di Palazzo Ferretti. In alto la facciata principale, in basso la terrazza sud ovest.*

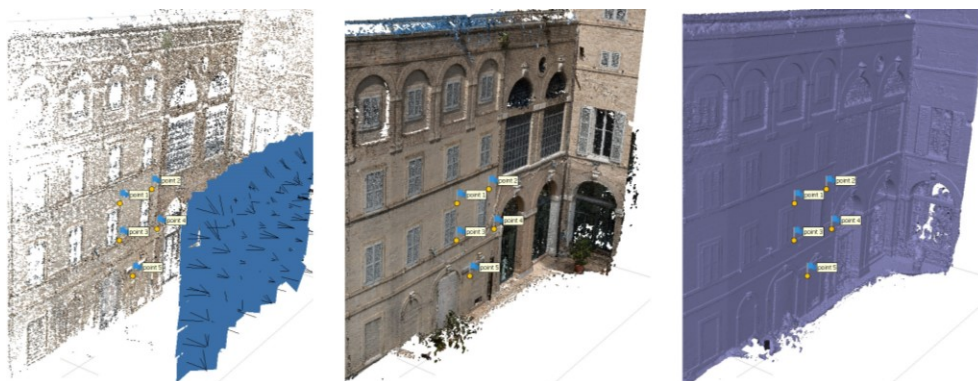


Figura 26. Metashape, elaborazione del rilievo fotogrammetrico della facciata: nuvola sparsa, nuvola densa e mesh.

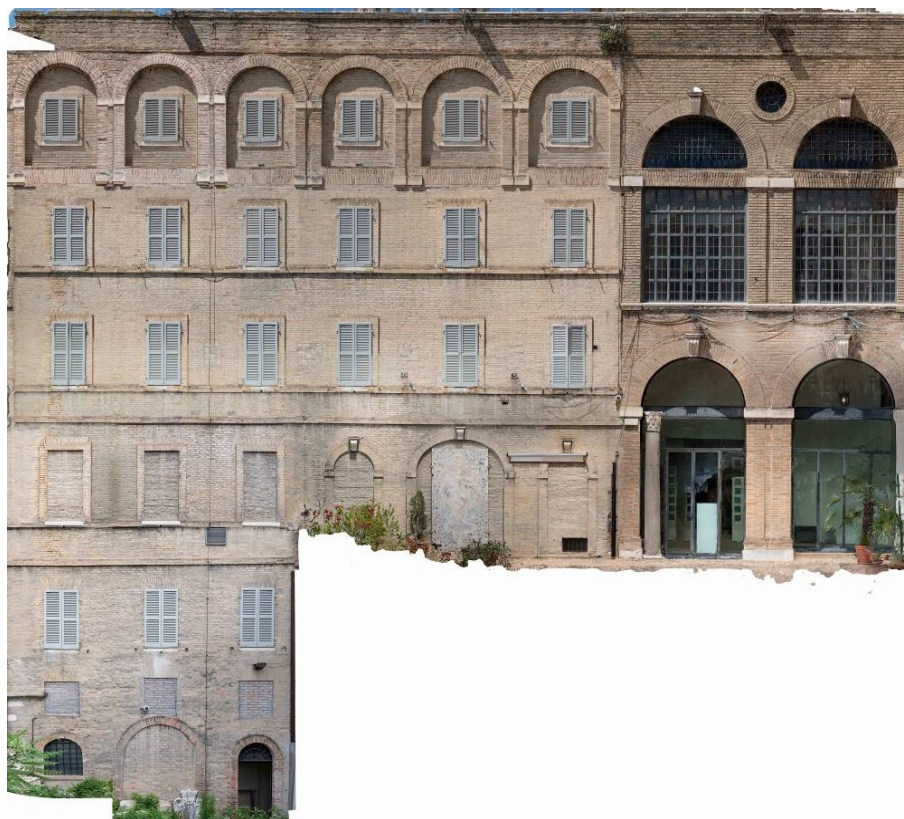


Figura 27. Ortofoto estratta da Metashape.





Figura 28. Ortofoto estratta da Metashape: dettagli

### *L'analisi stratigrafica*

Il palazzo può essere schematicamente suddiviso in quattro corpi di fabbrica (Figura 29): il corpo A, che costituisce l'originario nucleo cinquecentesco, ed il corpo B, che è il suo ampliamento settecentesco, sono i blocchi presi in considerazione per questo lavoro.

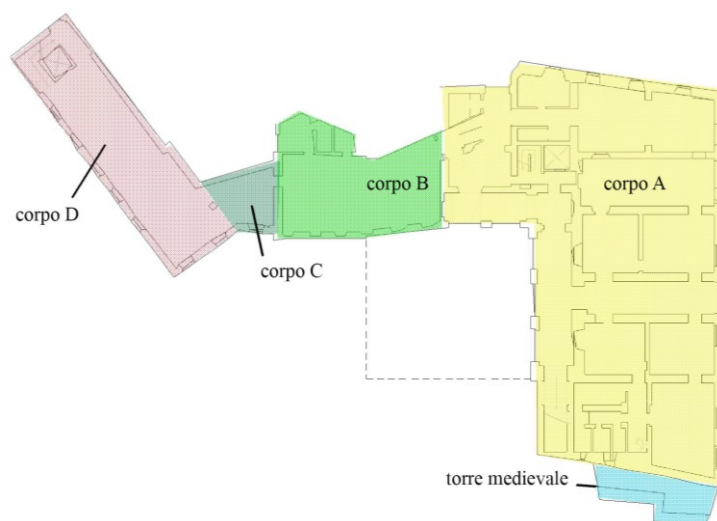


Figura 29. *Corpi di fabbrica di cui si compone Palazzo Ferretti*

Per la facciata sud-ovest di Palazzo Ferretti sono state individuate quattro fasi principali (Figura 30):

- Fase costruttiva tardo Rinascimentale: indicata nel modello come Fase 1 – 1500. Gli elementi caratterizzanti principali sono i due ordini di archi a tutto sesto realizzati in laterizio;
- Fase costruttiva del Settecento: indicata nel modello come Fase 2 – 1700. Gli elementi architettonici e i modesti apparati scandiscono la facciata secondo quattro ordini;
- Fase costruttiva post Settecento: indicata nel modello come Fase 3 – post 1700. Questa è stata ulteriormente divisa in due fasi diverse: entrambe sono di

certo successive al 1700, ma gli elementi architettonici potrebbero non essere stati realizzati nello stesso momento;

- Fase costruttiva post Settecento: indicata nel modello come Fase 4 – post 1700 - contemporaneità.

Questa ha un'estensione piuttosto ridotta ed è composta per lo più da elementi di tamponamento che fanno intuire una realizzazione quasi contemporanea.

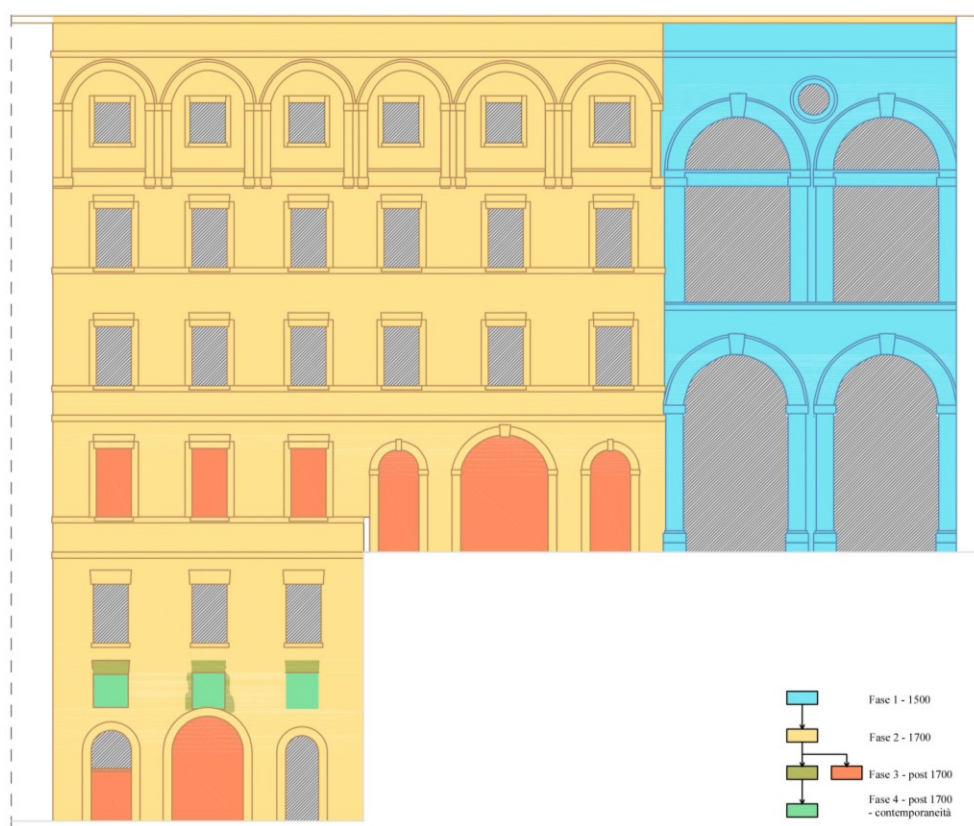


Figura 30. *Identificazione delle fasi costruttive della facciata*



Le stratificazioni sono il risultato delle azioni di costruzione e distruzione che si sono succedute nel tempo sul manufatto e il processo analitico che consente all'operatore di trasformarle in una sequenza è proprio quello dell'analisi stratigrafica.

Nel campo dell'archeologia il riferimento a livello analitico è quello più comunemente conosciuto come *chronotypological analyses* in cui la nozione di tipo è legata ad una procedura di classificazione che permette di riconoscere oggettivamente, un certo numero di unità comparabili e co-presenti. (Pittaluga *et al.*, 2020).

L'analisi stratigrafica degli alzati, come detto precedentemente, è il principale strumento di lettura di cui dispone l'archeologo per l'interpretazione corretta dell'evoluzione temporale del bene: l'architettura ne acquisisce il processo per condurre analisi sulle murature. Questo processo si compie negli edifici esistenti mediante una scomposizione ideale delle fasi di costruzione e distruzione, approfittando delle superfici spesso naturalmente esposte alla vista.

Le unità stratigrafiche (u.s.) sono l'elemento base dell'analisi stratigrafica e identificano quelle parti dell'oggetto di studio che possono essere considerate unitarie dal punto di vista della stratigrafia essendo prive al loro interno di soluzioni di continuità.

Le u.s. sono state divise, così come da convenzione, in positive e negative. Le prime sono state individuate come quelle unità frutto di un'unica intenzione costruttiva e sono state indicate con un numero, le seconde, invece, sono quelle che recano segni di un'evidente asportazione di materiale a seguito di azioni umane volontarie e sono state indicate con un numero inserito in un quadrato. Si ritiene opportuno riportare un'ulteriore specifica relativa alle u.s. negative: rispetto positive non indicano un'area, che di fatto non c'è più perché demolita, ma un bordo di rottura (riferimento figura in cui faccio vedere la convenzione grafica)<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> I simboli adottati per il riconoscimento delle u.s. ed impiegati nell'analisi stratigrafica condotta sul caso studio di Palazzo Ferretti, rispettano il sistema convenzionale più diffuso in Italia. Le convenzioni grafiche seguite per questo lavoro sono quelle indicate da Stefano F. Musso in *Recupero e restauro degli edifici storici. Guida pratica al rilievo e alla diagnostica*, Roma, EPC Editore, 2016.

La letteratura di riferimento (Musso, 2016) contempla un ulteriore tipo di u.s. positiva, quella di rivestimento che però nel caso in esame non è presente.

Ogni u.s. che nella realtà è tridimensionale, come nel modello tridimensionale in Revit, ha una sua caratterizzazione specifica, a volte visibile a volte no. Per questo occorre precisare che, nella pratica comune del mondo del restauro architettonico, si parla più propriamente di interfacce (Musso, 2016) per intendere la superficie interposta tra due a contatto. I passi metodologici seguiti per l'analisi stratigrafica della facciata di Palazzo Ferretti riflettono quelli consolidati nella pratica del restauro e sono:

- Mappatura delle u.s.: individuazione delle u.s. e attribuzione di un codice identificativo;
- Analisi della consistenza materiale delle u.s.;
- Analisi dei rapporti stratigrafici di anteriorità, posteriorità e contemporaneità: definizione delle relazioni temporali che intercorrono tra le unità che sono state mappate. Per fare ciò si sono analizzati i diversi tipi di bordo tra le u.s., sono state indagate le interfacce e sono state studiate le sequenze operative di costruzione e distruzione (Figura 31).

Nell'effettuare l'analisi si è tenuto conto anche del concetto di rapporti relativi o assoluti. L'analisi stratigrafica può, infatti, mettere in rapporto temporale due u.s. senza esplicitarne in senso assoluto il tempo al quale fanno riferimento (rapporto relativo) oppure indicare il tempo esatto (rapporto assoluto).

Per quanto concerne la fase della mappatura è opportuno aggiungere che si sono esplicitati i diversi elementi architettonici che compongono le u.s. attraverso delle sotto-unità stratigrafiche indicate come u.s. XX.X (es: u.s. 26.1) dove il primo numero è quello dell'unità stratigrafica di appartenenza e il secondo quello della parte dell'unità di cui si vuole sottolineare la specificità (Figura 32).

Questa necessità è nata dal fatto che gli elementi architettonici che compongono le u.s. possono, in alcuni casi, essere diversi per funzione, per materiali e per tecniche costruttive. Rispetto al caso di Palazzo Ferretti l'analisi è stata principalmente di tipo diretto sulla base della lettura del manufatto (azione facilitata dal fatto che le murature

si presentano a faccia a vista) e, non essendo stata compiuta una ricerca storica esaustiva che consentisse di collocare con assoluta certezza le singole u.s. in un dato tempo, i rapporti temporali che ne sono derivati sono prevalentemente relativi (solo in alcuni casi assoluti).

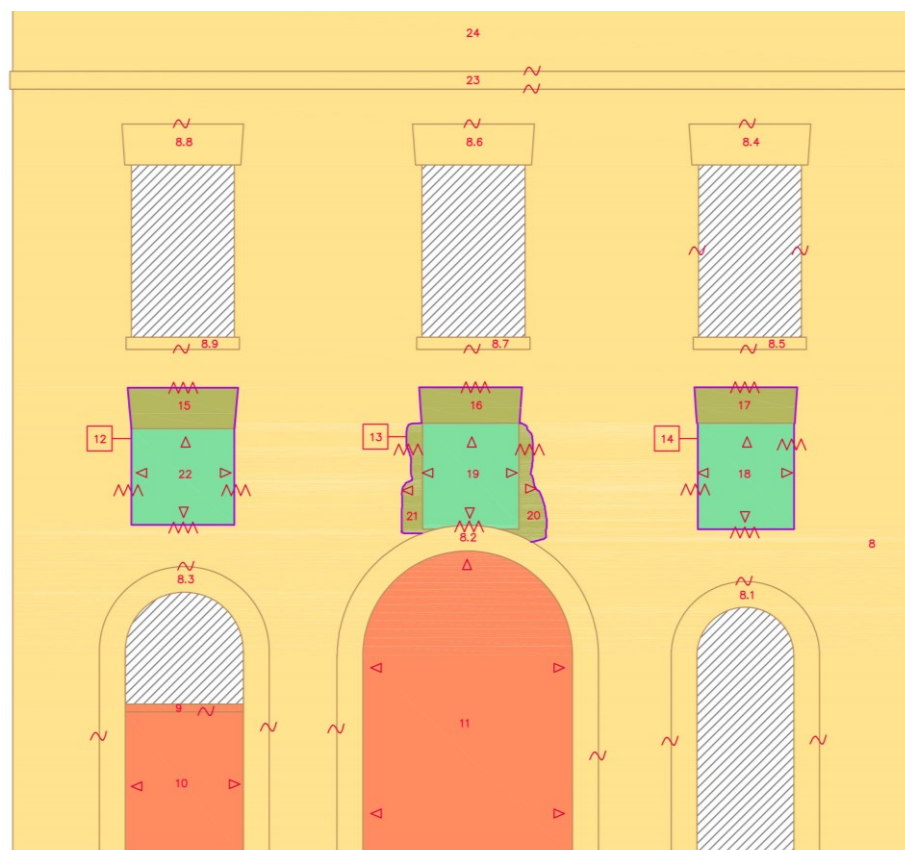


Figura 31. Individuazione dei rapporti stratigrafici tra le u.s. di una porzione della facciata analizzata. I rapporti stratigrafici vengono mappati con una simbologia convenzionale: onda (contemporaneità), freccia (posteriorità), zig-zag (rottura). Il bordo di rottura è ulteriormente evidenziato dal colore viola e le u.s. relative ad esso sono, rispettando le tradizionali convenzioni grafiche, riquadrate poiché unità di costruzione negativa.

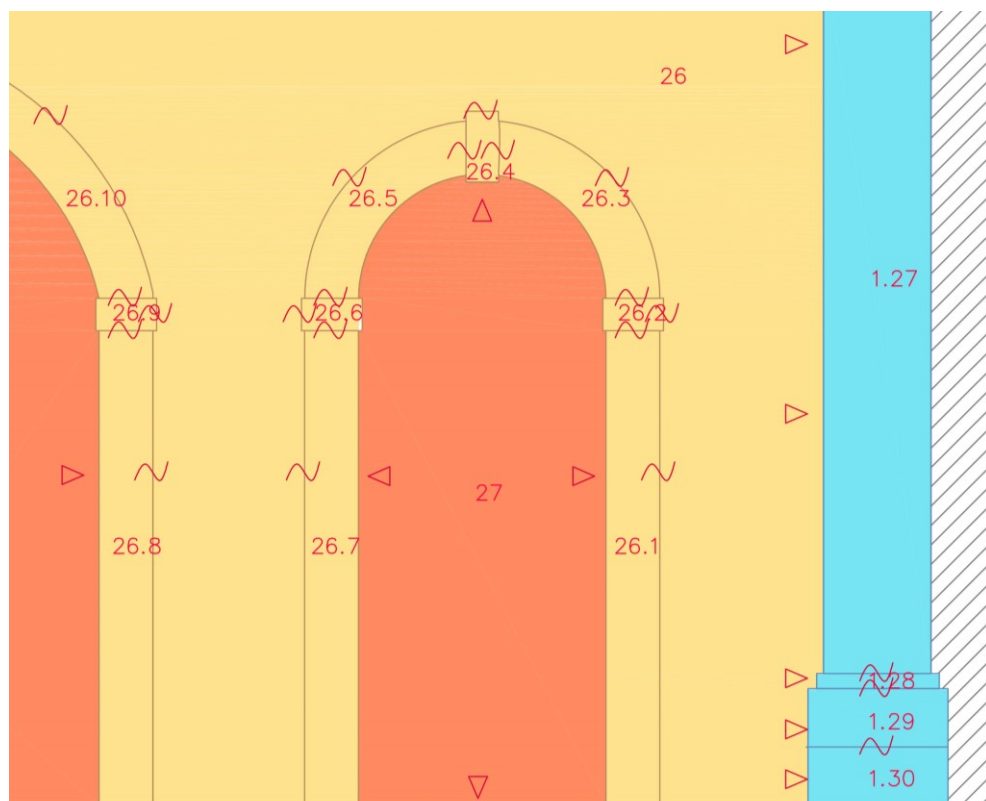


Figura 32. Sotto-unità stratigrafiche: il primo numero è quello dell'unità di appartenenza e il secondo quello della parte dell'unità di cui si vuole sottolineare la specificità.

## La modellazione e il data enrichment

### La modellazione

Un primo nucleo di modello *reality based* arricchito, informato e ontologicamente consapevole era stato già realizzato. I risultati più significativi della precedente ricerca riguardavano la realizzazione di librerie parametriche e la validazione di un flusso di lavoro dal TLS all'HBIM come illustrato in (Moreira et al., 2018). Le facciate del Palazzo sono state modellate con l'ausilio del *software* Revit ricorrendo alla creazione di famiglie di sistema e caricabili (\*.rfa).

Nello specifico muri, solai, tetti e marcapiani sono stati modellati e parametrizzati con le famiglie di sistema, mentre per l'apparato decorativo del palazzo, è stato necessario creare e parametrizzare famiglie caricabili.

Cornici, portali di accesso e trabeazioni, di cui sono stati studiati i vincoli semantici e geometrici coerenti con la pratica costruttiva e con le regole dei trattati, sono stati creati come famiglie caricabili o locali (Figura 33). Nel caso della parete scelta come test si è adottato, come criterio specifico di modellazione, quello di configurare e quindi mappare le u.s. e le relative sotto - unità stratigrafiche.

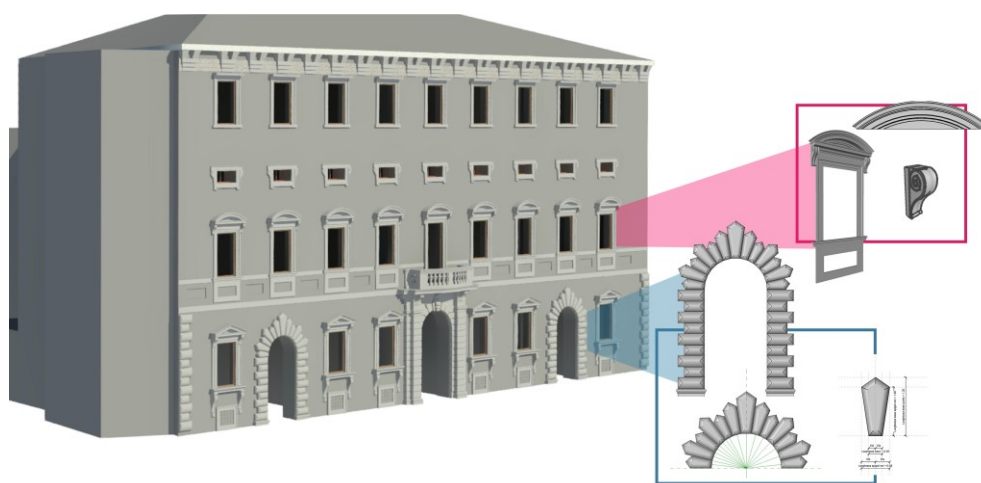


Figura 33. Revit, modellazione della facciata principale di Palazzo Ferretti, vista complessiva e famiglie locali per cornici e portali d'accesso.

La modellazione delle singole unità e sotto unità come elemento base ha evitato la costruzione di *nested families* che avrebbero raggruppato le u.s. e sotto - u.s. secondo altri criteri non prettamente stratigrafici: criteri tipologici (es: il sistema arconi con stipiti, architravi, capitelli), funzionali (es: tutte le architravi), costruttive (tutti muri in laterizio) non sempre coincidenti con i criteri stratigrafici oggetto dello studio.

A tal proposito è bene ricordare, infatti, che un'unità stratigrafica potrebbe non coincidere con un'unità costruttiva o tipologica.

La parete è stata modellata e parametrizzata sulla base della tradizionale analisi stratigrafica bidimensionale condotta a partire dall'ortofoto esito del processo di acquisizione fotogrammetrica della parete in esame. I parametri creati dal pannello proprietà indicano la fase storica di creazione o demolizione, il numero identificativo dell'unità stratigrafica (contrassegno) e tutta una serie di ulteriori dati atti ad arricchire il modello. Per ogni unità stratigrafica la modellazione è proceduta rispettando le necessità del risultato finale: un modello consapevole della propria storia, fedele e coerente alla lettura effettuata da esperti del mondo del restauro architettonico.

Il contrassegno assegnato in questa fase risulta utile anche ai fini della sola visualizzazione delle u.s. all'interno del modello. Sono state assegnate, infatti, etichette di tipo modello generico a ciascun elemento (Figura 34).



Figura 34. Revit, etichette delle u.s.: ciascuna di esse riporta l'ID/contrassegno univoco.

### *Il data enrichment*

Sfruttando le potenzialità del *software* utilizzato per la modellazione del Palazzo è stato possibile implementare nel modello la mappatura puntuale delle unità stratigrafiche scelte come *benchmark*, analizzandone i materiali e i sistemi costruttivi, ma soprattutto ricostruendo le relazioni temporali tra le parti dell'edificio con anche il supporto delle fonti storiche.

I dati relativi all'analisi stratigrafica sono stati raccolti e organizzati all'interno del modello in modo tale da rispecchiare il flusso di lavoro e la metodologia adottata. Questi dati sono stati caricati per ogni unità e sotto-unità stratigrafica (Tabella 3):

<b>Dati</b> (dati relativi all'analisi stratigrafica)	
ID u.s.	u.s. XX
Genesi u.s.	Costruzione_u.s. positiva (n. singolo) Demolizione_u.s. negativa (n. riquadrato)
Materiale u.s.	Laterizio Pietra Legno, etc.
Consistenza materiale u.s.	Es.: M1: Muratura omogenea in laterizio di recupero allettata con malta di calce idraulica naturale.
Datazione u.s.	Assoluta Relativa
Fase costruttiva u.s.	Fase 1 Fase 2 Fase 3 Fase 4
Anteriorità: anteriore a u.s.	2, 4, 5, 6, 7, etc.
Posteriorità: posteriore a u.s.	6, 89, 100, 45, 67, etc.
Contemporaneità: coevo a u.s.	6, 5, 4, 34, 22, etc.

Tabella 3. *Dati implementati per ogni u.s.*

I primi dati riguardano la prima fase dell'analisi stratigrafica, ovvero quella di mappatura che restituisce l'“ID u.s.” di ogni unità e sotto-unità indicata con un numero progressivo (u.s. 1; u.s. 1.1).

Un altro parametro di questa prima fase di implementazione è “genesi u.s.” che fornisce informazioni relative alla origine di quella unità, cioè se questa è frutto di un processo di costruzione o demolizione, consentendo di connotarla come u.s. positiva, positiva di rivestimento o negativa.

Ulteriori dati con cui è stato arricchito il modello riguardano la seconda fase dell’analisi stratigrafica ovvero quella relativa all’analisi della consistenza materiale.

I parametri di progetto implementanti sono “materiale u.s.” e “consistenza u.s.” relativi ai materiali e alle tecniche.

Questi sono stati funzionali a supportare l’interpretazione dei rapporti stratigrafici (lettura del manufatto – fonti dirette) e si uniscono ai dati ricavati dalle fonti indirette (es: materiali e tecniche costruttive simili che suggeriscono rapporti di contemporaneità).

Infine, gli ultimi dati hanno riguardato la terza fase dell’analisi stratigrafica, ovvero quella di definizione dei rapporti stratigrafici, strettamente dipendenti dai rapporti fisici e materiali messi in evidenza con la fase precedente.

I dati implementati in questo step sono stati: “datazione u.s.”, “fase costruttiva u.s.” e le relazioni di “anteriorità: anteriore a u.s.”, “posteriorità: posteriore a u.s.” e “contemporaneità: coevo a u.s.”.

Il parametro della datazione, assoluta o relativa, è legato a quello della fase poiché se dell’u.s. è stato possibile identificare una datazione assoluta, conseguentemente si è potuta specificare una fase evolutiva (fase 1, fase 2, ...).

Da ultimo sono stati esplicitati i rapporti temporali di anteriorità, posteriorità e contemporaneità. Questi parametri hanno consentito, avendo inserito tutte le u.s. con il relativo ID, di arricchire il modello con dati che mettono in relazione tra loro le unità modellate e hanno consentono di costruire, passando per la costruzione di abachi dedicati per le murature, il diagramma di Harris.

La figura mostra i parametri all’interno dell’ambiente di lavoro Revit (Figura 35).



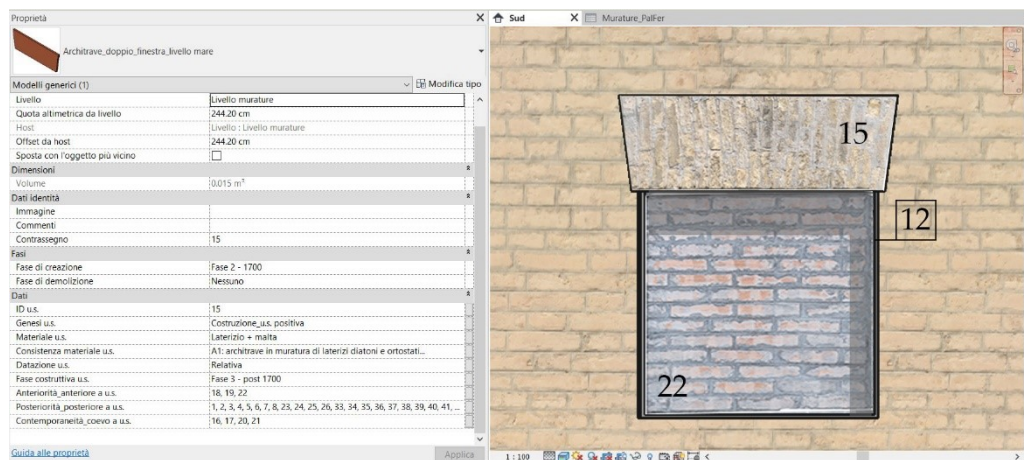


Figura 35. Revit, dati implementati per l'u.s.15

Nel caso di studio in oggetto il *tool* degli abachi è risultato essere una potenzialità chiave in quanto, per definizione, questi consentono di visualizzare elenchi di elementi di qualsiasi tipo in un progetto e rappresentano un tipo di visualizzazione del modello alternativa.

Un abaco è, infatti, una raccolta di informazioni estratte dalle proprietà degli elementi di un progetto e in esso è possibile elencare tutte le istanze che si intendono analizzare o estrarre. Per il caso studio i dati implementati all'interno del modello, essendo stati inseriti come parametri di progetto relativi alle tre fasi dell'analisi stratigrafica precedentemente illustrate, hanno reso possibile una gestione più completa delle informazioni per ogni unità stratigrafica.

L'abaco creato in Revit è di tipo "abaco multicategoria" (Figura 36).

<Murature_PalFer>									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	
Anteriorità anteriore a u.s.	Consistenza materiale u.	Contemporaneità coevo a u.s.	Datazione u.s.	Fase costruttiva u.s.	Genesi u.s.	ID u.s.	Materiale u.s.	Posteriorità posteri	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	C1: cornice (piedritti +	7, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39,	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/8.3		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	C1: cornice (piedritti +	7, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39,	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/8.2		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	C1: cornice (piedritti +	7, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39,	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/8.1		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	C1: cornice (piedritti +	16, 17, 20, 21	Relativa	Fase 3 - post 1700	Costruzione_u.s. positivi/25.4		Laterizio + malta		
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	C1: cornice (piedritti +	16, 17, 20, 21	Relativa	Fase 3 - post 1700	Costruzione_u.s. positivi/25.6		Laterizio + malta		
18, 19, 22	A1: architrave in murat	16, 17, 20, 21	Relativa	Fase 3 - post 1700	Costruzione_u.s. positivi/15		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,	
18, 19, 22	A1: architrave in murat	16, 17, 20, 21	Relativa	Fase 3 - post 1700	Costruzione_u.s. positivi/17		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	A1: architrave in murat	7, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39,	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/8.8		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	A1: architrave in murat	7, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39,	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/8.6		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	A1: architrave in murat	7, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39,	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/8.4		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	S2: soglia in pietra.	7, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39,	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/8.9		Pietra	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	S2: soglia in pietra.	7, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39,	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/8.7		Pietra	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	S2: soglia in pietra.	7, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39,	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/8.5		Pietra	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	S2: soglia in pietra.	7, 8, 23, 24, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39, 4	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/25.3		Pietra	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	S2: soglia in pietra.	7, 8, 23, 24, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39, 4	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/25.2		Pietra	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	S2: soglia in pietra.	7, 8, 23, 24, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39, 4	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/25.1		Pietra	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	C2: cornice (stipite) del	7, 8, 23, 24, 25, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39, 4	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/26.32		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6	
9, 10, 11, 27, 28, 29, 30, 31	C2: cornice (stipite) del	7, 8, 23, 24, 25, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39, 4	Assoluta	Fase 2 - 1700	Costruzione_u.s. positivi/26.33		Laterizio + malta	1, 2, 3, 4, 5, 6	

Figura 36. Revit, abaco multicategoria: ciascuna u.s. è elencata con i parametri implementati.

Il modello finale può essere visualizzato nelle sue fasi di ‘vita’ secondo filtri di visualizzazione o in una visione di insieme. In figura (Figura 37) il modello arricchito secondo i dati relativi all’analisi stratigrafica.

### La Matrice di Harris

Oltre alla metodologia illustrata nei paragrafi precedenti, questa fase della ricerca, infatti, ha tentato di testare modalità di rappresentazione della matrice che fossero il più possibile automatiche e graficamente di facile lettura per gli operatori.

Come già detto in precedenza l’archeologia stratigrafica viene accettata come strumento funzionale alla conoscenza e come guida indispensabile ad un progetto critico che si avvalga di discipline adeguate ai singoli casi (Brogiolo, 2002).

La stratigrafia degli elevati vede la sua visualizzazione tipica con la matrice di Harris, strumento che consente in maniera dettagliata ed accurata di comprendere la materia di cui il manufatto architettonico è composto in quanto appresenta lo strumento di lettura dei rapporti temporali.

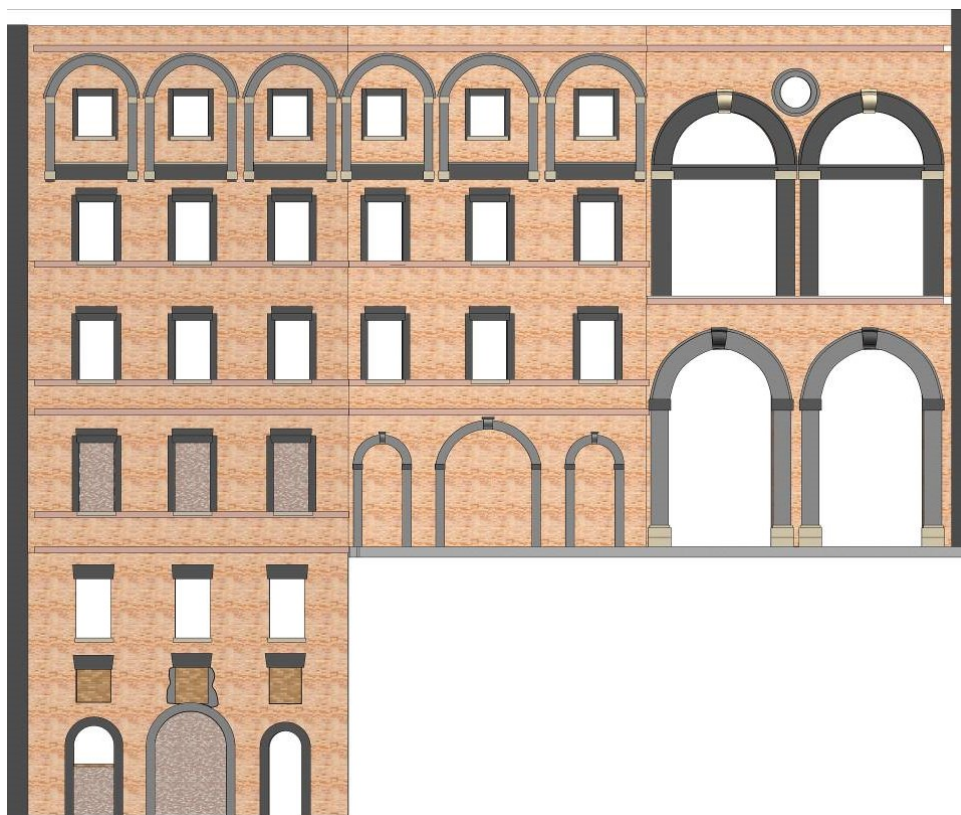


Figura 37. Revit, modello completo della facciata sud-ovest.

Per quanto concerne la rappresentazione grafica della matrice, la stessa letteratura di riferimento del settore dell'archeologia parla della mancanza di una vera e propria standardizzazione per l'archiviazione e la condivisione di dati stratigrafici.

Esistono alcuni *software* demandati alla rappresentazione della matrice quali Ad Hoc AM, Stratify e Harris Matrix Composer. In questa sperimentazione alcune prove sono state effettuate sia in Stratify sia in Harris Matrix Composer. Quest'ultimo non si limita a descrivere la stratigrafia al solo scopo di generare un diagramma da guardare, ma può essere utilizzato per modellare la stratigrafia come un Grafico Aciclico Diretto e per guidare il processo interattivo e integrare i risultati con le procedure stabilite (Costa, 2019), ma nonostante i vantaggi riportati non dà la possibilità di importare dati generati da altri *software*.

Stratify invece consente di importare file CVS, dBase (DBF) e Paradox (DB) e quindi, la sua interoperabilità agevola le operazioni di costruzione della matrice.

Operativamente nella fase preliminare alla modellazione è stato redatto uno schema delle sole u.s. e non delle sotto-u.s: questo si presentava come diagramma di sintesi che combinava l'uso delle datazioni relative e assolute con annotazioni su materiali e tecniche costruttive.

Dopo aver completato la fase di arricchimento dati, integrando opportunamente le informazioni provenienti dal diagramma preliminare, sono stati creati automaticamente, in ambiente Revit, gli abachi delle murature utili per lo sviluppo delle matrici stratigrafiche e per comprendere i collegamenti esistenti tra le fasi diacroniche. I dati degli abachi sono stati importati in Excel e conseguentemente salvati in CVS per garantirne l'interoperabilità con Stratify.

Il *software* consente di lavorare su ciascuna u.s. definendone non solo le relazioni di anteriorità, posteriorità e contemporaneità, ma anche la tipologia (materiale), la collocazione temporale e dando la possibilità di riportare una descrizione (consistenza u.s.) (Figura 38, Figura 39 e Figura 40).

Figura 38. *Stratify*, pannello di gestione dei dati relativi alla singola unità stratigrafica: implementazione delle informazioni sul materiale, sulla consistenza e sulla fase.

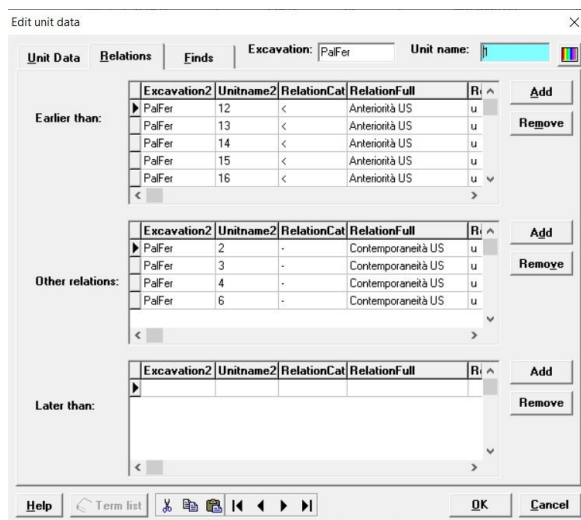


Figura 39. Stratify, pannello di gestione dei dati relativi alla singola unità stratigrafica: implementazione delle relazioni di anteriorità, contemporaneità e posteriorità.

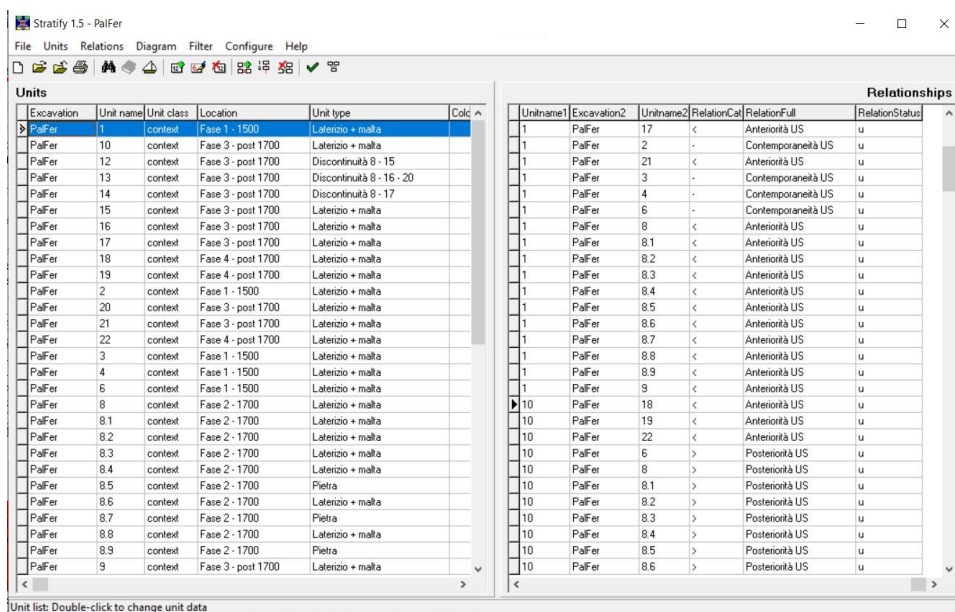


Figura 40. Stratify, costruzione della Matrice: per ciascuna u.s. sono elencati l'I.D. univoco coerente con il data enrichment, le fasi di creazione e il materiale.

Man mano che vengono inseriti i dati il *software* dà la possibilità di controllare la presenza di relazioni ridondanti o assenti e al termine è possibile visualizzare nella sua forma finale il diagramma completo con le relazioni esplicitate (Figura 41).

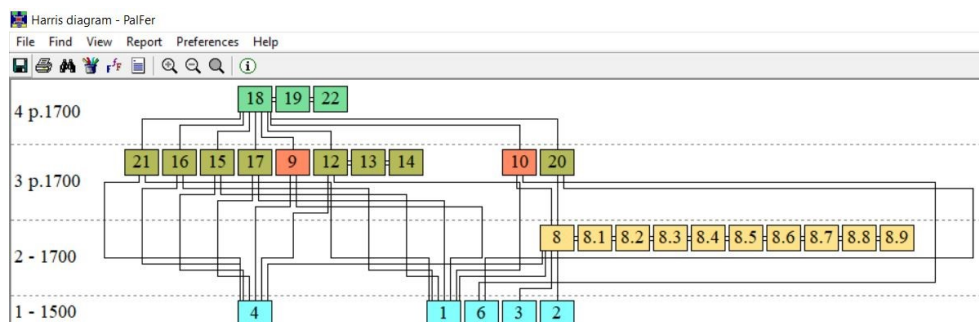


Figura 41. *Stratify*, visualizzazione del diagramma di Harris. Le singole u.s., campite con gli stessi colori individuati dall'analisi stratigrafica, sono poste orizzontalmente al livello di tutte le altre u.s. a loro coeve. Le connessioni corrispondono alle relazioni di anteriorità o posteriorità.

## Risultati

L'indagine metodologica condotta con questo caso studio ha prodotto un ulteriore passaggio nella filiera scientifica che già da tempo vede la disciplina del restauro mutuare dall'archeologia l'analisi stratigrafica e può ora contare sui benefici dell'*Heritage Building Information Modeling* per il controllo cosciente dei dati – geometrici, dimensionali, materici, costruttivi, tecnologici e, non ultimo, di relazione tra le parti nel tempo. La permanenza della materia con le sue tracce stratificate ed i significati ad essa connessi, consente, insieme ad altri documenti ed alle testimonianze scritte, di ricostruire la storia del manufatto e le diverse fasi della sua vita.

Il progetto di conservazione assume la configurazione materiale del palinsesto pluristratificato come fonte primaria e diretta di indagine scientifica e di conoscenza. La conservazione del costruito storico, monumentale e non, come fonte documentaria diretta e testimonianza autentica del passato, permette di non perdere la memoria a cui è legata la nostra identità ed è dunque la prima e più importante azione conservativa.

La suddivisione semantica e la tassonomia del modello hanno consentito di incorporare conoscenze sulle sequenze temporali e sugli aspetti costruttivi del manufatto e gli input documentari, le tracce dei materiali e i dati dei rilievi implementati nel modello hanno permesso una descrizione diacronica del Palazzo e delle fasi della sua costruzione.

La metodologia adottata ha mostrato come le procedure impiegate consentano di rappresentare gli elementi caratteristici dell'analisi stratigrafica dell'architettura e di gestire le relazioni esistenti tra queste: anteriorità, posteriorità, contemporaneità graficizzandole efficacemente attraverso la Matrice di Harris.

L'identificazione delle diverse sequenze cronologiche dell'edificio consente di monitorare l'avanzamento del processo di trasformazione e degrado dei materiali e valutare gli elementi di rischio e di vulnerabilità.

A livello metodologico i risultati ottenuti si configurano, inoltre, come un valido punto di partenza per la successiva analisi dello stato attuale di conservazione dell'edificio e per effettuare future indagini strutturali e mappature del degrado, base necessaria per interventi di salvaguardia e di manutenzione programmata.



## 2.2.4 Un modello come base per l'istruzione di una rete neurale artificiale: il Palazzo Ducale di Urbino

### Research questions

Il lavoro di ricerca condotto su questo caso studio presenta un'intensa collaborazione tra competenze proprie del settore scientifico del rilievo e rappresentazione dell'architettura e dell'informatica e automazione. Lo stato dell'arte riportato è relativo sia allo sviluppo e al contributo inerente l'ambito del disegno, sia alla sezione sviluppata dai ricercatori del dipartimento di Ingegneria dell'Informazione che hanno partecipato attivamente nella fase relativa alla progettazione dell'architettura Dynamic Graph Convolutional Neural Networks DGCNN e di una sua nuova versione modificata (RadDGCNN). Si ritiene, infatti, che riportare un quadro di riferimento complessivo risulti utile ai fini di una più esaustiva comprensione del caso studio e di come il contributo degli esperti di dominio AH sia imprescindibile in approfondimenti di questa natura.

La combinazione degli approcci dei due settori disciplinari coinvolti ha consentito il raggiungimento degli obiettivi prefissati e ne ha validato i risultati in un campo, quello del DCH, in cui si stanno sperimentando sempre più cooperazioni nell'affrontare il tema dell'automatizzazione del flusso di lavoro per la creazione di modelli HBIM.

Lo stato dell'arte attuale vede un *workflow* che parte dall'acquisizione di dati grezzi, tipicamente sotto forma di nuvole di punti, passa per il loro trattamento e termina con la creazione di un modello 3D dettagliato, informato e annotato semanticamente in cui vengono contrassegnati esplicitamente i tipi di elementi architettonici e le loro caratteristiche. Di norma le ultime fasi sono effettuate manualmente da specialisti di dominio e pertanto con questo caso studio si sono testate le tecniche di *Deep Learning* per eseguire la classificazione automatica e la segmentazione semantica delle nuvole di punti 3D nell'AH. Ottenere un numero sufficiente di dati annotati manualmente, al fine di dare forma correttamente a un modello di Artificial Neural Network (ANN, rete neurale artificiale) e progettare un prototipo di apprendimento profondo che sia in



grado di riconoscere e segmentare automaticamente gli elementi architettonici di interesse, hanno richiesto alcune attività preliminari. Queste, svolte da esperti competenti di AH, sono: la modellazione di una tassonomia per definire i tipi di elementi architettonici da esaminare e la creazione di un set di dati HBIM per addestrare e testare il modello ANN, secondo due direzioni. La prima è la definizione di una metodologia per annotare manualmente le nuvole di punti 3D, applicandola ad un certo numero di *point cloud* esistenti, la seconda è sviluppare un'applicazione per ricavare rappresentazioni di nuvole di punti da modelli parametrici 3D esistenti. Tale set di dati sintetici aumenta la quantità di dati che possono sostenere i modelli di ANN per addestrarli correttamente.

Le *point cloud* sono configurazioni geometriche di natura irregolare, caratterizzate dalla mancanza di una griglia non ordinata e invariante alla trasformazione e alla sostituzione e perciò la segmentazione risulta assai difficoltosa. I modelli di *deep learning* richiedono una quantità considerevole di dati annotati per essere addestrati e la creazione di *dataset* di nuvole di punti annotate mediante interpretazione manuale è molto onerosa in termini di tempo.

In genere i *software* di modellazione permettono, infatti, di effettuare una segmentazione manuale ponendo su livelli differenti alcune porzioni di oggetto. Questo tipo di segmentazione comporta un notevole impegno da parte dell'operatore soprattutto quanto più il modello si presenta denso di informazioni e complesso nelle forme. Con questo caso studio si è indagata la possibilità di sfruttare i dati sintetici delle nuvole di punti per addestrare modelli di *deep learning* al fine di eseguire la segmentazione semantica di nuvole di punti TLS reali.

Le nuvole di punti sintetiche annotate sono state ottenute da modelli 3D esistenti per ricavare una grande quantità di dati da cui apprendere, senza la necessità di annotazioni manuali.

Il flusso di lavoro seguito ha condotto ad una valutazione dell'uso di dati sintetici per guidare la segmentazione semantica basata sul *deep learning* nel contesto degli edifici storici. I passi metodologici seguiti hanno consentito di:

- fornire un primo studio valutativo dell'uso di dati sintetici di nuvole di punti nel contesto della segmentazione semantica del patrimonio costruito, valutando modelli DGCNN addestrati su dati TLS reali;
- pubblicare un *dataset* composto da nuvole di punti sintetiche annotate derivate da modelli di 10 diversi edifici storici e da 159 modelli di singoli elementi architettonici raccolti da archivi web aperti;
- proporre una variazione dell'architettura DGCNN presentata in (Wang et al., 2019b), basata sull'uso della *radius distance*, che ha dimostrato di aumentare le prestazioni sui *dataset* testati.

## **La modellazione e la classificazione semantica**

### *La modellazione*

La massiva digitalizzazione tridimensionale del Palazzo Ducale di Urbino è stata possibile grazie al Progetto Strategico di Ateneo CIVITAS<sup>20</sup> (Nespeca, 2018) (Clini *et al.*, 2020). Uno degli intenti del progetto era quello di condurre una campagna di rilievo completa a diverse scale, basata principalmente su TLS e acquisizione di dati fotografici. Le operazioni di rilievo hanno portato ad un modello digitale complessivo del Palazzo composto da 1.790 mln di punti (Figura 42) (Tabella 4).

---

<sup>20</sup> CIVITAS, acronimo per Chain for excellence of reflective society to exploit digital cultural heritage and museums, è un progetto di ricerca strategica dell'Università Politecnica delle Marche che ha visto il coinvolgimento di numerosi ricercatori afferenti a diversi Dipartimenti dell'Ateneo. Le esigenze di un significativo progresso nelle metodologie progettuali e nelle architetture di riferimento in materia di rilievo, elaborazione, gestione e comunicazione dei beni architettonici e del patrimonio culturale sono alla base degli obiettivi del progetto. Il progetto CIVITAS si compone di cinque *challenges* connesse tra loro che testano nuove metodologie e sono caratterizzate da forte interdisciplinarietà: digitalizzazione dei Beni Culturali a diverse scale (CH1), gestione dei contenuti digitali per modelli semantici 3D/4D (CH2), miglioramento dell'esperienza dei visitatori e dell'inclusione sociale (CH3), fruizione attraverso paradigmi di interazione multisensoriale: visivo, tattile, sonoro (CH4), modelli di business basati sul patrimonio digitale per la cultura, la ricerca, il turismo, la promozione della società riflessiva (CH5).

PALAZZO DUCALE: complessivo	
tot numero di punti	1.790.982.771
errore allineamento max	0,006 m
errore allineamento min	0,001 m
RMS	0,005 m
PALAZZO DUCALE: porzione usata per nuvola annotata	
tot numero di punti	1224 milioni
errore allineamento max	0,008 m
errore allineamento min	0,003 m
RMS	0,004 m

Tabella 4. *Punti acquisiti durante la campagna di rilievo. I primi dati fanno riferimento alla complessità del Palazzo Ducale, i secondi alla sola porzione relativa al Cortile d'Onore del Laurana.*

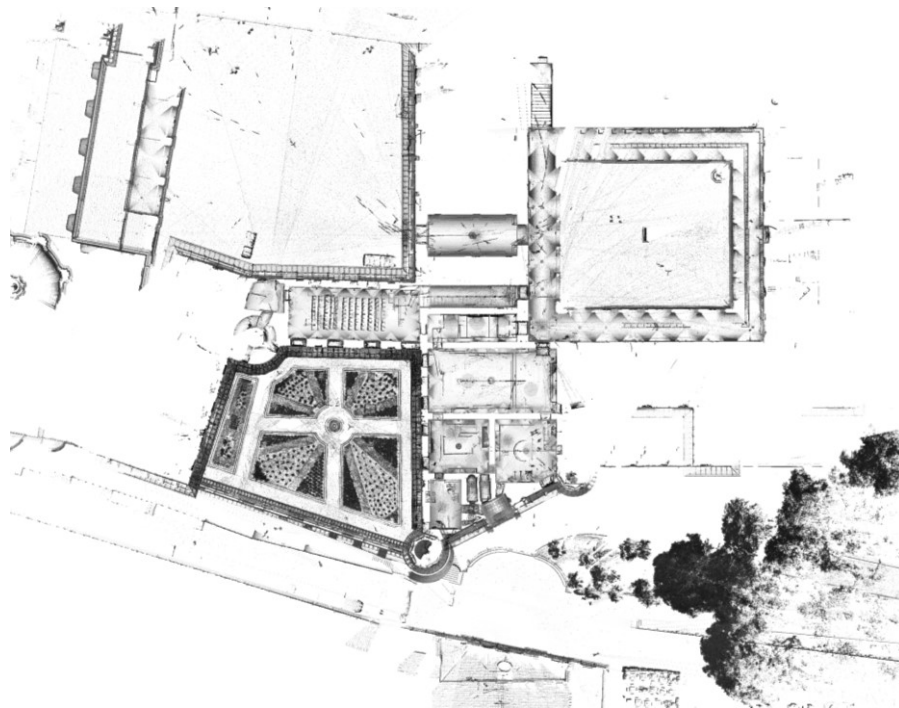


Figura 42. *Cyclone, vista della point cloud del Palazzo Ducale di Urbino.*

Gli spazi del Palazzo Ducale sono stati rilevati con l'integrazione di tre strumenti laser scanner diversi scelti a seconda delle caratteristiche delle porzioni: Leica Backpack e Leica ScanStation C10 e Leica ScanStation P40.

Trattandosi di un'architettura articolata e di grandi dimensioni, per ottimizzare i tempi di scansione l'acquisizione è stata eseguita impostando diversi livelli di risoluzione in base alla complessità degli ambienti e dei loro elementi decorativi.

Essendo la mole di dati elevata e trattandosi di un primo approccio alle sperimentazioni in termini di riconoscimento automatico, il test ha riguardato una sola parte della *point cloud* complessiva, quella relativa al Cortile d'Onore del Laurana (Figura 43 e Figura 44). Nel campo dei modelli BIM per il costruito, la conoscenza dell'architettura storica in modelli affidabili e accurati è, infatti, garantita sfruttando le piattaforme esistenti e le loro potenzialità in intelligenza semantica e informazioni parametriche.

Un concetto comune e convalidato è quello di estrarre la conoscenza dell'architettura classica da trattati così come da indagini accurate e, quindi, sviluppare modelli parametrici a diversi livelli (Bianchini *et al.*, 2016).



Figura 43. Cyclone, vista della *point cloud* del Palazzo Ducale di Urbino: il Cortile d'Onore del Laurana.



Figura 44. *Cyclone*, vista della point cloud del Palazzo Ducale di Urbino: il Cortile d'Onore del Laurana.

Il Palazzo Ducale è ricco di elementi architettonici unici, dai dittici, ai giardini pensili, ai soffitti a volta e ai celeberrimi torricini della facciata sud ovest.

La scansione ritmica e la modularità dello spazio progettato dal Laurana nel Cortile comprendono tutti gli elementi architettonici in grado di sintetizzare l'intero Palazzo.

L'approccio HBIM nel Palazzo Ducale ha riguardato la modellazione della complessità del Cortile e del sistema voltato del Piano Nobile mediante strumenti di *editing*, famiglie caricabili o locali, e modelli adattativi generici e masse concettuali.

I paradigmi e la grammatica compositiva del Cortile sono stati modellati partendo dall'integrazione dei dati di rilievo con la letteratura classica e con riferimenti più recenti (Aubin, 2013) (Bianconi, Filippucci and Meconi, 2018), ottenendo pertanto anche un riferimento per affrontare il tema dei diversi LOD.

Per quanto riguarda il Cortile d'Onore, lo spazio è scandito dall'ordine corinzio delle colonne e dalla rigorosa simmetria e alternanza tra pieni e vuoti che conferiscono armonia all'insieme architettonico.

Le colonne sono state modellate secondo gli elementi semantici costitutivi, base, fusto e capitello e secondo tre diversi LOD: *low*, *medium*, *high* (Figura 45).



Figura 45. Colonna corinzia nei tre LOD di rappresentazione: *low, medium e high*

Tutte le modanature, comprese quelle delle cornici di porte e finestre, sono state parametrizzate e realizzate come estrusioni su percorso di profili geometrici.

Gli orizzontamenti dei quattro lati del Cortile sono volte a crociera: modellate seguendo operazioni di estrusione e sottrazione di vuoti a solidi.

Il sistema voltato del Palazzo è composto da diverse tipologie: volte a crociera, soprattutto presenti nel Cortile e illustrate poc' anzi, volte a schifo, volte a botte su pianta rettangolare e impostate su piani inclinati, volte a padiglione semplice e volte a padiglione lunettate, massicciamente presenti nel Piano Nobile del Palazzo (Figura 46). Si ritiene utile accennare in breve quelli che sono stati i passaggi di realizzazione dei modelli adattativi generici e delle masse concettuali delle due ultime tipologie. Per quanto concerne le volte a botte su piani inclinati, in una prima fase è stato collocato un punto adattivo nello spazio e selezionato un piano di riferimento necessario come *host* per i successivi punti che in seguito sono stati collegati al piano.

Le volte sono principalmente composte da laterizi e intonaco in intradosso, quindi per la volta a botte parametrica si sono uniti due profili dello spessore dei materiali componenti.

Un esempio delle volte a botte su pianta rettangolare e piano inclinato è rappresentato dallo Scalone d'Onore che connette verticalmente il piano terra, dove è collocato il Cortile, e il piano Nobile.

Per quanto riguarda invece la realizzazione delle volte a padiglione lunettate si è proceduto partendo dalla volta a botte precedentemente modellata, questa infatti è stata ridotta a lunetta tagliandone la geometria solida con un vuoto. Anche la modellazione del vuoto è passata per la creazione di un profilo in ambiente modelli adattativi generici (Figura 47).

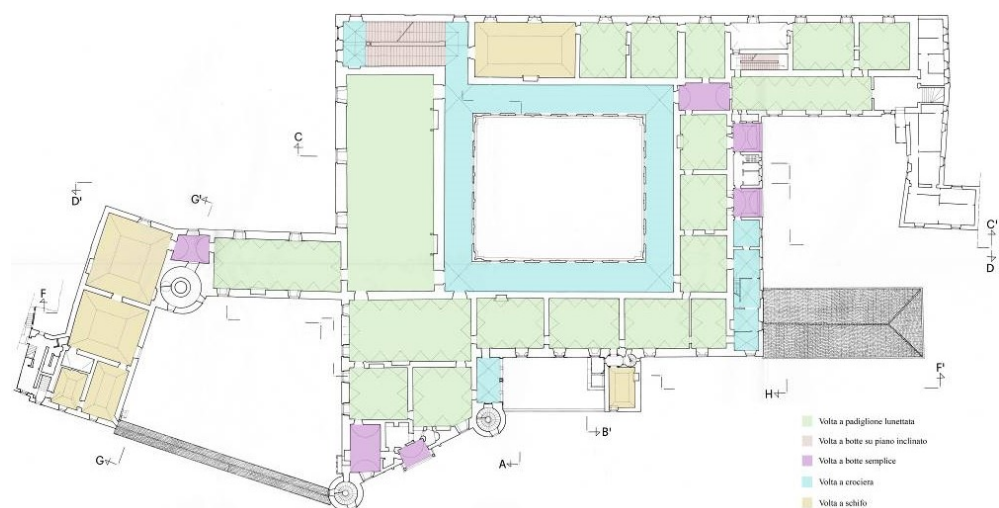


Figura 46. Pianta del Piano Nobile del Palazzo Ducale con l'individuazione delle tipologie di volte.

Per quanto concerne le configurazioni verticali, il Cortile è caratterizzato dall'ordine corinzio che, nella fase della suddivisione e individuazione delle classi di elementi non è stato considerato nelle sue parti costituenti principali (base, fusto e capitello), ma nel suo insieme. Facendo riferimento al paragrafo precedente, infatti, si può verificare che l'Ordine è stato incluso nella classe "colonne".



Per quanto concerne invece le bucatore e le loro cornici modanate, queste sono state assegnate rispettivamente alle classi semantiche “porte e finestre” e “modanature”. Le famiglie “colonna”, “finestra” e “pilastri” sono di tipo caricabili e gli oggetti sono stati modellati impostando vincoli geometrici in grado di sviluppare una parametrizzazione. Per gli angoli del Cortile, ben noti in storiografia e letteratura per la soluzione architettonica adottata dal Laurana, sono state create invece delle famiglie locali.

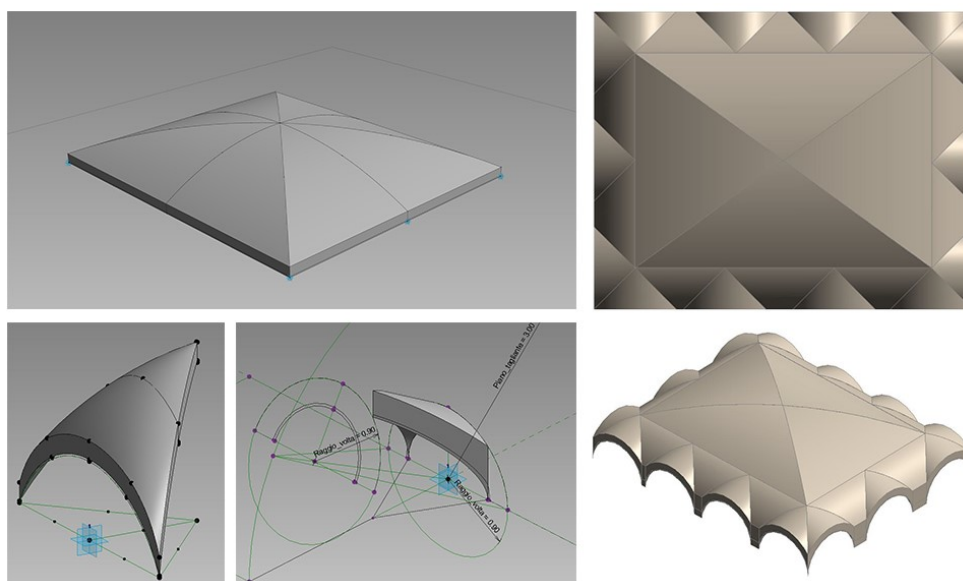


Figura 47. Modellazione della volta a padiglione lunettata in ambiente di lavoro Revit. A sinistra modellazione del padiglione e delle lunette e a destra la volta "unita", vista in pianta e in prospettiva.

#### *La classificazione semantica*

L’identificazione delle classi di elementi architettonici da tenere in considerazione per la segmentazione semantica è un fondamentale e imperativo passo metodologico.

La classificazione è l’operazione che prevede la divisione o distribuzione in categorie omogenee e viene impiegata per varie attività che si possono ricondurre alla gestione delle conoscenze. A questo riguardo è utile riportare che la segmentazione è il processo



di raggruppamento delle nuvole di punti in più regioni omogenee con proprietà simili, mentre la classificazione è il passo che le contrassegna.

Le classi scelte per la sperimentazione sono: colonna, finestra/porta, muro, pilastro, pavimento, modanatura, volta, altro (Figura 48). Le classi e il loro livello di dettaglio (LOD) sono stati scelti tenendo conto di tre aspetti: coerenza con il dizionario esistente, coerenza con il periodo storico e il suo linguaggio e corrispondenza con i dati acquisiti tramite TLS.

Per quanto riguarda il livello di dettaglio scelto, si è fatto riferimento alle suddivisioni ontologiche proposte dai vocabolari, disponibili in rete, relativi a arte e architettura. Per questo lavoro il riferimento principale è il vocabolario degli elementi architettonici classici e delle loro gerarchie sviluppate dal *Getty Museum – Research Institute* (cfr.1.3).

Il livello gerarchico della divisione in classi è stato stabilito tra elementi strutturali e componenti decorativi. Il LOD scelto consente di avere, infatti, una piena corrispondenza con quello che rappresenta il primo *step* del test condotto per questa ricerca. La raffinatezza della nuvola di punti che ci si aspettava, in accordo con la letteratura di riferimento se pur per altri ambiti applicativi, è concorde con il LOD generale degli elementi architettonici.

Le classi scelte, inoltre, sono coerenti con gli elementi caratterizzanti del linguaggio architettonico classico, massicciamente impiegato negli edifici rinascimentali presi come casi studio di riferimento. Per alcune classi semantiche è stato necessario implementare il *dataset* disponibile con alcuni modelli 3D disponibili in rete.

Le classi architettoniche presentano conformità ai dati acquisti tramite TLS. In relazione a questa metodologia di rilievo e per mantenere la più alta uniformità ai dati, infatti, non si è tenuto conto di alcune classi, come ad esempio tetto, seppur presenti nei vocabolari e nel linguaggio storico architettonico. Come nel caso di qualsiasi architettura storica di grande valore e complessità, nonostante l'estensione delle classi, alcuni elementi non sono stati inclusi in nessuna di queste.

Tutti gli elementi architettonici che non corrispondevano a nessuna delle classi selezionate sono stati raggruppati nella classe “altro”.



Figura 48. Identificazione delle classi di elementi per il cortile d'Onore del Palazzo Ducale di Urbino, edificio principale su cui si è impostato il lavoro di preparazione del setup sperimentale.

## **Il dataset sintetico, il modello di rete neurale e il setup sperimentale**

### *Il dataset sintetico*

Il *dataset* predisposto per addestrare il modello neurale è costituito da due gruppi di nuvole di punti derivate da modelli 3D esistenti: modelli Scan-to-BIM e archivi online. Il primo include le *point cloud* ottenute da modelli di edifici storici reali secondo il processo di modellazione Scan-to-BIM. Questa parte, unitamente all'identificazione delle classi di elementi di cui al paragrafo precedente, operativamente è stata indagata da esperti con background del campo del disegno e rappresentazione e rappresenta una sezione fondamentale di questo lavoro di tesi.

Il secondo gruppo di nuvole comprende, invece, quelle derivate da una collezione di oggetti 3D di singoli elementi architettonici, raccolti da *repository* online aperti.

Sia per le nuvole di punti dei modelli reality-based sia per quelle dei database, per trasformare i modelli 3D in nuvole di punti, si è utilizzato il *software open source* CloudCompare. In questo ambiente di lavoro sono state effettuate delle preelaborazioni necessarie: il calcolo delle normali e l'operazione di *subsampling*.

La prima operazione permette di rendere le varie scene del *dataset* il più possibile simili tra loro, le normali sono state calcolate ed orientate con diverse impostazioni a seconda del modello di superficie e dell'acquisizione dati 3D.

La seconda operazione di pre processamento ha consentito di ridurre la quantità di dati geometrici, ma non la qualità, intrinseca alle nuvole. Nello specifico CloudCompare può sotto campionare in tre modi diversi: *random*, per distanza tra i punti e con metodo *octree*. Le nuvole di punti oggetto del caso studio sono state sottoposte a processo di *subsampling random* considerando con una densità di 1000 punti per m<sup>2</sup>: in questo modo si è garantito un alto livello di dettaglio, ma allo stesso tempo si è ridotto notevolmente il numero di punti e la dimensione del file oltre a regolarizzare la struttura geometrica della *point cloud*.

Lo stesso livello di sotto campionamento è stato applicato alle nuvole di punti TLS utilizzate per testare le reti neurali.

Per quanto riguarda il gruppo di modelli di architetture storiche si ritiene utile riportare alcune informazioni relative all'acquisizione laser scanner e fotografica l'edificio principale su cui si è impostato il lavoro di preparazione del *setup* sperimentale: il Palazzo Ducale di Urbino<sup>21</sup>.

Su questo caso studio sono state condotte le operazioni preliminari di cui si è già accennato in precedenza: la modellazione di una tassonomia per definire i tipi di

---

<sup>21</sup> Il Palazzo Ducale di Urbino, sede della Galleria nazionale delle Marche, è uno dei più interessanti esempi architettonici e artistici dell'intero Rinascimento italiano. Descritto da Baldassarre Castiglione come "città in forma di palazzo": "Federico edificò un palazzo, secondo la opinione di molti, il più bello che in tutta Italia si ritrovi; e d'ogni opportuna cosa si ben lo fornì, che non un palazzo, ma una città in forma di palazzo esser pareva", (Il Cortegiano, I, 2).

elementi architettonici e la creazione di un set di dati per addestrare e testare il modello di rete neurale artificiale.

Come verrà chiarito più dettagliatamente in questo paragrafo, infatti, la nuvola di punti usata come base per il processo Scan-to-BIM e annotata manualmente è stata accostata a quella ricavata dal modello parametrico 3D stesso. Il modello della porzione di edificio in analisi è stato ottenuto seguendo la metodologia validata Scan-to-BIM e illustrata in precedenza (cfr.2.1)

Il modello HBIM del Cortile, elaborato da esperti di dominio, costituisce quindi un primo nucleo essenziale del *dataset* sintetico necessario per la fase della ricerca che verrà illustrata nel paragrafo relativo al dataset sintetico e al setup sperimentale (Figura 49).

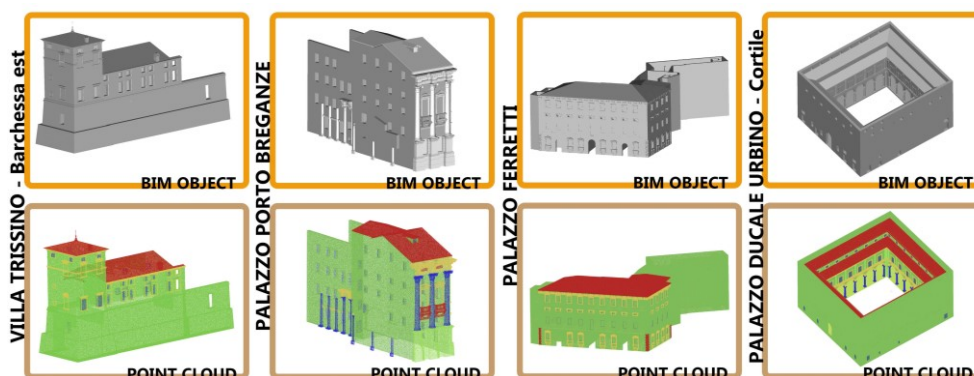


Figura 49. Esempi di modelli 3D di architetture storiche e relative nuvole di punti annotate.

Considerando la necessità di ampliare il dataset semanticamente strutturato, oltre a Palazzo Ducale di Urbino è stata impiegata anche una porzione di Palazzo Ferretti di Ancona (cfr.2.2.3), nello specifico la parte relativa al nucleo cinquecentesco e sono stati sfruttati, inoltre, i modelli provenienti dalla Palladio Library<sup>22</sup> (Apollonio *et al.*, 2013) (Gaiani *et al.*, 2015).

<sup>22</sup> La Palladio Library è un lavoro di ricerca di rilievo e documentazione digitale delle ville e dei ponti di Andrea Palladio nell'ambito del progetto finanziato da Arcus/CISA Andrea Palladio, per la

Il gruppo di modelli sviluppati per la Biblioteca Palladiana comprendeva 13 modelli, in particolare due ponti e varie ville e/o barchesse. Poiché presentavano classi coerenti con quelle delle nuvole di punti che dovevano essere segmentate, per coadiuvare il lavoro di ricerca di questa tesi sono state prese in considerazione solo le ville.

Una peculiarità di questi modelli è la grammatica della forma impiegata nella loro costruzione: è stato utilizzato, infatti, un insieme prefissato di regole formali strutturate gerarchicamente che indicano una finalità e una struttura chiara.

I modelli della Palladio Library sono stati archiviati in formato file 3DM incorporando una tassonomia grazie alla denominazione dei *layer* e consentendo poi l'esportazione in formato OBJ e la successiva creazione di nuvole di punti sintetiche strutturate semanticamente.

Mentre alcune classi, come muro, solaio e finestra, sono ampiamente presenti nei modelli 3D sopra descritti, lo stesso non vale per altre classi di elementi architettonici. Ad esempio, non tutti gli edifici hanno colonne o volte e, quando questi elementi sono presenti, sono solitamente molto simili all'interno dello stesso edificio.

Al contrario, per apprendere caratteristiche generalizzabili, è necessario migliorare la variabilità della forma all'interno della stessa classe.

Nel tentativo di affrontare tali problemi, il *dataset* sintetico con modelli 3D di singoli elementi architettonici è stato esteso selezionando oggetti 3D disponibili pubblicamente da una serie di *repository* online<sup>23</sup>.

Nella Tabella 5 sono riportate, per ogni classe, il numero di modelli 3D raccolti, che possono includere uno o più elementi architettonici, e il numero totale di punti ottenuti trasformando tali modelli in nuvole di punti.

---

realizzazione del progetto "Biblioteca Palladio - mediateca e sistema di comunicazione e informazione su Andrea Palladio, le sue opere e il suo territorio", responsabile scientifico dell'Unità UNIVPM: Paolo Clini, responsabile scientifico dell'intero progetto: Marco Gaiani.

<sup>23</sup> Gli archivi online consultati e da cui sono stati tratti i modelli impiegati per l'approfondimento sono: <https://free3d.com>; <https://3dwarehouse.sketchup.com>; <http://www.3dcadbrowser.com>; <https://www.turbosquid.com>; <https://archive3d.net>; <http://www.cgtrader.com>;

Classe	Modelli 3d	Punti
Colonne	53	448.297
Finestre/porte	41	1.041.552
Modanature	31	442.809
Pilastrini	24	558.380
Volte	10	3.743.896

Tabella 5. Panoramica degli oggetti 3D raccolti dai repository online.

Come mostrato in Figura 50 i tipi di oggetti sono stati scelti come un affinamento delle classi che mancano, dando priorità a modelli di complessità e qualità paragonabili a quelli modellati da esperti di rilievo e disegno.

Grazie a tutti i modelli elaborati (Palazzo Ducale, Palazzo Ferretti, Libreria Palladiana) e provenienti da archivi online, è stato possibile ottenere quindi una base del *dataset* sintetico sufficientemente robusta da istanziare il flusso di lavoro successivo relativo al training della rete.

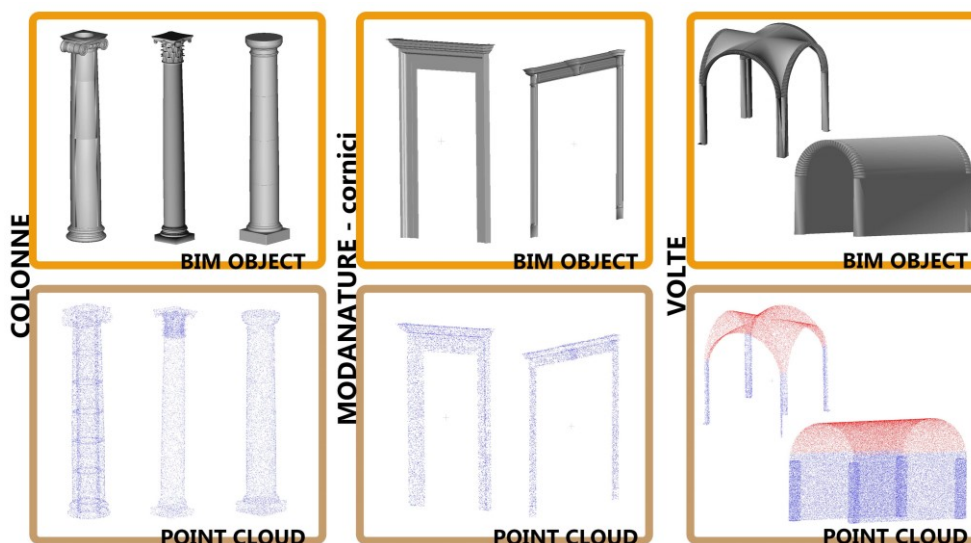


Figura 50. Esempi di modelli 3D di singoli classi di elementi architettonici e nuvola di punti sintetica corrispondente

### *Il modello di rete neurale e il setup sperimentale*

In questa sezione è illustrata la fase di lavoro metodologico seguita primariamente dagli esperti informatici. Nel dettaglio il paragrafo è articolato secondo due punti principali: la costruzione dell'architettura del modello di rete neurale e la costruzione di un *setup* sperimentale. Come chiarito nel paragrafo dello stato dell'arte, nell'ambito del CH il modello di rete DGNN, usato per questo caso studio, è stato impiegato in alcuni lavori recenti (Pierdicca *et al.*, 2020) per segmentare semanticamente le nuvole di punti 3D.

Il vantaggio ottenuto da questo tipo di sperimentazione è senza dubbio quello di garantire una migliore gestione degli elementi del CH caratterizzati da geometrie complesse, strutture estremamente variabili e con un alto livello di dettaglio.

Per la rete neurale artificiale testata su Palazzo Ducale oltre che il modello DGCNN, di seguito illustrato, è stata sperimentata anche una sua nuova versione modificata (RadDGCNN) e successivamente sono stati combinati i due approcci per aumentare ulteriormente le prestazioni.

Il modello DGCNN si basa sull'operazione EdgeConv che apprende le caratteristiche nascoste di un punto in base ai suoi intorni. Nonostante il suo nome, l'EdgeConv è implementato con un *Multilayer Perceptron* (MLP) alimentato con *edge features* e da una successiva operazione di *max-pooling* sulle caratteristiche apprese.

Nel caso delle *point cloud* i bordi di un punto sono caratterizzati dal vettore tridimensionale che ne rappresenta le coordinate e dai vettori distanza tra il punto e i suoi *neighbors*. L'operazione EdgeConv viene inizialmente eseguita sulla nuvola di punti di input e poi sull'output del livello EdgeConv precedente, apprendendo così le caratteristiche nascoste locali gerarchiche per ogni punto.

Le funzionalità nascoste di output di tutti i punti appresi dai livelli EdgeConv vengono concatenate e inviate a una rete MLP per apprendere le funzionalità globali della nuvola di punti.

L'architettura di rete utilizzata per le sperimentazioni è strutturata come segue (Figura 51): N rappresenta il numero di punti per ogni *point cloud* di input, P è il numero di

classi considerate per la classificazione e  $K$  è il numero di punti di intorno considerati per ogni punto stesso. Per apprendere le caratteristiche di ogni punto sono state utilizzate le stesse impostazioni, dimensioni di MLP e numero di livelli, utilizzati in (Wang *et al.*, 2019).

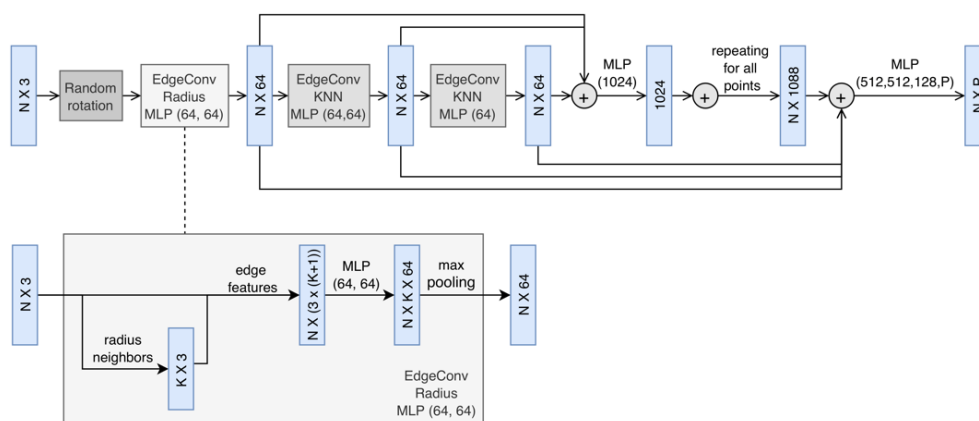


Figura 51. Architettura della rete neurale profonda adottata in fase sperimentale<sup>24</sup>.

Le funzionalità apprese da ciascuno dei tre livelli di EndgeConv sono state connesse, mentre le funzionalità globali sono state apprese con un MLP a tre livelli. Poiché definire la vicinanza di un punto è una scelta importante da prendere nell'attuazione di un'architettura DGCNN si è ritenuto opportuno condurre una riflessione sui K-Nearest Neighbors (KNN) e valutarne l'applicabilità al caso studio in oggetto. Nel caso dei KNN l'estensione spaziale degli intorni considerati per due punti può essere molto diversa a seconda della densità locale della *point cloud*. Questo a sua volta potrebbe portare a caratteristiche di bordo diverse per due punti che appartengono alla stessa classe (ad esempio la classe di elementi: finestra).

<sup>24</sup> La figura è tratta dalla pubblicazione: Morbidoni, C., Pierdicca, R., Paolanti, M., Quattrini, R. & Mammoli, R. (2020). Learning from Synthetic Point Cloud Data for Historical Buildings Semantic Segmentation. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 13 (4).



Considerando che l'acquisizione laser produce generalmente nuvole di punti non uniformi il KNN non si configura quindi, come il metodo più indicato quando si tratta di nuvole di punti non uniformemente dense.

In virtù di tale valutazione si è testata una variazione dell'architettura DGCNN, la RadDGCNN, nella quale la distanza del raggio viene utilizzata nella prima operazione EdgeConv al posto del KNN.

Per ogni punto sono stati selezionati prima tutti i punti entro la distanza raggio R dal punto stesso, poi sono stati campionati casualmente K di questi punti e infine assegnati come input all'MLP per estrarre le caratteristiche del bordo. Tale operazione di campionamento ha consentito di fornire sempre lo stesso numero di punti vicini, e quindi lo stesso numero di caratteristiche, come input per il MLP.

I modelli di rete neurale DGCNN e RadDGCNN sono stati addestrati suddividendo ciascuna nuvola di punti in blocchi di dimensioni uguali (2m x 2m x 2m) ciascuno contenente 4096 punti campionati casualmente.

La segmentazione della nuvola di punti è una fase di preelaborazione indispensabile poiché fornire le intere nuvole di punti come *input* sarebbe computazionalmente irrealizzabile. Il campionamento casuale dei punti per ogni blocco permette di ottenere *input* di uguali dimensioni, che è un requisito dell'architettura DGCNN.

Per questo test ogni punto è rappresentato da un vettore di sei dimensioni, dove i primi tre elementi sono le coordinate XYZ assolute del punto nella nuvola di punti originale, mentre gli altri tre valori rappresentano le coordinate normalizzate all'interno del blocco.

Per quanto riguarda l'approccio RadDGCNN, la distanza del raggio è stata calcolata sulle coordinate normalizzate e il valore di R è stato impostato sperimentalmente a 0,1 e il valore di K a 20.

Infine, prima di inserire un blocco nella rete, i punti sono stati ruotati casualmente attorno alla direzione verso l'alto in modo da incrementare il *dataset* tenendo conto del fatto che gli elementi architettonici possono avere un orientamento diverso.

Queste prove su DGCNN e RadDGCNN hanno coinvolto due esperimenti sulle architetture. Nel primo caso è stata usata la nuvola di punti TLS del cortile del Palazzo Ducale di Urbino per valutare i modelli addestrati, cercando di individuare 8 classi di elementi architettonici differenti.

Nel secondo sono stati valutati i modelli addestrati sulla nuvola di punti TLS di Palazzo Ferretti e poiché due delle classi di elementi architettonici selezionati (colonna e pilastro) non sono presenti nell'edificio, sono state individuate le restanti sei. Per esaminare uno scenario più realistico, dal set di training sono state eliminate le nuvole di punti sintetiche derivate dai modelli BIM sia del Palazzo Ducale di Urbino BIM sia di Palazzo Ferretti.

Infine, in entrambi gli esperimenti i due modelli sono stati combinati implementando un semplice sistema multi-classificatore: per ogni punto nelle nuvole TLS di test è stato calcolato il risultato di probabilità assegnato a ciascuna classe dal DGCNN e dal RadDGCNN.

## Risultati

I risultati ottenuti sulla scena del Cortile del Palazzo Ducale di Urbino utilizzando DGCNN, RadDGCNN e l'approccio combinato sono riportati in Tabella 6, mentre quelli relativi a Palazzo Ferretti nella Tabella 7. Per ogni classe si hanno precisione, *recall*, *F<sub>1</sub>score* e *Intersection over Union* (IoU)<sup>25</sup>. In entrambe le tabelle in grassetto sono indicati i risultati migliori, mentre in sottolineato i risultati più convenienti tra DGCNN e RadDGCNN.

---

<sup>25</sup> La precisione e il *recall* sono due classificazioni statistiche. La prima descrive in maniera effettiva la fedeltà dei risultati rispetto al *ground truth* (nuvola di punti annotata manualmente), mentre il *recall* descrive efficacemente la completezza delle previsioni rispetto al *ground truth*.

L'*F<sub>1</sub> score* è, nell'analisi statistica della classificazione binaria, una misura dell'accuratezza di un test di cui tiene in considerazione precisione e *recall*. L'*F<sub>1</sub> score* viene calcolato tramite la media armonica di precisione e *recall*.

L'*Intersection over Union* (IoU) è essenzialmente un metodo per quantificare la percentuale di sovrapposizione tra la *mask target* e l'output di previsione, misura infatti, il numero di punti comuni tra le prime e le seconde diviso per il numero totale di punti presenti in entrambe le maschere.

classes	DGCNN [36]				RadDGCNN				Combined			
	precision	recall	f1-score	IoU	precision	recall	f1-score	IoU	precision	recall	f1-score	IoU
Column	0.8493	0.8387	0.8440	0.7301	<b>0.9807</b>	0.8414	<b>0.9057</b>	<b>0.8277</b>	0.8647	<b>0.8958</b>	0.8800	0.7857
Window/Door	0.2530	0.4067	0.3119	0.1848	0.4950	<b>0.5864</b>	0.5368	0.3669	<b>0.5679</b>	0.5540	<b>0.5609</b>	<b>0.3897</b>
Wall	0.7458	0.7057	0.7252	0.5689	0.7650	0.8499	0.8052	0.6739	<b>0.7680</b>	<b>0.8590</b>	<b>0.8110</b>	<b>0.6821</b>
Pilaster	<b>0.2066</b>	<b>0.0120</b>	<b>0.0226</b>	<b>0.0114</b>	0.0626	0.0006	0.0012	0.0006	0.0762	0.0004	0.0007	0.0004
Floor	<b>0.9957</b>	0.7221	0.8371	0.7198	0.9107	0.9266	0.9186	0.8494	0.9305	<b>0.9414</b>	<b>0.9359</b>	<b>0.8795</b>
Moulding	0.5057	0.5870	0.5433	0.3730	0.7046	0.6266	0.6633	0.4962	<b>0.7173</b>	<b>0.6409</b>	<b>0.6770</b>	<b>0.5117</b>
Vault	0.7094	<b>0.9378</b>	0.8077	0.6775	<b>0.7820</b>	0.8684	0.8229	0.6991	0.7780	0.8948	<b>0.8323</b>	<b>0.7128</b>
Other	0.0092	0.0074	0.0082	0.0041	0.0273	<b>0.0264</b>	0.0268	0.0136	<b>0.0377</b>	0.0220	<b>0.0278</b>	<b>0.0141</b>
micro avg			0.6714				0.7619					0.7747
macro avg	0.5343	0.5272	0.5125	0.4087	0.5910	0.5908	0.5851	0.4909	<b>0.5925</b>	<b>0.6010</b>	<b>0.5907</b>	<b>0.4970</b>
weighted avg	0.6812	0.6714	0.6650		0.7322	0.7619	0.7436		<b>0.7363</b>	<b>0.7747</b>	<b>0.7518</b>	

Tabella 6. Risultati della segmentazione semantica di 8 classi ottenute sui dati TLS da Palazzo Ducale a Urbino.

classes	DGCNN [36]				RadDGCNN				Combined			
	precision	recall	f1-score	IoU	precision	recall	f1-score	IoU	precision	recall	f1-score	IoU
Window/Door	0.3443	<b>0.4992</b>	0.4075	0.2559	<b>0.4160</b>	0.4306	0.4232	0.2684	0.4135	0.4772	<b>0.4431</b>	<b>0.2846</b>
Wall	0.8032	0.7591	0.7805	0.6400	0.8276	0.7826	0.8045	<b>0.6729</b>	<b>0.8408</b>	<b>0.8304</b>	<b>0.8356</b>	<b>0.7175</b>
Floor	0.9833	<b>0.7344</b>	0.8408	0.7254	0.9913	0.7315	0.8418	0.7268	<b>0.9944</b>	0.7326	<b>0.8437</b>	<b>0.7296</b>
Moulding	<b>0.6016</b>	0.6829	<b>0.6397</b>	<b>0.4702</b>	0.4770	0.7063	0.5694	0.3980	0.5558	<b>0.7146</b>	0.6253	0.4548
Vault	<b>0.9282</b>	0.6348	0.7539	0.6050	0.9145	0.6215	0.7401	0.5874	0.9171	<b>0.6587</b>	<b>0.7667</b>	<b>0.6217</b>
Other	0.1845	<b>0.2807</b>	<b>0.2226</b>	<b>0.1253</b>	0.1273	0.1120	0.1192	0.0634	<b>0.2127</b>	0.1878	0.1995	0.1108
micro avg			0.6830				0.6834					0.7202
macro avg	0.6408	0.5985	0.6075	0.4703	0.6256	0.5641	0.5830	0.4528	<b>0.6557</b>	<b>0.6002</b>	<b>0.6190</b>	<b>0.4865</b>
weighted avg	0.7284	0.6830	0.6981		0.7197	0.6834	0.6919		<b>0.7444</b>	<b>0.7202</b>	<b>0.7259</b>	

Tabella 7. Risultati della segmentazione semantica di 6 classi ottenuti sui dati TLS di Palazzo Ferretti.

I risultati in termini qualitativi sono illustrati nella Figura 52, nella quale sono riportate porzioni delle nuvole di punti dei due edifici storici principali testati. Vengono mostrati i dati TLS originali, la nuvola di punti annotata manualmente (usata come *ground truth* nella valutazione) e l'output del modello RadDGCNN addestrato (predizione).

Oltre alle classi di elementi architettonici, come già specificato nella sezione dedicata, è stata prevista una classe denominata “Altro”. Questa include un'enorme varietà di elementi diversi (es. scale, bugnati e diversi elementi decorativi), che sono chiaramente difficili da classificare automaticamente e vengono spesso confusi con muri, modanature o finestre.



Figura 52. Visualizzazione dei risultati della segmentazione automatica di Palazzo Ducale (a) e Palazzo Ferretti (b).

Mentre per il Cortile del Palazzo Ducale di Urbino il RadDGCNN supera sensibilmente l'approccio basato su KNN, per Palazzo Ferretti i risultati complessivi sono comparabili.

La combinazione di reti basate su KNN e Radius fornisce invece, i migliori risultati complessivi, raggiungendo rispettivamente lo 0,77 e lo 0,72 di accuratezza complessiva nella segmentazione. Ciò suggerisce che le due funzioni adiacenti sono di fatto complementari e possono essere efficacemente utilizzate insieme per aumentare le prestazioni. In entrambi i casi, i pavimenti, i muri e le volte sono relativamente ben segmentati, con  $F_1score$  che vanno da 0,77 a 0,93 e IoU che vanno da 0,62 e 0,87. Anche le colonne, presenti solo nel Palazzo Ducale, vengono rilevate con precisione (0,88  $F_1score$  e 0,78 IoU).

Risultati leggermente peggiori si ottengono per la classe delle finestre/porte e modanature. Tale esito era in qualche modo prevedibile poiché entrambe le classi presentano un'elevata variabilità di forma e quindi sono più difficili da segmentare. Nella classe delle modanature sono incluse anche le cornici di finestre e porte, pertanto sono spesso confuse con le aperture stesse avendo generalmente le classi una forma

simile. Questo dato si evince anche esaminando le matrici di confusione<sup>26</sup>, mostrate in Figura 53. I risultati evidenziano anche come i pilastri siano molto difficili da rilevare, in quanto quasi indistinguibili dai muri, se non per la presenza del capitello, che quasi sempre è classificato come modanatura.

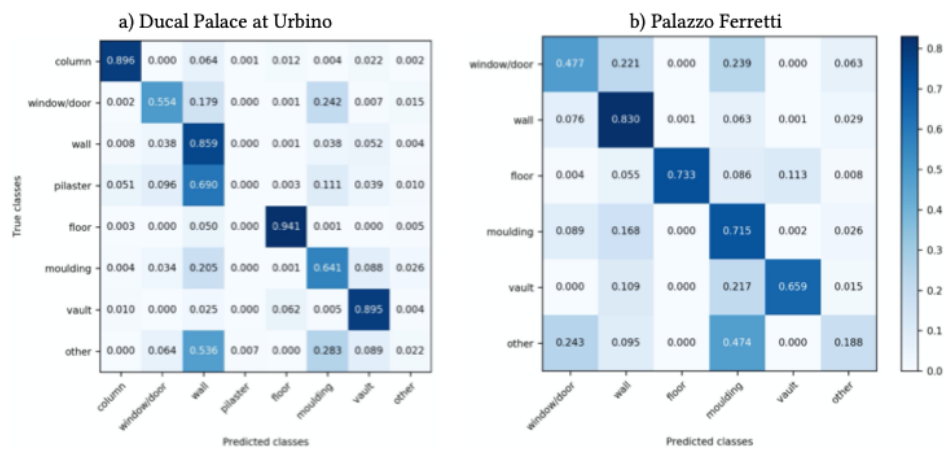


Figura 53. Matrici di confusione per Palazzo Ducale (a) e Palazzo Ferretti (b).

<sup>26</sup> La matrice di confusione restituisce una rappresentazione dell'accuratezza di classificazione statistica. Ogni colonna della matrice rappresenta i valori predetti, mentre ogni riga rappresenta i valori reali.

## Conclusioni

La trasformazione digitale nell'ambito dei beni culturali passa necessariamente per l'affermazione di paradigmi tecnologici: le diverse forme di gestione mostrate con il lavoro di ricerca sono parte di questi.

Il *Building Information Modeling*, impiegato per gestire modelli 3D, si configura come notevole risorsa in termini di ricerca e diffusione: le sue peculiarità hanno evidenziato, con i casi di studio di questo lavoro di tesi, come il suo potenziale sia enorme quando si fa riferimento al patrimonio costruito. L'applicazione della metodologia BIM nel campo dei Beni Culturali appare pertanto estremamente importante: una vera e propria trasformazione digitale, infatti, non può prescindere da una sua diffusione consapevole. Come avvalorato con i casi applicativi, le diverse forme di gestione proposte hanno validato un flusso di lavoro che ha condotto all'elaborazione di modelli dell'architettura storica spendibili per finalità diverse: valorizzazione, accessibilità, documentazione, datazione e istruzione di reti neurali.

I modelli HBIM approfonditi hanno permesso riflessioni sulla gestione e sul riutilizzo delle informazioni implementate da parte di utenti con *background* diversi, integrando i dati semantici per il patrimonio culturale e consentendo di migliorare gli studi interdisciplinari. I sistemi informati sviluppati hanno contribuito a creare nuove possibilità per la condivisione di dati eterogenei all'interno di un unico ambiente digitale e la loro implementazione ha migliorato i progetti coinvolgendo conoscenze multidisciplinari e supportando la compartecipazione.

Il modello per la stampa additiva si è prestato per la valorizzazione e l'accessibilità e si è configurato come uno strumento importante per la conservazione e la riproduzione del manufatto. Il facsimile dell'architettura è diventato realtà tangibile.

Il modello per l'implementazione della conoscenza storica ha garantito una maggiore consapevolezza degli aspetti costitutivi e delle peculiarità del manufatto nel rispetto dei principi di documentazione dei Beni Culturali. Il rigore della strutturazione della ricerca archivistica ha garantito processi di elaborazione critica sul Patrimonio.

Il modello per la datazione e gestione della quarta dimensione mostra come un HBIM possa essere un valido punto di partenza per l'analisi dello stato attuale di conservazione dell'edificio e per effettuare future indagini strutturali e mappature del degrado, base necessaria per interventi di salvaguardia e di manutenzione programmata.

Il modello per l'istruzione di rete neurali ha dimostrato come i sistemi BIM si offrano al fine di dare forma correttamente a un modello di *Artificial Neural Network* e di elaborare un prototipo di apprendimento profondo in grado di riconoscere e segmentare gli elementi architettonici e di automatizzare i processi *Scan-to-BIM*.

L'approccio interdisciplinare e collaborativo nell'applicazione del BIM agli oggetti del patrimonio culturale è risultata essenziale nei processi conoscitivi esplorati. Nonostante una gestione sempre più efficiente alcuni temi rimangono ancora aperti: la mancanza di una completa documentazione architettonica di origine, la difficoltà nel modellare gli edifici storici in quanto caratterizzati da forme complesse, la non completa interoperabilità tra piattaforme, le inevitabili trasformazioni dei beni nel tempo e gli strumenti disponibili non sempre sufficienti per modellare le relazioni gerarchiche degli elementi architettonici e registrare gli attributi necessari dal punto di vista del conservatore del CH.

Gli approcci sperimentali mostrati, inoltre, hanno mostrato di possedere carattere innovativo nell'ambito delle attuali ricerche nel settore del disegno e della modellazione: gli obiettivi raggiunti consentono di aprire nuovi orizzonti di indagine e approfondimento in termini di riuso dei dati per valorizzazione, conservazione e interoperabilità.

I modelli delle architetture indagate, informati ed informativi, semanticamente strutturati e consapevoli, non sciolgono tutte le questioni, ma si sono mostrati come strumenti preziosi per una profonda conoscenza e gestione dei beni stessi, collettori di dati in grado di apportare avanzamenti ed evoluzioni nel proposito, ormai sempre più diffuso, di giungere ad una visione quanto più globale dei manufatti.

## Bibliografia

Acierno, M. *et al.* (2017) 'Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process. *Journal of Cultural Heritage*, 24, 124-133.', *Journal of Cultural Heritage*.

Alagna, A. (2015) *Stratigrafia per il restauro architettonico. Il metodo dell'analisi stratigrafica della superfici murarie per la conoscenza e la conservazione del costruito storico*. Edited by Aracne.

Apollonio, F. I. *et al.* (2013) 'The PALLADIOLibrary geo-models: An open 3D archive to manage and visualize information-communication resources about Palladio', *ISPRS International Archive XL-5 W, 2*.

Apollonio, F. I., Gaiani, M. and Sun, Z. (2012) 'BIM-based Modeling and Data Enrichment of Classical Architectural Buildings', *SCIRES-IT: SCientific RESearch and Information Technology*. doi: 10.2423/i22394303v2n2p41.

Apollonio, F. I., Gaiani, M. and Sun, Z. (2013) '3D modeling and data enrichment in digital reconstruction of architectural heritage', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W2, pp. 43-48. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-43-2013.

Apollonio, F. I., Gaiani, M. and Sun, Z. (2016) 'A Reality Integrated BIM for Architectural Heritage Conservation', in. doi: 10.4018/978-1-5225-0675-1.ch002.

Aubin, P. (2013) *Renaissance Revit: Creating Classical Architecture with Modern Software*. Edited by G3B Press.

Australia ICOMOS (2013) 'The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance, 2013', *The Burra Charter*.

Balletti, C., Ballarin, M. and Guerra, F. (2017) '3D printing: State of the art and future perspectives', *Journal of Cultural Heritage*. doi: 10.1016/j.culher.2017.02.010.

Balletti, C., Ballarin, M. and Vernier, P. (2018) 'Replicas in cultural heritage: 3D printing and the museum experience', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-55-2018.

Banfi, F., Stanga, C. and Brumana, R. (2018) 'A Digital Workflow for Built Heritage: From SCAN-to-BIM Process to the VR-Tour of the Basilica of Sant'Ambrogio in Milan', in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial*



*Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics*). doi: 10.1007/978-3-030-01762-0\_28.

Barba, S. *et al.* (2020) 'BIM-Oriented Modelling and Management of Structured Information for Cultural Heritage', in Agustín-Hernández, L., Vallespín Muniesa, A., and Fernández-Morales, A. (eds) *Graphical Heritage*. Cham: Springer International Publishing, pp. 630–640.

Barrozio da Vignola, M. I. (1562) *La regola delli cinque ordini d'architettura*.

Bassier, M. *et al.* (2016) 'Implementation of scan-to-BIM and FEM for the documentation and analysis of heritage timber roof structures', in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. doi: 10.1007/978-3-319-48496-9\_7.

Beacham, R., Denard, H. and Niccolucci, F. (2006) 'W4 RL2 An Introduction to the London Charter', *The Evolution of ICTechnology in Cultural Heritage, CIPA/VAST/EG/EuroMed*.

Biagini, C. *et al.* (2016) 'Biagini, C., Capone, P., Donato, V., & Facchini, N. (2016). Towards the BIM implementation for historical building restoration sites. Automation in Construction, 71, 74-86.', *Automation in Construction*.

Bianchini, C. *et al.* (2016) 'Building Information Modeling (BIM): Great Misunderstanding or Potential', *Handbook of Research on Emerging Technologies for Digital Preservation and Information Modeling*. IGI Global, p. 67.

Bianchini, C., Inglese, C. and Ippolito, A. (2016) 'The role of bim (building information modeling) for representation and managing of built and historic artifacts', *DISEGNARECON*.

Bianchini, C. and Nicastro, S. (2018a) 'From BIM to H-BIM', in *Proceedings of the 2018 3rd Digital Heritage International Congress, Digital Heritage 2018 - Held jointly with the 2018 24th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, VSMM 2018*. doi: 10.1109/DigitalHeritage.2018.8810087.

Bianchini, C. and Nicastro, S. (2018b) 'The definition of the Level of Reliability: a contribution to the transparency of Heritage-BIM processes', *3D Modeling & BIM*.

Bianchini, C. and Potestà, G. (2021) 'BIM for Built Cultural Heritage: Semantic Segmentation, Architectural Stratification and LOD of the Baptistery of San Giovanni in Florence', in *Springer Tracts in Civil Engineering*. doi: 10.1007/978-3-030-49278-6\_1.

Bianconi, F., Filippucci, M. and Meconi, F. M. (2018) 'Parametrical Vitruvius. Generative modeling of the architectural orders', *SCIRES-IT*. doi: 10.2423/i22394303v8n2p29.

- Borin, P., Bernardello, R. A. and Grigoletto, A. (2020) 'Connecting Historical Information with BIM Ontologies. HBIM Methods for the Visualization of Harris Matrix for the Torrione in Carpi', in. doi: 10.1007/978-3-030-47979-4\_65.
- Brogiolo, G. Pietro (2002) 'L'archeologia dell'architettura in Italia nell'ultimo quinquennio (1997-2001)', *Arqueología de la Arquitectura*. doi: 10.3989/arq.arqt.2002.3.
- Brumana, R., Ioannides, M. and Previtali, M. (2019) 'Holistic heritage building information modelling (hbbim): From nodes to hub networking, vocabularies and repositories', in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi: 10.5194/isprs-Archives-XLII-2-W11-309-2019.
- Brunelli, M. (2014) *Heritage Interpretation: un nuovo approccio per l'educazione al patrimonio*. Macerata: EUM - Edizioni Università di Macerata.
- Bruno, N. (2018) *From survey to analysis for Cultural Heritage management: a new proposal for database design in BIM*. Università di Parma.
- Brusaporci, S. et al. (2018) 'AHBIM per l'analisi stratigrafica dell'architettura storica', *Restauro Archeologico*.
- Brusaporci, S., Maiezza, P. and Tata, A. (2018) 'Computational Design for As-Built Modeling of Architectural Heritage in HBIM processes', in *2018 IEEE International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, MetroArchaeo 2018 - Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 199–203. doi: 10.1109/MetroArchaeo43810.2018.13620.
- Brusaporci, S. and Trizio, I. (2013) 'La "Carta di Londra" e il Patrimonio Architettonico: riflessioni circa una possibile implementazione', *SCIRES-IT - SCientific RESearch and Information Technology*, 3(2), pp. 55–68. doi: 10.2423/i22394303v3n2p55.
- Bucciarelli, G., Mezzetti, C. and Pugnali, F. (1979) *Il Lazzaretto di Ancona, un'opera dimenticata*. Edited by Cassa di Risparmio di Ancona. Ancona: Industrie Grafiche F.lli Anibaldi.
- Campi, M., Di Luggo, A. and Scandurra, S. (2017) '3D modeling for the knowledge of architectural heritage and virtual reconstruction of its historical memory', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-133-2017.
- Cantoni, V., Mosconi, M. and Setti, A. (2019) 'Technological innovation and its enhancement of cultural heritage', in *IEEE International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications, INISTA 2019 - Proceedings*. doi: 10.1109/INISTA.2019.8778378.

Cataldo, M. F. (2020) 'Preservare la memoria culturale: il ruolo della tecnologia', *Aedon, Rivista di arti e diritto online*, 2.

Chiabrandò, F., Lo Turco, M. and Santagati, C. (2017) 'Digital invasions: From point clouds to historical building object modeling (h-BOM) of a unesco WHL site', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-171-2017.

Chitham, R. (1987) *Gli ordini classici in architettura. I fondamenti storici, gli ordini nei loro particolari, l'uso degli ordini*. Edited by Hoepli.

Clini, P., Mehtedi, M. El, *et al.* (2018) 'A digital reconstruction procedure from laser scanner survey to 3d printing: the theoretical model of the Arch of Trajan (Ancona)', *SCIRES-IT - SCientific RESearch and Information Technology*, 7(2), pp. 1–12. doi: 10.2423/I22394303V7N2P1.

Clini, P., Frapiccini, N., *et al.* (2018) 'Toccare l'arte e guardare con altri occhi. Una via digitale per la rinascita dei musei archeologici nell'epoca della riproducibilità dell'opera d'arte', in *Ambienti digitali per l'educazione all'arte e al patrimonio*. Milano: Franco Angeli.

Clini, P. *et al.* (2020) 'Digit (al) isation in Museums: Civitas Project–AR, VR, Multisensorial and Multiuser Experiences at the Urbino's Ducal Palace', in *Virtual and Augmented Reality in Education, Art, and Museums*. IGI Global, pp. 194–228.

COMMITTE, U. (2017) 'UNI 11337-4:2017 Edilizia e opere di ingegneria civile - Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni - Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti', pp. 1–118.

Condotta, M. and Eiche, S. (2013) 'Using Controlled Vocabularies for a Creative Interpretation of Architectural Digital Resources', *Getty Research Journal*. doi: 10.1086/grj.5.41825354.

Coppola, S. and Zanazzi, S. (2020) 'L'esperienza dell'arte. Il ruolo delle tecnologie immersive nella didattica museale'. doi: 10.7346/-fei-XVIII-02-20\_04.

Costa, G. and Madrazo, L. (2015) 'Connecting building component catalogues with BIM models using semantic technologies: An application for precast concrete components', *Automation in Construction*. doi: 10.1016/j.autcon.2015.05.007.

Costa, S. (2019) 'Una proposta di standard per l'archiviazione e la condivisione di dati stratigrafici', *Archeologia e Calcolatori*.

Cursi, S., Simeone, D. and Toldo, I. (2015) 'A semantic web approach for built heritage representation', in *Communications in Computer and Information Science*. doi:

10.1007/978-3-662-47386-3\_21.

Daniotti, B., Gianinetto, M. and Della Torre, S. (2020) *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment, Research for Development*.

Demetrescu, E. (2015) 'Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice', *Journal of Archaeological Science*. doi: 10.1016/j.jas.2015.02.004.

Dezen-Kempton, E. *et al.* (2018) 'BIM for Heritage Documentation An ontology-based approach', *Kepczynska-Walczak, A, Bialkowski, S (eds.), Computing for a better tomorrow - Proceedings of the 36th eCAADe Conference - Volume 1, Lodz University of Technology, Lodz, Poland, 19-21 September 2018 Poland, 19-21 September 2018*.

Diara, F. and Rinaudo, F. (2020) 'IFC Classification for FOSS HBIM: Open Issues and a Schema Proposal for Cultural Heritage Assets', *Applied Sciences*, 10(8320).

Dore, C. and Murphy, M. (2013) 'Semi-automatic modelling of building façades with shape grammars using historic building information modelling', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi: 10.5194/isprsarchives-xl-5-w1-57-2013.

Dore, C. and Murphy, M. (2017) 'Current state of the art historic building information modelling', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-185-2017.

Empler, T. (2013) 'Universal design: Ruolo del disegno e rilievo', *Disegnare Idee Immagini*.

EPOCH (2009) *The London Charter*, Access. Available at: <http://www.londoncharter.org/>.

Fan, H., Su, H. and Guibas, L. (2017) 'A point set generation network for 3D object reconstruction from a single image', in *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017*. doi: 10.1109/CVPR.2017.264.

FIORANI, D. *et al.* (2020) 'Transformation of tools and conservation of architecture', *Építés - Építészettudomány*. doi: 10.1556/096.2020.005.

Gaiani, M. *et al.* (2015) 'A mono-instrumental approach to high-quality 3D reality-based semantic models: Application on the PALLADIO library', in *2015 Digital Heritage International Congress, Digital Heritage 2015*. doi: 10.1109/DigitalHeritage.2015.7419449.

Galantucci, R. A. *et al.* (2020) 'Automatic detection of dampness phenomena on

architectural elements by point cloud segmentation’, in *Rehabend 2020 Euro-American Congress - Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*.

García-Valdecabres, J., López González, C. and Cortes Meseguer, L. (2020) ‘Definition of a Protocol for Information Management and the Creation of the HBIM Model’, in Agustín-Hernández, L., Vallespín Muniesa, A., and Fernández-Morales, A. (eds) *Graphical Heritage*. Cham: Springer International Publishing, pp. 176–188.

Gargaro, S., Giudice, M. Del and Ruffino, P. A. (2018) ‘Towards a multi-functional HBIM model’, *SCIRES-IT*. doi: 10.2423/i22394303v8n2p49.

Garozzo, R. *et al.* (2017) ‘Culto: An ontology-based annotation tool for data curation in cultural heritage’, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-267-2017.

Garozzo, R., Santagati, C. and Lo Turco, M. (2019) ‘Information Models to Manage Complexity for an Integrated Knowledge Project’, *Disegno*, 4, pp. 225–236.

Di Giulio, R., Maietti, F. and Piaia, E. (2016) ‘3D documentation and semantic aware representation of Cultural Heritage: The INCEPTION project’, in *2016 Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, GCH 2016*. doi: 10.2312/gch.20161406.

Grilli, E., Özdemir, E. and Remondino, F. (2019) ‘Application of machine and deep learning strategies for the classification of heritage point clouds’, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-447-2019.

Gros, P. (1997) *Vitruvio. De Architectura*. Edited by Einaudi.

<https://www.aiacontracts.org/contract-documents/19016-project-bim-protocol> (no date).

Inzerillo, L. *et al.* (2016) ‘Bim and architectural heritage: Towards an operational methodology for the knowledge and the management of cultural heritage’, *DISEGNARECON*.

Jo, W. *et al.* (2016) ‘Introduction of 3D printing technology in the classroom for visually impaired students’, *Journal of Visual Impairment and Blindness*. AFB Press, pp. 115–121. doi: 10.1177/0145482x1611000205.

Li, Z. *et al.* (2017) ‘Classification of Urban Point Clouds: A Robust Supervised Approach with Automatically Generating Training Data’, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2628399.

López, F. *et al.* (2018) ‘A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)’,

*Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), p. 21. doi: 10.3390/mti2020021.

López, F. J. *et al.* (2018) 'Linking HBIM graphical and semantic information through the Getty AAT: Practical application to the Castle of Torrelobatón', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi: 10.1088/1757-899X/364/1/012100.

De Luca, L. (2013) '3D Modelling and Semantic Enrichment in Cultural Heritage', in *Photogrammetric Week 2013*.

De Luca, L. (2014) 'Methods, formalisms and tools for the semantic-based surveying and representation of architectural heritage', *Applied Geomatics*. doi: 10.1007/s12518-011-0076-7.

Luigini, A. and Panciroli, C. (2018) *Ambienti digitali per l'educazione all'arte e al patrimonio*. Franco Angeli.

Macher, H., Landes, T. and Grussenmeyer, P. (2017) 'From point clouds to building information models: 3D semi-automatic reconstruction of indoors of existing buildings', *Applied Sciences (Switzerland)*. doi: 10.3390/app7101030.

Maietti, F. *et al.* (2018) 'Enhancing Heritage fruition through 3D semantic modelling and digital tools: The INCEPTION project', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi: 10.1088/1757-899X/364/1/012089.

Maiezza, P. and Tata, A. (2019) 'Modelling and Visualization Issues in the Architectural Heritage BIM', in *Graphic Imprints*. doi: 10.1007/978-3-319-93749-6\_42.

Malinverni, E. S. *et al.* (2019) 'DEEP LEARNING FOR SEMANTIC SEGMENTATION OF 3D POINT CLOUD', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* Copernicus Publications, XLII-2/W15, pp. 735–742. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-735-2019.

Martínek, J., Lenc, L. and Král, P. (2019) 'Training Strategies for OCR Systems for Historical Documents', in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. doi: 10.1007/978-3-030-19823-7\_30.

Matrone, F. *et al.* (2020) 'Comparing machine and deep learning methods for large 3D heritage semantic segmentation', *ISPRS International Journal of Geo-Information*. doi: 10.3390/ijgi9090535.

Miller, E. F. and Melton, R. A. (1975) 'Automated generation of testcase datasets', in *Proceedings of the 1975 International Conference on Reliable Software*. doi: 10.1145/800027.808424.

Moreira, A. *et al.* (2018) 'Hbim methodology as a bridge between Italy and Argentina', in

*International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-715-2018.

Morolli, G. (1986) *Le membra degli ornamenti. Sussidiario illustrato degli ordini architettonici*. Edited by Alinea.

Morolli, G. (2013) *La lingua delle colonne: morfologia, proporzioni e semantica degli ordini architettonici*. Edited by Edifir. Firenze.

Murphy, M., McGovern, E. and Pavia, S. (2009) 'Historic building information modelling (HBIM)', *Structural Survey*. doi: 10.1108/02630800910985108.

Murphy, M., McGovern, E. and Pavia, S. (2013) 'Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006.

Murtiyoso, A. and Grussenmeyer, P. (2019) 'Automatic heritage building point cloud segmentation and classification using geometrical rules', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 821–827. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-821-2019.

Musso, S. F. (2016) *Recupero e restauro degli edifici storici. Guida pratica al rilievo e alla diagnostica*. IV. Edited by EPC Editore. Roma.

Nespeca, R. (2018) 'Towards a 3D digital model for management and fruition of Ducal Palace at Urbino. An integrated survey with mobile mapping', *SCIRES-IT - SCientific RESearch and Information Technology*. doi: 10.2423/122394303V8N2P1.

Oldman, D. *et al.* (2014) 'Realizing lessons of the last 20 years: A manifesto for data provisioning & aggregation services for the digital humanities (a position paper)', *D-Lib Magazine*. doi: 10.1045/july2014-oldman.

Oreni, D. *et al.* (2013) 'Hbim for conservation and management of built heritage: Towards a library of vaults and wooden beam floors', in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-215-2013.

Osello, A. (2012) 'Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti, The future of Drawing with BIM for Engineers and Architects', *Palermo: Dario Flaccovio Editore*.

Osello, A. *et al.* (2016) 'La centralità della Rappresentazione con il BIM', *Disegnare con*.

Parisi, P., Lo Turco, M. and Giovannini, E. C. (2019) 'The value of knowledge through h-bim models: historic documentation with a semantic approach', in *ISPRS Annals of the*

*Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-581-2019.

Pauwels, P. *et al.* (2013) 'Integrating building information modelling and semantic web technologies for the management of built heritage information', in *Proceedings of the DigitalHeritage 2013 - Federating the 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH, and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, Plus Special Sessions fromCAA, Arqueologica 2.0 et al.* doi: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743787.

Pellegrini, G. (2015) 'Rilevare per conoscere, rappresentare per descrivere', in *Patrimonio artistico, culturale e paesaggistico: nutrimento per l'anima La qualità del territorio per le generazioni future*. Genova: GS Digital S.a.S Genova, pp. 7–16.

Pellegrini, G. (2016) 'Di-Segno', in Dipartimento di Scienze per l'Architettura (ed.) *Di-Segnare Ambiente Paesaggio Città*. Genova: GS Digital S.a.S Genova, pp. 69–78.

Pellegrini, G. and Salvetti, F. (2019) 'Interdisciplinary skills in the field of architectural surveying', in Genova University Press (ed.) *De\_Sign: Environment Landscape City*. Genova, pp. 35–44.

Pierdicca, R. *et al.* (2019) 'Automatic generation of point cloud synthetic dataset for historical building representation', in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. doi: 10.1007/978-3-030-25965-5\_16.

Pierdicca, R. *et al.* (2020) 'Point cloud semantic segmentation using a deep learning framework for cultural heritage', *Remote Sensing*. doi: 10.3390/rs12061005.

Pignatelli, F. (2013) 'L'evoluzione della stampa 3D e le sue applicazioni in campo museale', *SCIRES-IT - SCIENTIFIC RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGY*, 3(2), pp. 143–158. doi: 10.2423/I22394303V3N2P143.

Pittaluga, D. *et al.* (2020) 'Historical earthen walls: From knowledge to conscious conservation', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-1117-2020.

Previtali, M. *et al.* (2020) 'An ontology-based representation of vaulted system for HBIM', *Applied Sciences (Switzerland)*. doi: 10.3390/app10041377.

Previtali, M. and Banfi, F. (2018) 'Towards the Definition of Workflows for Automation in HBIM Generation', in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. doi: 10.1007/978-3-030-01762-0\_5.



- Puma, P. (2018) 'Sperimentazioni di didattica museale per l'attivazione di processi educativi evoluti nel programma Digital Cultural Heritage- DigitCH', in Luigini, A. and Panciroli, C. (eds) *Ambienti digitali per l'educazione all'arte e al patrimonio*. Franco Angeli, pp. 221–239.
- Qi, C. R., Su, H., *et al.* (2017) 'PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation', in *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017*. doi: 10.1109/CVPR.2017.16.
- Qi, C. R., Yi, L., *et al.* (2017) 'PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space', in *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- Quagliarini, E., Clini, P. and Ripanti, M. (2017) 'Fast, low cost and safe methodology for the assessment of the state of conservation of historical buildings from 3D laser scanning: The case study of Santa Maria in Portonovo (Italy)', *Journal of Cultural Heritage*. doi: 10.1016/j.culher.2016.10.006.
- Quattrini, R. *et al.* (2015) 'From tls to hbim. high quality semantically-aware 3d modeling of complex architecture', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-367-2015.
- Quattrini, R. *et al.* (2016) 'Misura e Historical Information Building: sfide e opportunità nella rappresentazione di contenuti 3D semanticamente strutturati Measurement and Historical Information Building: challenges and opportunities in the representation of semantically structured ', *DISEGNARE CON...*, 9, pp. 1–11.
- Quattrini, R. *et al.* (2017) 'Conservation-oriented hbim. The bimexplorer web tool.', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-Archives-XLII-5-W1-275-2017.
- Quattrini, R. *et al.* (2019) 'From tls to fe analysis: points cloud exploitation for structural behaviour definition. the San Ciriaco's bell tower', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-957-2019.
- Quattrini, R., Battini, C. and Mammoli, R. (2018) 'Hbim to VR. Semantic awareness and data enrichment interoperability for parametric libraries of historical architecture', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-937-2018.
- Quattrini, R., Pierdicca, R. and Morbidoni, C. (2017) 'Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web', *Journal of Cultural Heritage*. doi: 10.1016/j.culher.2017.05.004.

- Ros, G. *et al.* (2016) 'The SYNTHIA Dataset: A Large Collection of Synthetic Images for Semantic Segmentation of Urban Scenes', in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. doi: 10.1109/CVPR.2016.352.
- Rossetti, V. *et al.* (2018) 'Enabling Access to Cultural Heritage for the visually impaired: An Interactive 3D model of a Cultural Site', in *Procedia Computer Science*. doi: 10.1016/j.procs.2018.04.057.
- Roupé, M. *et al.* (2016) 'Immersive visualization of Building Information Models', *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2016)*.
- La Russa, F. M. and Santagati, C. (2020) 'Historical sentient – building information model: a digital twin for the management of museum collections in historical architectures', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi: 10.5194/isprs-archives-xliii-b4-2020-755-2020.
- Santagati, C. *et al.* (2018) 'Assessment of workflows for creating 3D semantic libraries: A study on medieval bell towers in the central region of Sicily', in *2018 IEEE International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, MetroArchaeo 2018 - Proceedings*. doi: 10.1109/MetroArchaeo43810.2018.13602.
- Santagati, C., Lo Turco, M. and Garozzo, R. (2018) 'Reverse information modeling for historic artefacts: Towards the definition of a level of accuracy for ruined heritage', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-1007-2018.
- Saygi, G. and Remondino, F. (2013) 'Management of Architectural Heritage Information in BIM and GIS: State-of-the-Art and Future Perspectives', *International Journal of Heritage in the Digital Era*. doi: 10.1260/2047-4970.2.4.695.
- Scopigno, R. *et al.* (2017) 'Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey', *Computer Graphics Forum*. doi: 10.1111/cgf.12781.
- Sgherri, E. and Anzani, G. (2017) 'The Fortress of Riolo Terme, near Ravenna: digital survey and 3D printing for cultural dissemination', *Studies in Digital Heritage*. doi: 10.14434/sdh.v1i2.23228.
- Simeone, D. *et al.* (2014) 'B(H)IM - Built Heritage Information Modelling', *2nd eCAADe Conference, At Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering and Environment, Newcastle upon Tyne*.
- Simeone, D., Cursi, S. and Acierno, M. (2019) 'BIM semantic-enrichment for built heritage representation', *Automation in Construction*. doi: 10.1016/j.autcon.2018.11.004.

- Spallone, R., Piano, A. and Piano, S. (2016) 'BIM e beni architettonici: analisi e rappresentazione multiscalare e multidimensionale di un insediamento storico. Il caso studio di Montemagno, Borgo Nuovo piemontese', *Disegnarecon*, 16(13), pp. 1–13.
- Tamke, M. *et al.* (2016) 'An Automated Approach to the Generation of Structured Building Information Models from Unstructured 3d Point Cloud Scans'. Available at: [http://www.read.dk/ws/files/60642021/IASS2016\\_1248\\_An\\_automated\\_approach\\_to...pdf](http://www.read.dk/ws/files/60642021/IASS2016_1248_An_automated_approach_to...pdf).
- Tobiasz, A. *et al.* (2019) 'Review of Methods for Documentation, Management, and Sustainability of Cultural Heritage. Case Study: Museum of King Jan III's Palace at Wilanów', *Sustainability (Switzerland)*. doi: 10.3390/su11247046.
- Tran, H. and Khoshelham, K. (2019) 'Building change detection through comparison of a lidar scan with a building information model', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-889-2019.
- Trizio, I. *et al.* (2019) 'The archaeological analysis of masonry for the restoration project in HBIM', in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-715-2019.
- UNI 11337- 4 (2017) 'Edilizia e opere di ingegneria civile - Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni - Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti'.
- Valacchi, F. (2006) 'Archivi storici: per una cultura della gestione', *Culture del testo e del documento*, 19(200), pp. 19–36.
- Volk, R., Stengel, J. and Schultmann, F. (2014) 'Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs', *Automation in construction*. Elsevier, 38, pp. 109–127. doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
- Wang, Y. *et al.* (2019) 'Dynamic graph Cnn for learning on point clouds', *ACM Transactions on Graphics*. doi: 10.1145/3326362.
- Xu, J., Ding, L. and Love, P. E. D. (2017) 'Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing', *Automation in Construction*. doi: 10.1016/j.autcon.2017.01.010.
- Xu, Z. *et al.* (2018) 'Deep image-based relighting from optimal sparse samples', *ACM Transactions on Graphics*. doi: 10.1145/3197517.3201313.

# Appendici

## Appendice A: trascrizioni archivistiche

### A.1. Trascrizioni integrali dall'Archivio Comunale di Ancona (ACAN)<sup>27</sup>

*Antico Regime, II, Ufficio di Sanità, 2 (Libbro preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica dei nuovi lazzeretti)*

62 r.

*Cisterna e Cisterne situate nella Piazza del Lazzeretto*

Una delle più belle e ben intese cose che vi sia nel Nuovo Lazzeretto di Ancona è la situazione e costruzione della Cisterna di acque dolci che serve ad uso de Contumaci la qual Cisterna o sia custodia delle Acque contiene Barrili Romani n° trentaseimila di Boccali 36 per ogni Barile come lasuo scritto il Vanvitelli, Ingegnere, ed Architetto di una si grande Fabbrica. Il Reclusorio delle Acque o sia Conserva resta immediatamente sotto il ripiano e circondario della Cappella, il quale è costruito in modo particolare con cinque Pilastroni che sostengono il Pentagono della Cappella medesima; è ridotto ad uno Stagno perfettissimo che pare di Gettito. L'Acqua per via di Gratticole di Ferro passa, e si comunica alle due Cisterne situate orizzontalmente nella Piazza del Lazzeretto da dove si cava l'Acqua. La Cisterna Grande non riceve altr'acqua che quella che cade dalli tetti superiori delli Magazzeni, vicino alla Gronda de

62 v.

li quali vi è un canale aperto in forma di acquedotto formato da lamine di piombo li quali si riferiscono alli cinque angoli della piazza del lazzeretto e per via di canali e conforre passano nelli cisternini delle breccie e spurghe ed indi cade e passa nella detta

---

<sup>27</sup> L'Archivio Comunale di Ancona è conservato presso l'Archivio di Stato.

Cisterna grande senza che si imbratti l'acqua per altre vie; e l'acqua che cade dalli tetti inferiori delli quaritieri de contumaci come quella che cade nella piazza delli lazzeretti, questa non si mischia coll'acqua della Cisterna grande ma per mezzo di una chiavica passa al Mare.

Nel Magazzino n° 7 che ritiene il titolo del Magazzino detto della Fonte vi è in esso è rincontro al Rastello, che serve di Porta à detto Magazzino una piccola Porticina la quale introduce al sito sotterraneo dove vi sono li condotti, che servono per mandare via tutta l'Acqua della Cisterna grande, la quale per mezzo di una Chiavica fugge al Mare in occasione che occorra ripulire la Cisterna sudetta, ò per altro bisogno; ed il tutto bene inteso e fatto con somma maestria. Una tale Cisterna è solito farsi ripulire, come rinfrescare le Breccie, e sponghie almeno ogni dieci anni, come finora si è praticato, quando però non accada bisogno straordinario. In due occorrenze di grandissima affluenza di Contumacianti

63 r.

che non furono sufficienti a dar sfogo per cavar l'acqua da dette due Cisterne a comodo de Contumaci, che per ovviare confusione, e sconcerti dal Soprintendente del Lazzeretto fu preso espediente provvisorio di far aprire le due Pianche di Pietra, à pieno Chiusini, che si ritrovano collocati nel ripiano dopo fatti li tre scalini per ascendere alla Cappella, li quali Chiusini guardano immediatamente e vanno à percolere il centro della Cisterna grande e con corde incatramate si cavava anche per quella parte delli Contumaci l'acqua ad essi bisognevole durante la straordinaria affluenza delle Quarantene. Tutto chè la descritta Cisterna grande osia Reclusorio delle acque contenga la sopraccennata quantità delle medesime, tuttavia nell'anno 1738 e nel tempo della maggiore affluenza delle Contumacie à causa di una lunga siccità mancò alla Cisterna sudetta l'Acqua, e siccome la Città di Ancona ha sempre penuriato di Acque, è molto più di Acque salubri. In una tale emergenza il Soprintendente al Lazzeretto prese l'espediente di spedire due Barche con Botti, e con esse Persona proba sull'imboccatura di Fiumegino dove in quel tempo esistenza una Fonte perenne di ottim'acqua colla quale supplì all'indigenza per lo spazio di circa due Mesi la cui

spesa andiede a carico del Principe e per esso della R. Città che in quella occasione per nolo di Barche di Botti, carico e discarico dell'Acque e provvisione a quello che assisteva ad una tale caricazione per garantire la sicurezza che quell'Acque veniva caricata estratta dalla Fonte suddetta e non vi rascese.

110 v.

*Magazzini delli Nuovi Lazzaretti*

La Fabbrica dell Nuovi Lazzaretti contiene nel suo interno circondario numero 26 Magazzini tutti ampi e spaziosi. Nel Primo ripiano di una tal fabbrica vi sono situati n. 13 Magazzini tutti à volta viva con suoi pavimenti di selciato con grosse rastellate che si chiudono; nel secondo ripiano e sulla piazza di detti lazzaretti vi sono parimenti altri n. 13 Magazzini della stessa lunghezza e latitudine delli inferiori del Primo Ripiano e questi sono tutti à tetto nudo costruiti con grosse travature ed hanno tutti li loro pavimenti mattonati con grandi e larghi finestroni aperti con soli controscuri di legno assai robusti ed hanno una sola porta per cadauna, che introduce nelli medesimi hanno altresì per ogni Magazzino il Cammino, sciacquatoio e luogo comodo, affinché a misura di circostanze possino così servire per contumaciarvi anche le persone non che le merci, come tante e tante volte è seguito. A questi si ascende per otto scaloni coperti situati nel la suriferita piazza delli nuovi lazzaretti.

150 r.

*Seppulture delli Contumaci*

Le seppulture ossia fosse delli Contumaci che si ritrovano nelli Nuovi Lazzaretti, il Vanvitelli Architetto ed Ingegnere di una tal Fabbrica dessinò e fece costurire due Fosse murate nel Baluardo di detto Lazzaretto vicino al Muro, le quali Fosse devidono il mezzo delle quattro Cannoniere della parte di Ponente ò per meglio dire, che guardano la parte di Ponte Canocchia. Una di dette Fosse venne destinata per li Cristiani Cattolici, e l'altra per li Turchi ed Infedeli e tanto dell'una, che dell'altra in varie circostanze vi sono stati interrati - more solito- tanto li Cattolici che l'Infedeli.

Situazione migliore e più adattata non poteva certamente destinarvi il Vanvitelli per due Fosse ad un tal uso destinate, si per essere lontane e separate dal Fabbricato interno dell'Edificio del Lazzaretto, che pur esser fuori di vista delli contumaci medesimi, onde tali interramenti si facevano prima con tutta la quiete, e senza il disturbo di veruno, e senza che li Contumaci si avvedessero mai di tali operazioni in detto luogo. Si usarono le descritte due Fosse osieno seppulture sino all'anno 1755 nel qual tempo incominciarono ad introdurre nel nuovo Lazzaretto, e nel citato Baluardo di Esso li legnami inservienti alla Fabbrica del Nuovo Braccio li quali preoccuparono il sito ove sono collocate le nominate due Fosse, le quali sempre, e poi sempre sono state coperte da tali legnami

150 v.

oltre di chi continuamente vi frequentavano li Galeotti ed altre porte onde anche per questo riflusso non conveniva in quel luogo di interrare li Contumaci come fu fatto e da quel momento in poi convenne aprire un provvisionale cimitero dove presentemente si ritrova nello spanditore della parte che guarda la Fortezza Maggiore e dito il meno frequentato e to più al caso per un tale affare. Nel Mese di Ottobre dell'Anno 1764 li Mercanti Levantini fecero presentare per mezzo del sig.e Cavalier Corrado Ferretti loro Console all'E.ño Sig.e Cardinale Nicola Perrelli come soprintendente Generale di tutte le Fabbriche della Città e Porto di Ancona un Memoriale ragionato, col quale essi Mercanti Levantini imploravano dall'E.S. che si fossero rese libere le sovraccenate due sepolture esistenti nelli Nuovi Lazzretti per non vedersi ulteriormente esposti quelli che facevano la Quarantena ad essere in un caso interrati in provvisionale Cimiterio ed esposti alla vista ed alla frequenza di tante Nazioni di varie Communioni. E siccome in detto Mese et anno si ritrovava qui il prelodato Corporato, onde colla viva voce del ridetto Cavalier Corrado Ferretti venne avalorata la detta supplica che l'emza sua poi averla letta e considerata la passò alle mani del Soprintendente del Lazzaretto accioché esaminato prima l'esposto glie ne facesse indi una verbale informazione; come int? to non potè fare àmeno di riferire al Sig.re Card.e Perrelli, che li capo p? nella supplica esisteva in tutte le sue parti con aggiungerli anco il di lui sentimento

tanto per Giustizia che per dovere a favore dei Ricorrenti alle ivi sode ragioni il Sig.re Cardinale non potè replicare in contrario onde pregò tanto il soprintendente del divisato Lazzaretto che il citato Console de' Levantini a procurare in buona maniera alle circostanz di voler persuadere li Ricorrenti di

151 r.

di contentarsi intanto così che con un poco di tempo avrebbe Egli ha fatto rimettere tutte le cose nel suo primiero stato ma soprattutto che si procurasse che non facessero Essi Levantini nove istanze e non ne facessero riferimento presso la Sacra Consulta. Premeva moltissimo al Sig.re Cardinale Perelli con un tale affare perché Esso allorché si ritrovava Tesoriere Gnle volle valersi del sito e Magazzeni situati in quella parte per collocarvi li nominati Legnami ed Attrezzi, onde caldamente si raccomandò alli due precitati Cavalieri perché Esso ben conosceva quali e quanti erano li giornalieri sconcerti che vedeva nascere in quella parte per tali ingombramenti fatti; Intanto li nominati Ricorrenti non si mossero più per essersi procurato nelle contingenze di distrarli da ogni altro ricorso.

196 r. - 197 v.

*Polveriera Situata nel Centro del Baloardo delli Novi Lazzaretti*

La Polveriera situata nel Centro del Baloardo delli Novi Lazzaretti divisa con Porta avendo una Ferrata in forma quadra che resta nella Prospettiva di Essa e che serve per dar lume al primo Ingresso nella medesima, avendo un Muro interiore che la difende da qualunque attentato ed à cautela anche di inopinati infortunij, restando la divisata Polveriera fiancheggiata dal Pentagono, che la circonda con Muri di stravagante grossezza, oltre di essere tali e Muraglie rivestite al di fuori con grosse Pietre d'Istria artefatte e manufatturate in modo tale che rimangono connesse e concatenate fra esse con tutta l'arte e la maestria, che viene giudicato da' tutti la più bell'Opera, che abbia in sè l'Edificio delli precitati Nuovi Lazzaretti; quantunque detta Polveriera venga riconosciuta del tutto dannosa ad una Fabbrica, allorchè di Essa l'intendesse farne uso col Deposito delle Polveri, chè in un disgraziato Caso d'Incendio delle Polveri, sicuro



sarebbe la totale rovina del menzionato Edificio attesa la situazione Locale di detta Polveriera La quale è stata formata più per Decorazione che per bisogno del medesimo Baluardo. Passiamo ora a parlare di quelle chi à misura de Tempi è accaduto relativamente all'enunciata Polveriera. Allorchè nell'Anno 1768 la S: Sede dovette armare e presidiare con Nove Truppe la Fortezza di Ferrara contro le pretese Aggressioni contro li Modenesi, venne qui l'opportunità di doversi ricevere dalle Fabbriche dello Stato un Quantitativo Polveri per mero Deposito per poi farle passare nella Città di Ferrara; di maniera chè il Sig.re Marchese Marc'Antonio Mancinforte Sperelli in allora Gover.re delle Armi, residente in Ancona su formale istanza al Conte Antonio Ferretti, Sopraintendente delli Nuovi Lazzaretti, di volergli permettere di far uso della menzionata Polveriera, affine di depositarvi una data quantità di Polvere, che si attendeva dalle fabbriche della Città di Fabriano. In vista di che il divisato Sopraintendente investitori delle circostanze del Principato non solo fior? si mostrò renitente all'Istanza ma anzi diede tutti quegli ordini corrispondenti per il buon servizio del Principe, di maniera che né riportò da quell'odierno Monsi Gio. Angelo Braschi tutta l'approvazione come alla di lui lettere che si ritrova in filza a parte sotto data 31 Agosto 1768. Per lo spazio di pochi giorni comparve lettera assai forte e precettiva? diretta al nominato Gover.re delle Armi, perchè sul momento facesse rimuovere tutte le Polveri depositate ne' Magazzini delli Nuovi Lazzaretti, senza indugio ed intervallo di modo che il sudetto Gover. re delle Armi si portò frettolosamente di Persona dal sudetto Sopraintendente perchè ancor esso si prestasse con li di Lui Ordini a far liberamente rimuovere dette Polveri che non prima del giorno innanzi erano state depositate nel Magazzino superiore n. 5 di detti Lazzaretti e siccome l'enunciate Polveri si ritrovano racchiuse in Botti del Peso di migliara cinque l'una, così convenne precipitosamente farle trasportare sotto gli Archi delle Munizioni del vicino Baluardo detto di S. Lucia, fintantochè fu ritrovato sollecito Imbarco per Ferrara come fra non molto seguì. Si depositarono li enumerate Polveri nel di sopra indicato Magazzino perchè la descritta Polveriera è capace solamente per una ristretta quantità di Polveri e che questa si ritrovi racchiusa in piccoli Barrili e non in Botti

perchè le porte e siti della sudetta Polveriera sono angusti e non capaci di ricevere in Botti del peso di più migliaia; oltre di chè ritrovandosi il livello del Mare è sempre molto umida e non atta certamente ad un tale uso. Li motivi che in detto tempo indussero la Segreteria di Stato ad ordinare la pronta rimozione di tali Polveri in vista di molti fondati ricorsi ricevuti per parte del Collegio ed Consoli residenti in Ancona come per parte del Ceto de Negozianti et ambi con infinite vere e solide ragioni.

## **A.2. Annotazioni parziali dall'Archivio Comunale di Ancona (ACAN)<sup>28</sup>**

*Antico Regime, II, Ufficio di Sanità, 2 (Libbro preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica dei nuovi lazzaretti)*

17 r.

*Bagno della Cera e Suo Uso*

Sullo spanditore da parte del Ponte Canocchia si trova il bagno delle Cere, cioè un “seclusorio di acqua marina” introdotta tramite una cataratta che con le onde tiene le acque in movimento per evitare il “puzzore” dell’acqua stagnante. Contiene sempre “mezz’omo di acqua” in modo che l’acqua possa coprire le balle o colli di cera che devono sempre rimanervi 48 ore.

Il Bagno delle cere viene usato anche per volatili e altri quadrupedi che vengono fatti passare più volte in acqua.

30 v.

*Abitazioni*

La camera del custode è a destra dello scalone principale e ha il numero 9.

---

<sup>28</sup> Le annotazioni riportate in questa appendice appartengono ad alcune carte archivistiche di cui non si hanno le trascrizioni integrali.

62 r.

*Cisterna e sistema di raccolta delle acque*

La cisterna è considerato l'elemento più importante e ben riuscito del lazzeretto anconetano. Può contenere fino a "barili romani trentaseimila di boccali 36 per ogni barile" (circa 2.050 metri cubi, ogni barile contiene 57 litri circa). È situata sotto il tempietto di San Rocco e raccoglie l'acqua solo dai tetti dei magazzini. L'acqua invece che cade dai tetti delle abitazioni e nella piazza non viene raccolta ma passa direttamente al mare perché considerata potenzialmente contagiosa. Ci sono due pozzi nella piazza ai lati del tempietto.

74 r. - 76 v.

*Abitazioni*

Vanvitelli girò diversi porti Italiani per vedere esempi di diversi lazzeretti. L'esempio anconetano è una figura pentagona con un baluardo esterno, otto cannoniere a pelo d'acqua, un quartiere per i soldati e una polveriera. Sono presenti quattro porte dette portelle: la maggiore verso la città con un ponte, la seconda verso il mare dove si ricevono le merci in contumacia e i contumaci, le altre due svolgono medesima funzione e sono chiamate "portelle degli orecchioni". Sono presenti cinque garrette nel caso ci fosse stato bisogno di armare il lazzeretto. Alla quota del piano terra esternamente al Lazzeretto ci sono cinque strade dette spanditori su cui all'occorrenza si possono spandere le merci. Al piano sottostante si trovano otto stradoni interni che portano a tredici magazzini dalla piazza. Sulla piazza del cortile interno affacciano trenta porte che corrispondono ad altrettante abitazioni. Ciascuna di queste ha una cantina (presenza di un comodo), una camera al piano terra con camino e acquaio (sciacquatore). Al piano superiore delle abitazioni sono presenti finestre con vetri e scuri (cinquanta finestre che si aprono sulla piazza). La cappella del Tempio era chiusa da vetrate e sull'altare vi era posizionata una pala con Madonna, Bambino e San

Rocco. La fabbrica sacra è stata costruita con calce e pozzolana, ornata di pietra d'Istria e la cupola ricoperta di lamine di piombo.

129 r. - 131 v.

I tetti delle camere attorno alla piazza sono troppo orizzontali e ristagna acqua per cui i controsoffitti delle camere vengono sostituiti da canne a tavolato. Sui tetti dei magazzini vi erano dei canali aperti in piombo e "conserve" in piombo per poi andare nella cisterna sotto la piazza.

110 v.

#### *Magazzini*

Ci sono ventisei magazzini. Primo "ripiano" ci sono 13 magazzini a volta viva con pavimenti di selciato e con rastellate che li chiudono. Secondo "ripiano" al livello della piazza ci sono 13 altri magazzini identici agli altri. Tetto a vista, pavimenti mattonati, larghi e grandi finestroni senza vetri ma solo scuri. Ogni magazzino ha camino, acquaio, e comodo (luogo comodo) in modo che possano essere utilizzati dai contumacianti.

150 r. - 151 v.

#### *Il cimitero*

Ci sono due fosse, situate dal lato del ponte canocchia dalla parte di ponente. Le fosse dividono le quattro cannoniere. Una fossa è per i cattolici e una per i turchi e gli infedeli. La posizione è più conveniente perché sono fuori dal fabbricato interno. In uso fino al 1755. Nuovo cimitero da parte della fortezza maggiore sullo spanditore.

## **B. Commenti alle trascrizioni archivistiche**

### **B.1. Commenti alle trascrizioni dall'Archivio Comunale di Ancona (ACAN)<sup>29</sup>**

#### *Cisterna e Cisterne situate nella Piazza del Lazzaretto*

La presenza di sorgenti d'acqua naturali e la possibilità di immagazzinarne grandi quantità era di fondamentale importanza per un istituto di quarantena. L'importanza data alla presenza di acqua non era solo dovuta al grande numero di passeggeri tenuti in quarantena e alle loro necessità, ma anche per mantenere un ambiente salubre e privo di miasmi. Infatti, le teorie mediche sulla peste dell'epoca assegnavano ai cattivi odori un ruolo fondamentale nell'origine e diffusione delle epidemie. In edifici come i lazzaretti, in cui si immagazzinavano molte merci considerate potenzialmente portatrici del contagio, era importante che l'ambiente fosse pulito e privo di miasmi. Inoltre, l'acqua era anche necessaria per pulire e disinfettare le merci. La presenza di pozzi, sorgenti, cisterne, canali per le acque reflue e sofisticati sistemi di distribuzione dell'acqua è comune in molti lazzaretti precedenti, contemporanei e successivi alla Mole Vanvitelliana. Vanvitelli, che visitò i lazzaretti di Venezia, Genova e Livorno prima di progettare il nuovo lazzaretto Anconetano, di fatti progettò con gran cura la cisterna e il sistema di raccolta e deflusso delle acque<sup>30</sup>. È importante notare come nel documento venga sottolineata la provenienza dell'acqua raccolta dalla cisterna: solo l'acqua proveniente dai tetti dei magazzini veniva immagazzinata nella cisterna, mentre l'acqua proveniente dai tetti dei passeggeri, potenzialmente contaminata, veniva scaricata in mare.

---

<sup>29</sup> I commenti alle trascrizioni sono a cura della Dott.ssa Marina Inì, vedi anche nota 15.

<sup>30</sup> Riguardo ai viaggi del Vanvitelli si veda Archivio di Stato di Roma (ASR), Camerale III, 193, Mastrino delle fabbriche di Ancona, citato in Bucciarelli, G., Mezzetti, C., Pugnali, F. (1979). *Il Lazzaretto di Ancona, un'opera dimenticata*. Ancona: Cassa di Risparmio di Ancona/Industrie Grafiche F.lli Anibaldi., 181, 197.

### *Magazzini delli Nuovi Lazzaretti*

La Mole Vanvitelliana era stata progettata e costruita per accogliere un gran numero di passeggeri in quarantena e, soprattutto, grosse quantità di merci provenienti dalla sponda opposta dell'Adriatico e dal Levante Ottomano. I 13 magazzini del piano terra avevano grandi arcate aperte mentre quelli al piano superiore grandi finestre poiché era importante lasciar arieggiare le merci in modo che si spurgassero e disinfettassero. Al piano terra, per impedire l'ingresso e la contaminazione di persone non autorizzate, i magazzini erano chiusi da 'restelli' cioè cancellate di legno. Il documento sottolinea come i 26 magazzini fossero dotati di latrina, camino e acquaio in modo da poter permettere ai guardiani e ai mercanti che lo volessero di passare la quarantena nei magazzini (per controllare il proprio carico e risparmiare sui costi di quarantena). Latrina e camino, oltre a espletare le ovvie funzioni, erano anche di fondamentale importanza per mantenere l'ambiente privo di miasmi. La latrina allontanava ogni odore prodotto dai rifiuti umani mentre il fumo e il calore prodotto dal camino erano considerati dei correttivi dell'aria pestilente e quindi svolgevano un ruolo fondamentale nel mantenere un ambiente salubre.

### *Seppulture delli Contumaci*

Il lazzaretto, pur non essendo un ospedale ma un istituto dedicato alla quarantena di individui apparentemente sani ma potenzialmente infetti, aveva spazi dedicati alla sepoltura dei passeggeri, guardiani o altre figure dello staff. Infatti, chiunque morisse in lazzaretto, non solo di peste ma anche a causa di diverse malattie, incidenti o anche di parto, non poteva essere sepolto al di fuori. Infatti, il corpo poteva essere ancora potenzialmente contaminato a prescindere dal fatto che la morte fosse causata dalla peste o meno. I cadaveri venivano solitamente visitati da un medico per stabilire la causa del decesso (soprattutto per capire se ci fosse un'epidemia di peste in corso) e, solitamente, venivano seppelliti senza vestiti. All'interno delle mura del lazzaretto era comune avere fosse o spazi designati alla sepoltura di persone di diverse fedi.

Solitamente si differenziava, come nel caso di Ancona, in fosse per i Cattolici e in spazi dedicati agli Infedeli. Alcuni lazzeretti riservavano spazio anche per i Protestanti. La rimostranza dei mercanti Levantini (Ebrei) e la divisione delle fosse per diverse fedi (inclusi i ‘Turchi’) testimonia la varietà etnico-culturale presente nel lazzeretto e nella città di Ancona. Da quanto si evince dal documento, nella progettazione dell’edificio il Vanvitelli aveva deliberatamente posto il cimitero nel Baluardo in modo che fosse lontano dallo spazio abitato del lazzeretto e nascosto alla vista. Infatti, le sepolture potevano esalare miasmi considerati pericolosi e pestilenziali. Nel caso della rimostranza dei mercanti Levantini, il fatto che la posizione originale del cimitero fosse ben separata dai vivi era di vitale importanza poiché i cadaveri erano considerati impuri dalla fede ebraica.

#### *Polveriera Situata nel Centro del Baluardo delli Novi Lazzeretti*

Il documento testimonia come la polveriera progettata per il baluardo del lazzeretto non avesse un vero ruolo strategico ma piuttosto decorativo. Infatti, la muratura della polveriera viene sì considerata la più bella opera del lazzeretto ma la polveriera in sé viene definita troppo piccola e troppo umida per espletare la propria funzione. Probabilmente il Vanvitelli incluse la polveriera anche perché i due lazzeretti di Venezia, visitati durante i suoi viaggi, erano dotati di due maestosi caselli da polvere. Infatti, dopo l’esplosione nel 1568 di alcuni depositi di polvere in Arsenale, si decise di immagazzinare il pericoloso materiale in alcune isole della laguna, inclusi i due lazzeretti, più isolate e sicure rispetto alla posizione centrale scelta in precedenza.

## Appendice C: contenuti video

### C.1. Video della realizzazione del modello tattile della Chiesa di Santa Maria di Portonovo



Figura 54. Vista del modello 3D della Chiesa. Elaborazione in Autodesk Revit.



Scansionando questo QR-Code si viene reindirizzati verso il video della realizzazione del modello tattile della Chiesa di Santa Maria di Portonovo.



## C.2. Video della documentazione digitale del Palazzo Ducale di Urbino

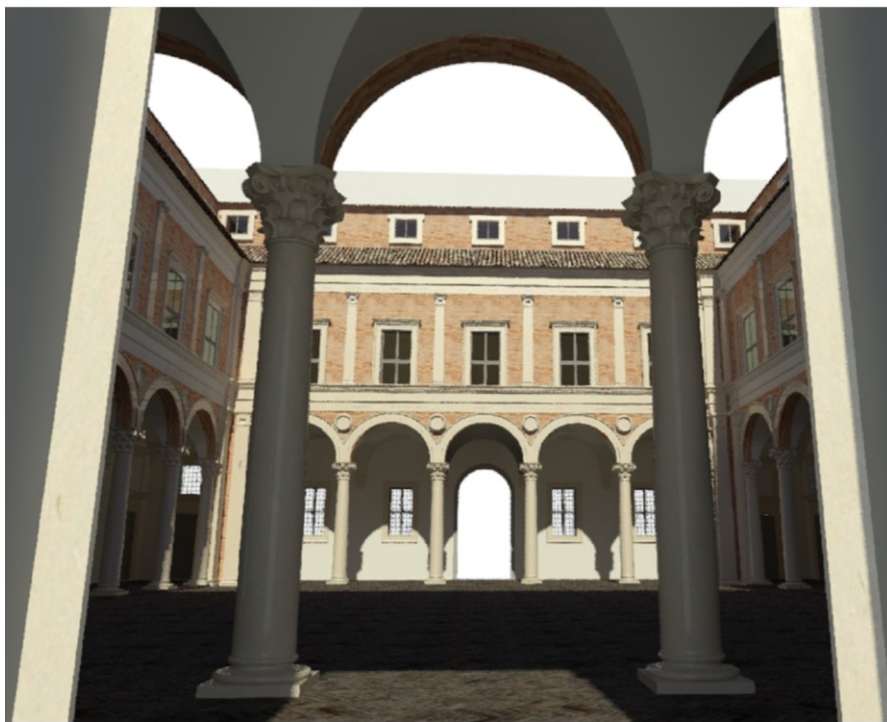


Figura 55. *Vista del Cortile d'Onore del Palazzo Ducale di Urbino. Elaborazione in Autodesk Revit.*



Scansionando questo QR-Code si viene reindirizzati verso il video della documentazione digitale del Palazzo Ducale di Urbino: dalla nuvola di punti al modello HBIM.