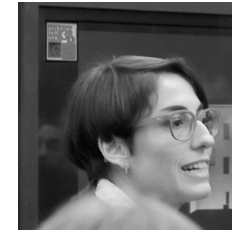


## Misura e Historical Information Building: sfide e opportunità nella rappresentazione di contenuti 3D semanticamente strutturati

### *Measurement and Historical Information Building: challenges and opportunities in the representation of semantically structured 3D content*

Nell'ambito della modellazione 3D e nella gestione degli edifici storici, soprattutto se di elevato valore culturale e architettonico, l'utilizzo del BIM costituisce ad oggi una interessante sfida. In particolare nella modellazione reality-based è utile sviluppare metodi semplici ma che garantiscano comunque accuratezza, precisione e qualità di rappresentazione coerenti con i dati acquisiti. Il presente lavoro mira a dimostrare la fattibilità di un approccio HBIM globale, presentando e comparando due casi studio. I risultati mostrano di aver ottenuto un vero collettore di dati e attributi significativi per la conoscenza e la conservazione dell'architettura storica, generandone una condizione facilitata. Lavori simili facilitano la diffusione dell'HBIM per gestire il processo di rilievo e restauro delle fabbriche storiche.

*The possibility of applying the BIM approach is an interesting challenge in the framework of 3D modelling and management/enhancement of historic buildings, especially high cultural and architectural value. A big challenge in reality-based modelling is to develop simple methods to get HBIM models for cultural heritage, that guarantee accuracy, precision and quality of representation compliant with the acquired data. The present work, dealing with two cases study, highlights the feasibility of a whole approach and opens the way for the development of centralized HBIM that can be used as complete data set of information on all disciplines, in particular for the heritage restoration and preservation, but also for its dissemination and exploitation. Similar methods facilitate the HBIM diffusion for the management of survey and restoration processes of historic buildings.*



#### Ramona Quattrini

Ricercatrice a tempo determinato ICAR/17 presso il DICEA dell'Università Politecnica delle Marche, dal dicembre 2012. Dottore di ricerca, si occupa di rilievo e tecnologie multimediali di comunicazione del patrimonio culturale e architettonico. Autrice di più di 50 pubblicazioni tra cui una monografia, revisore e co-autore diversi articoli su rivista internazionale.



#### Paolo Clini

Professore Ordinario ICAR/17 al DICEA-Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura dell'Università Politecnica delle Marche, dove insegna Rilievo e Storia dell'Architettura al corso di Laurea in Ingegneria Edile Architettura. E' Coordinatore Scientifico del Centro Internazionale di Studi Vitruviani sullo studio, analisi e comunicazione dell'architettura classica e antica.



#### Romina Nespeca

Assegnista di Ricerca dell'Università Politecnica delle Marche. Lavora sui temi dell'indagine e del rilevamento con particolare attenzione al trattamento della nuvola di punti per un rilievo integrato, finalizzato al restauro, alla conservazione e alla visualizzazione del Cultural Heritage.



#### Ludovico Ruggeri

Dottorando dell'Università Politecnica delle Marche, nel curriculum Ingegneria Civile, Edile e Architettura. Lavora sui temi del rilevamento fotogrammetrico con particolare attenzione alla visualizzazione e alla comunicazione del patrimonio culturale con applicazioni di realtà virtuale e immersiva.

**Parole Chiave:** 3D semantico; HBIM; valutazione qualità; rilievo; arricchimento dati

**KeyWords:** semantic 3D; HBIM; quality assessment; survey data; data enrichment

## INTRODUZIONE

Nell'ambito della modellazione 3D e nella gestione/valorizzazione degli edifici storici, soprattutto se di elevato valore culturale e architettonico, la possibilità di applicare l'approccio BIM (Building Information Modeling) costituisce ad oggi una interessante sfida. Il BIM è diffuso e maturo per le nuove costruzioni o anche per l'esistente, in caso di edifici moderni, garantendo di controllarne tutte le fasi del ciclo di vita. Una questione aperta è invece l'integrazione di sistemi BIM e basi di dati applicata al patrimonio storico-architettonico, per abilitare la creazione di sistemi di conoscenza e di gestione 3D low-cost e interoperabili.

Una sfida d'elezione nella modellazione reality-based è quella di sviluppare metodi semplici per ottenere modelli BIM per i beni culturali, che garantiscano comunque accuratezza, precisione e qualità di rappresentazione coerenti con i dati acquisiti. Il presente lavoro mira a dimostrare la fattibilità di un approccio globale in ambiente BIM, anche per forme architettoniche complesse a partire da acquisizioni laser scanner terrestri e rilievo tradizionale. Un punto forte del metodo seguito è di lavorare in ambiente 3D lungo tutto il processo e sviluppare la semantica del modello durante la sua fase di costruzione. La strutturazione semantica del modello e delle sue parti, caratteristica imprescindibile per un HBIM, verrà analizzata nel presente lavoro verificando ontologie preesistenti e protocolli di conversione ed eventualmente proponendo classificazioni specifiche. Questo consentirà l'arricchimento del modello con dati e informazioni non geometrici, quali notizie storiche, analisi del degrado o delle deformazioni, livelli di dettaglio non concessi dal modello completo. Il lavoro di ricerca si articola su due casi studio, differenti per qualità dei dati di rilievo, per caratteristiche e complessità intrinseche delle architetture stesse ma anche per natura dei dati da collezionare a corredo.

## STATO DELL'ARTE

I siti del patrimonio culturale e il nostro patrimonio architettonico di pregio e di carattere storico necessitano di modelli 3D ad alta risoluzione per ottenere un significativo valore aggiunto dalla loro digitalizzazione. Questi modelli sono sempre più disponibili, anche con tempi brevi e risorse limitate, grazie al rapido progredire tecnologico nel campo delle acquisizioni e delle metodiche basate sul laser scanner e/o fotogrammetria

(Barazzetti, Fangi, Remondino, & Scaioni, 2010). Alcuni autori hanno contribuito a costruire un robusto stato dell'arte nella acquisizione laser scanner e nell'utilizzo dei dati laser per l'analisi architettonica (Bianchini & Senatore, 2011) anche sfruttando la nuvola di punti come prodotto finito (Clini, Nespeca, & Bernetti, 2013). Altri hanno lavorato sullo sviluppo di modelli digitali per l'architettura storica, specialmente focalizzandosi sull'acquisizione tridimensionale e il controllo metrico dei modelli da utilizzare all'interno di geo-database (Gaiani, Apollonio, Clini, & Quattrini, 2015) o piattaforme web-based (Battini, 2009).

Quest'ultima prospettiva ha aperto la discussione sui 3D GIS e la semantica dei modelli: questo concetto, inoculato e mutuabile dalla filosofia dei BIM, è sicuramente da potenziare quando ci si occupa di ricerca per l'HBIM. L'utilizzo del BIM infatti forza alla costruzione semantica del modello digitale, non solo come mezzo per generare l'edificio tridimensionalmente, ma come un sistema cognitivo (Apollonio, Gaiani, & Sun, 2013.) Poiché la standardizzazione delle procedure per la modellazione BIM di edifici storici è da considerarsi a tutt'oggi una sfida, molti lavori si sono recentemente occupati di creare librerie parametriche per l'architettura storica e di validare metodi per la modellazione veloce ed efficiente di facciate di edifici (Dore, 2014)

o di interi edifici (Oreni, 2014) (Quattrini, 2015). Alcuni studi si sono concentrati sulla definizione dei livelli di dettaglio più opportuni (level of detail, LOD) (Fai, 2014), altri sull'estrazione automatica delle features (Barazzetti L. B., 2015). In letteratura si osserva per la maggior parte una modellazione HBIM con diversi passaggi e semplificazioni bidimensionali: tutti i flussi di lavoro adottati utilizzano diversi software per le necessarie conversione dei formati. Interessanti sviluppi, soprattutto per l'archeologia e l'architettura classica e rinascimentale sono quelli ottenuti considerando le analogie tra la strutturazione tridimensionale di un BIM e le costruzioni concettuali desumibili dai trattati (Apollonio F. I., 2012). Questi sono particolarmente rilevanti soprattutto per il caso studio relativo a Palazzo Ferretti, qui presentato.

L'approccio BIM è molto performante per gli edifici moderni, essendo ormai in grado di controllare tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio. Un'indagine completa (Volk, 2014) sull'uso BIM in edifici nuovi o esistenti (Figura 1), dimostra l'esistenza di opportunità stimolanti che derivano dalla automazione dei processi e dall'adattamento del BIM alle esigenze degli edifici esistenti, grazie al veloce sviluppo delle piattaforme e alla diffusione di standard che garantiscano interoperabilità. La realizzazione di HBIM, non solo relativi al patrimo-

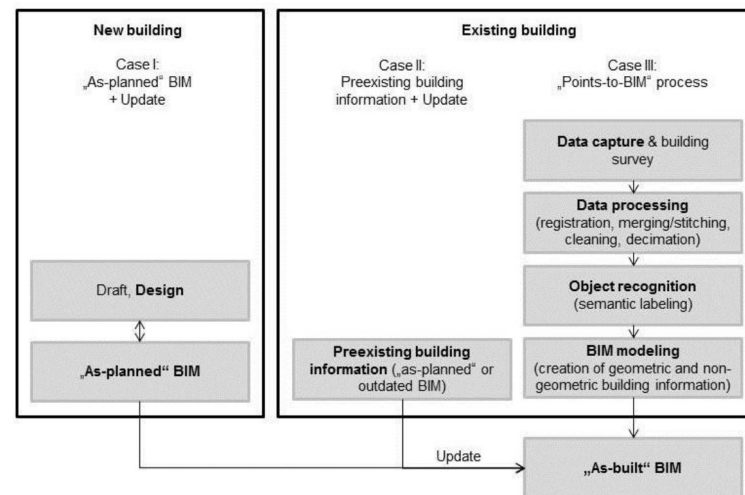


Figura 1 Il processo di creazione del BIM per edifici nuovi e esistenti, tratto da Volk, 2014 (vedi bibliografia)

no esistente ma funzionanti come reali contenitori di tutte le informazioni utili, è consentito oggi dalla quasi totalità delle piattaforme di BIM authoring più diffuse. Esse garantiscono ottima compatibilità con i formati 3D provenienti da rilievo, abilitando una fase di rappresentazione e gestione dei componenti e delle geometrie sufficientemente agile e sviluppata. Nuove ricerche e apporti invece sarebbero ancora utili, in ambito di gruppi interdisciplinari, per la creazione e condivisione di ontologie dedicate all'architettura storica nella corretta identificazione e rappresentazione degli oggetti costituenti il modello nonché agli strumenti (owl/ semantic web/ xml/bimQL) che permettano di editare, scrivere e visualizzare il data enrichment (Wiet

& Beetz, 2013). Gli scambi di dati sono possibili sia direttamente che tramite formati (proprietary e non). In particolare l'IFC (Industry Foundation Classes) è il formato di scambio non proprietario dominante tra i software dell'industria delle costruzioni. È stato sviluppato per facilitare il trasferimento dei dati tra software di modellazione BIM (ad esempio Autodesk o Bentley), i viewer IFC e applicazioni software di altri ambiti e specializzazioni (Schevers H., 2007). Gli scambi di dati tra la sorgente e il software di ricezione e l'interoperabilità dei prodotti BIM alle diverse fasi sono ancora limitati a causa di traduzioni incomplete, ambigue o a senso unico. La maggior parte delle applicazioni sono ancora limitate alla ricerca e al mondo accademico.

In generale le prospettive di ricerca attese nell'ambito dell'HBIM per i prossimi anni sono lo sviluppo di tutta la filiera di gestione del manufatto architettonico all'interno di un unico ambiente centralizzato e parametrico: dalla fase di rilievo e conoscenza alla fase di cantiere, restauro e/o manutenzione, potendo creare precondizioni ed elaborati per la comunicazione e valorizzazione del patrimonio costruito, finanche in ambienti di realtà virtuale e/o aumentata (Figura 2).

#### MODELLAZIONE HBIM DA RILIEVO

Con il termine HBIM (acronimo di Heritage o Historic Building Information Modeling) si intende un nuovo approccio alla modellazione di edifici storici, volto allo sviluppo di modelli BIM partendo da dati di rilievo "remotely sensed" (Murphy, McGovern, & Pavia, 2009). Discende dunque da questa definizione, ma anche e soprattutto dall'approccio metodologico che nell'ambito delle discipline della rappresentazione va garantito, la centralità dell'accuratezza della restituzione 3D così come l'aderenza alle caratteristiche intrinseche dell'oggetto d'architettura che attraverso il modello HBIM si voglia gestire.

Alla luce di questo approccio, due casi studio vengono esposti e analizzati nel presente articolo: da un lato la modellazione in ambiente BIM della Chiesa di Santa Maria di Portonovo a partire dal modello numerico completo a nuvola di punti, dall'altro il modello dell'ala rinascimentale di Palazzo Ferretti ad Ancona, ottenuto in Revit da documentazione TLS (terrestrial laser scanner) e rilievi bidimensionali.

Nel primo caso, l'obiettivo principale è stato quello di garantire la miglior qualità geometrica del modello HBIM senza perdere l'accuratezza del rilievo iniziale. Per validare il modello è stata quindi effettuata una comparazione tra modello Revit e nuvola, ottenendo risultati ampiamente soddisfacenti. Alla valutazione di qualità del modello globale è seguita la verifica delle ontologie ipotizzate in fase di modellazione.

Nel secondo caso, trattandosi di un edificio classico, oltre alla coerenza globale del modello BIM con i dati geometrici, si è voluto indagare un processo di rappresentazione di modanature classiche attraverso la modellazione parametrica. Solo in questo modo sarebbe stato possibile generare un modello in ambiente BIM rispettoso delle peculiarità precipe dell'edificio e che aiutasse la valorizzazione e lettura corretta. In questo

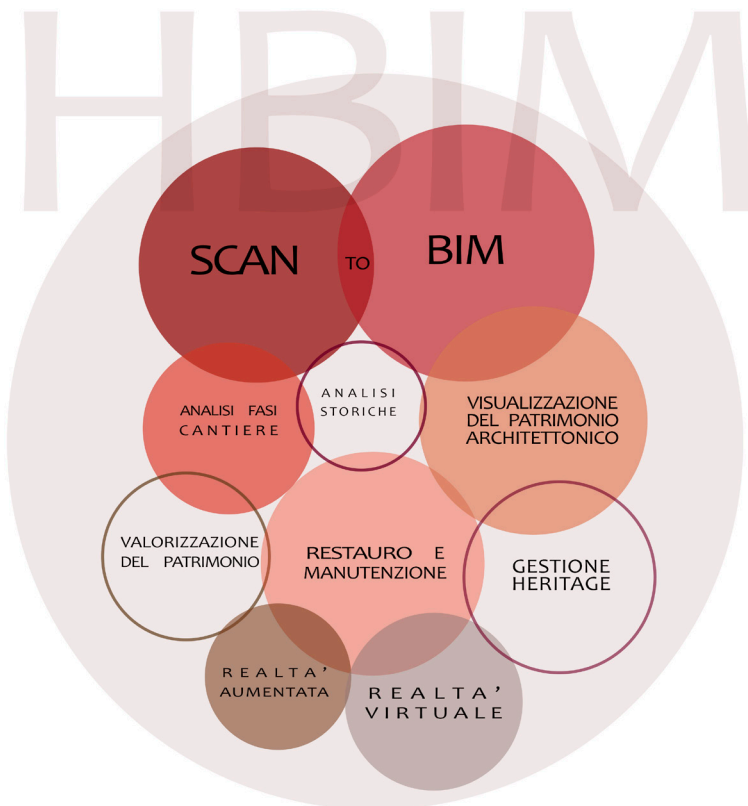


Figura 2 L'approccio HBIM: verso una gestione centralizzata delle informazioni dal rilievo/conoscenza alla modellazione fino alla conservazione/valorizzazione

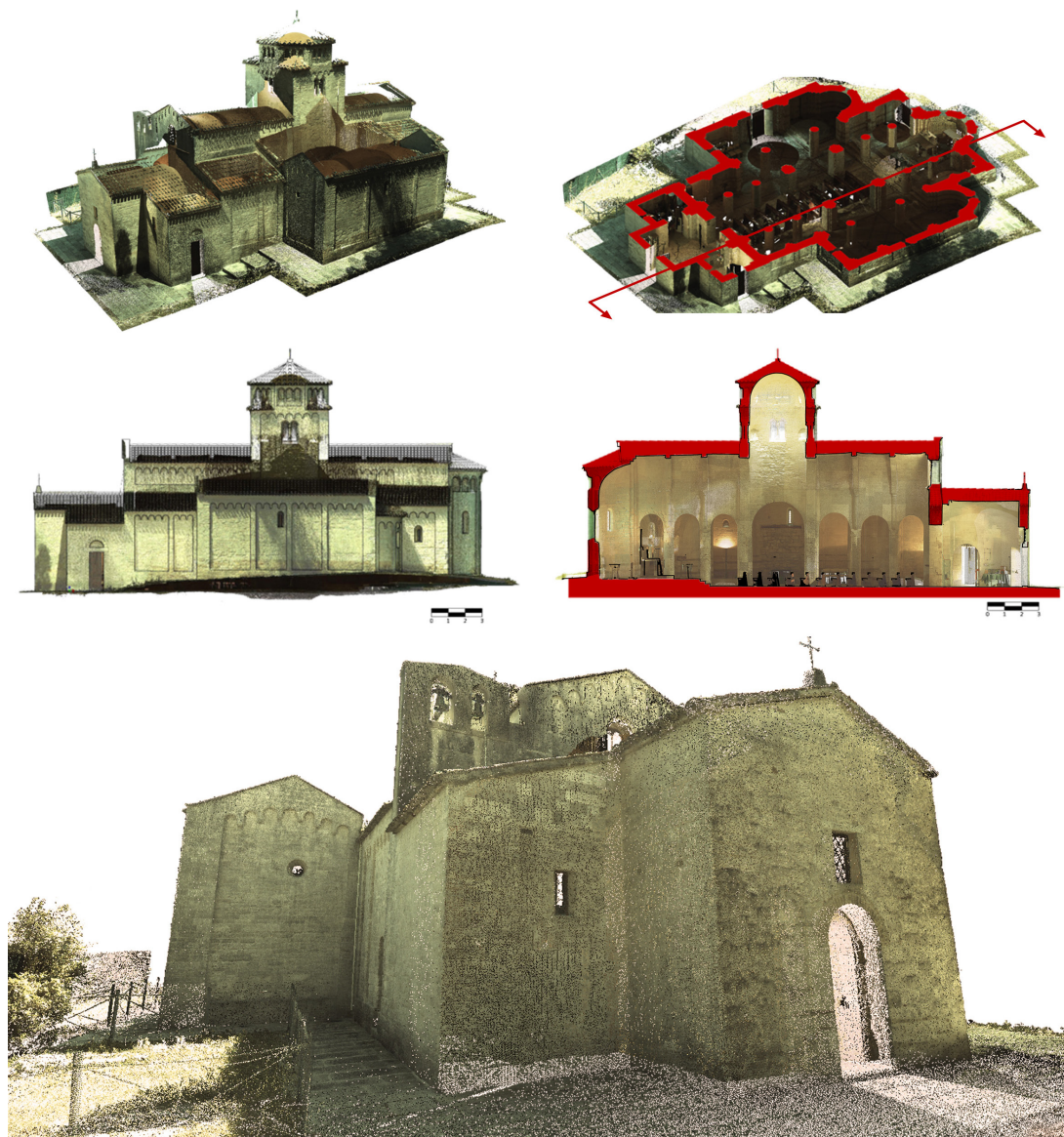


Figura 3 La nuvola di punti da acquisizione TLS della Chiesa di Santa Maria di Portonovo

caso quindi particolare attenzione è stata posta alla analisi degli ordini e delle forme degli elementi decorativi, applicando geometrie e gerarchie in osservanza alla trattatistica.

#### IL CASO STUDIO DI SANTA MARIA DI PORTONOVO

Il rilievo laser scanning della chiesa di Santa Maria di Portonovo è stato eseguito con il laser scanner Leica C10 effettuando 34 scansioni e 33 stazioni. Le scansioni sono state poi allineate manualmente cloud to cloud e tramite l'algoritmo iterativo ICP ottenendo una nuvola di punti finale composta da 416 mln di punti con uno scarto quadratico medio (RMS) di allineamento di 0,01 m (Figura 3).

La nuvola di punti 3D, dopo la fase di pulizia e decimazione, si è dimostrata un ottimo punto di partenza per il caso studio, senza artefatti o significative mancanze di dati: questo database è in grado di fornire tutte le informazioni (geometria, materia e colore) per l'ulteriore sviluppo BIM.

Una prima sfida è quella di evitare un modello troppo semplificato rispetto alla morfologia reale degli oggetti. Infatti, quando i componenti sono generati da morfologie esistenti, devono essere introdotte astrazioni notevoli nei modelli BIM. Al fine di verificare l'affidabilità e la facilità d'uso di una metodologia di elaborazione della nuvola di punti in un ambiente BIM con elevata precisione, abbiamo sviluppato una procedura per l'intero complesso architettonico di Portonovo in Revit 2014.

Il nostro approccio costruisce il modello direttamente in place sulle nuvole di punti, minimizzando il numero di passi, evitando di perdere accuratezza, qualità dei dati e dettagli. Revit, grazie allo strumento ReCap incorporato, mostra anche la nuvola di punti in ogni vista. In questo modo non è necessario semplificare l'edificio con le slice da nuvola di punti, né è necessaria una modellazione inversa (Figura 4).

Alcuni oggetti sono stati creati utilizzando i comandi di base del menu di Revit. Altri invece sono stati creati esternamente come famiglie e poi importati nel modello. Gli elementi più complessi sono stati modellati all'interno del software attraverso operazioni B Rep. Inoltre per alcuni elementi sono stati creati oggetti parametrici che potranno essere riutilizzati per architetture simili.

Le misure sono state estratte dalla nuvola di punti e il

modello 3D è stato costruito in millimetri, secondo il sistema di coordinate della nuvola di punti.

Le pareti sono state create con lo strumento "Architettura". Lungo il muro perimetrale esterno ci sono diverse nicchie, tipiche dell'architettura romanica, costruite come famiglia locale ed ottenute come estrusioni vuote.

Alcuni elementi sono stati anche parametrizzati, ad esempio alle colonne sono state assegnati i parametri di altezza, la dimensione della base e del fusto e il numero di riseghe (con il relativo spessore). Questo è un elemento parametrico molto importante per l'architettura medievale. Questa procedura apre un ulteriore sviluppo: la connessione delle proporzioni tra gli elementi già modellati. Anche le basi e i tori sono stati modellati esternamente come nuove famiglie.

La morfologia del capitello è piuttosto semplice in quanto è un capitello a cuscinetto, tipico dell'architettura romanica. Abbiamo scelto di modellarlo con la famiglia "Colonna metrica" come una piramide tronca a base quadrata a cui abbiamo sottratto quattro sfere agli angoli della base inferiore.

Le volte costolonate mostrano diversi problemi in fase di modellazione; per questo motivo abbiamo deciso di dividere la volta e il costolone e di collegarli successivamente grazie al plugin Protégé.

Gli archi e i costoloni sono stati modellati come masse, cosa che ha permesso il cambio di linee di contorno. In questo modo abbiamo realizzato archi e volte ogivali o ribassati o a tutto sesto. Le volte a botte sono state ottenute dagli "Elementi speciali" sottraendo due volte tra loro.

Un punto molto forte era quello di ottenere una buona geometria che descrivesse le volte a crociera in quanto esse hanno una generatrice non orizzontale e le direttrici non sono perpendicolari.

Gli algoritmi che gestiscono le intersezioni all'interno del software Revit non sono sufficientemente robusti per forme così irregolari, quindi per risolvere questo problema sono stati creati quattro solidi con quattro solidi di sottrazione generando però alcuni artefatti dovuti ad errori nelle operazioni booleane. Non essendo stati in grado di parametrizzare questo tipo di volte, esse sono state adattate ad ogni campata.

Nella costruzione del modello 3D, una prima partizione semantica è stata realizzata utilizzando le famiglie e le classi da Revit: la famiglia si riferisce a modelli con

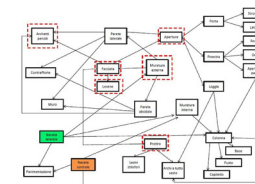
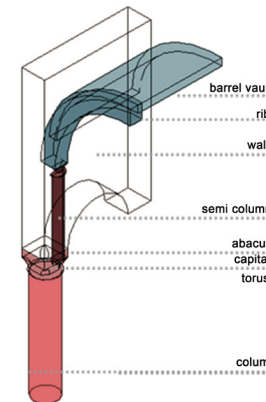
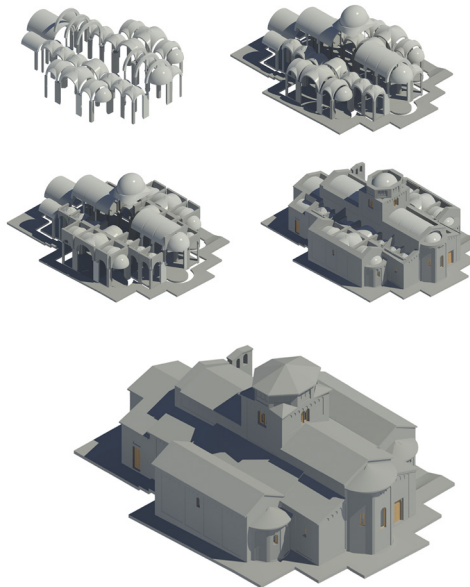
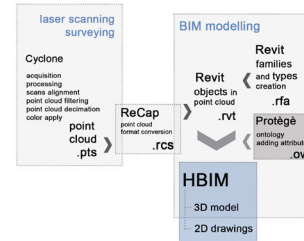
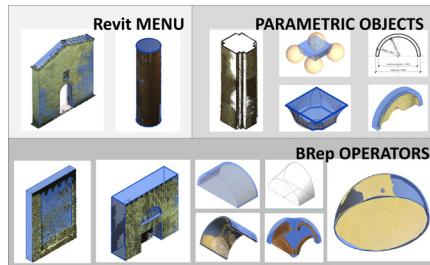
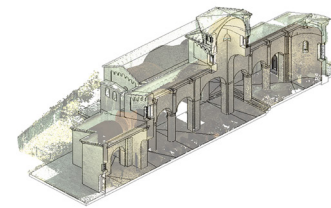


Figura 4 La modellazione HBIM effettuata direttamente sulla nuvola all'interno del sw Revit. Esempi di oggetti parametrici e filiera di modellazione/gestione semantica

Figura 5 La strutturazione semantica del modello HBIM della Chiesa di Portonovo

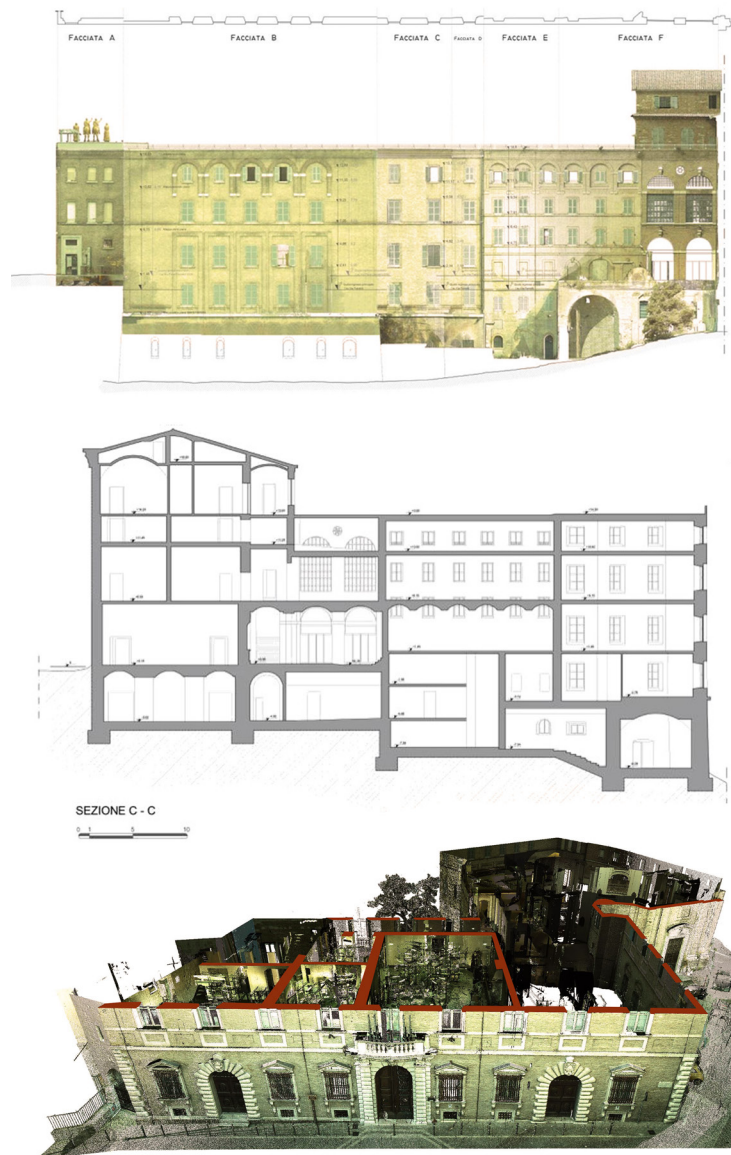


Figura 6 Rilievo laser scanner di Palazzo Ferretti: sviluppo tramite ortofoto da nuvola di punti delle facciate ovest, sezione e vista prospettica del modello a nuvola di punti

strutture parametriche uniche e può consistere in un insieme di classi con dimensione diversa; il singolo pezzo è invece chiamato istanza. Nella seconda fase abbiamo studiato le relazioni tra le istanze e le classi; i rapporti possono essere orizzontali o gerarchici. L'ontologia della chiesa, che è il sistema concettuale delle informazioni relative al modello geometrico, è una precondizione per le informazioni di connessione, come ad esempio le regole di costruzione delle volte, i tipi di costoloni, le varie decorazioni dei capitelli. I vari dati sono stati graficamente assegnati a ciascun elemento (Figura 5).

#### IL CASO STUDIO DI PALAZZO FERRETTI

L'intera operazione di rilievo laser scanning è stata effettuata su un totale di 69 stazioni: 49 stazioni (per 58 scansioni) per il rilievo esterno dell'edificio e 20 stazioni e scansioni per il rilievo interno comprendente il piano terra e parte del piano primo. Tali scansioni sono state impostate a risoluzione di 1 cm a 100 m e 0,5 cm a 100 m nelle parti in cui si è scelto un infittimento della nuvola per ottenere un dettaglio maggiore. La nuvola di punti finale ottenuta con l'allineamento delle nuvole di tutte le 78 scansioni è composta da 1,2 miliardi di punti. Questa nuvola va poi ripulita delle parti superflue al rilievo e alla comprensione dell'edificio. Per l'allineamento delle nuvole esterne sono stati utilizzati dei target artificiali per un primo allineamento automatico e successivamente sono stati utilizzati algoritmi di surface matching, in particolare l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point) (Figura 6).

Per la prima parte della modellazione in Revit si è scelto di concentrarsi sull'ala rinascimentale del Palazzo Ferretti, ovvero la porzione di edificio con maggior copertura da rilievo considerando che si avevano a disposizione prese interne solo per il piano Nobile di quella ala.

Palazzo Ferretti fu edificato intorno al 1560 su commissione del conte Angelo di Girolamo Ferretti. Sebbene i disegni sembra siano stati forniti dal grande architetto Antonio da Sangallo il Giovane nel 1540, la costruzione venne realizzata venti anni più tardi da Pellegrino Tibaldi a cui venne affidato anche la complessa decorazione del palazzo, la realizzazione degli elaborati soffitti lignei intagliati e dipinti e delle fasce a fresco. A partire dal 1759 il palazzo subì importanti lavori di ampliamento, la cui progettazione si deve all'architet-

to Luigi Vanvitelli. Il palazzo è stato oggetto di diversi interventi di restauro nei primi anni '50 a seguito dei bombardamenti aerei e negli anni '70-'80 a seguito del terremoto del '72.

In una prima fase si è ipotizzato di seguire la stessa procedura di modellazione applicata al caso precedente, che avrebbe permesso il controllo della nuvola in ambiente 3D e senza necessità di avere licenze proprietarie di gestione dei formati point cloud. Tuttavia le limitate capacità di calcolo a disposizione dei tirocinanti coinvolti nella fase di modellazione hanno costretto a utilizzare gli elaborati bidimensionali, che erano stati comunque resi coerenti con la globalità del rilievo laser scanner.

La modellazione in ambiente Revit alla scala dell'edificio (Figura 7) ha evidenziato alcune complessità so-

prattutto nel caso di murature non perfettamente ortogonali tra loro e nella necessità di definire numerosi piani di riferimento, a causa di livelli interni sfalsati e presenza di controsoffitti di pregio, che necessitavano essere restituiti. La fase più onerosa ha però riguardato le modanature delle facciate principali con la realizzazione di famiglie caricabili (\*.rfa) per le quali sono state studiate semantiche e vincoli geometrici coerenti con la pratica del costruire e con le regole dei trattati (Figura 8).

#### ANALISI DEI RISULTATI E DELLE METODICHE

La valutazione qualitativa e quantitativa della precisione per il BIM 3D di Santa Maria di Portonovo è stata eseguita con il software open-source CloudCompare, utilizzando le nuvole di punti come riferimento. Il sof-

tware è in grado di confrontare la nuvola di punti (file di formato .pts) e il modello esportato da Revit (file di formato .obj).

L'intero modello è stato confrontato e presenta deviazioni minori di 9 cm per un valore del 86%, raggiungendo un livello di precisione con deviazioni di meno di 3 cm per un valore del 63%. Questi risultati sono soddisfacenti, considerando che sono inclusi nel computo della media anche elementi senza piani di riferimento certi (come i tetti) o elementi di rumore (come la vegetazione). Al fine di raffinare i risultati, abbiamo segmentato nuvola di punti e modello. Un altro modo per migliorare il confronto consiste nell'impostare una distanza massima per il calcolo, ma questo non avrebbe restituito considerazioni puntuali legate alla strutturazione semantica. Quindi il modello è stato separato, secondo le famiglie con cui era stato costituito, in diverse categorie (ad es.: colonne, pilastri, volte a crociera, a botte, pareti, tetti, ecc.) per la loro valutazione mirata. Le colonne e le volte sono adeguatamente modellate (con la distanza media di 0,05 cm e 0,01 cm). La cupola, avendo subito delle deformazioni, evidenzia scostamenti più elevati (distanza media 6,4 cm) rispetto al modello con generatrice ideale. Questa deviazione potrebbe verificarsi anche nella modellazione CAD, se non si applichino procedure di reverse modeling. L'analisi ottenuta è altresì uno schema tipico di deformazione, in grado di descrivere danni o cinematismi strutturali. Esso potrebbe essere collegato alla geometria come attributo della istanza in BIM e potrebbe diventare utile per tutti gli utenti del modello.

Le maggiori differenze riguardano la modellazione degli archetti ciechi dell'abside, a causa della mancanza di primitive curve nelle operazioni di sottrazione B-Rep. I risultati numerici sono riportati in tabella. La distanza media complessiva è di 1,5 cm, in altre parole otteniamo risultati di buona qualità per una percentuale elevata (Figura 9).

Per quel che riguarda il secondo caso studio, una valutazione qualitativa è stata condotta ancora all'interno di CloudCompare (Figura 10) ma senza attendersi precisioni elevate, data la consapevolezza della frammentarietà della filiera adottata. I risultati sono comunque soddisfacenti nel complesso. La distanza media tra il modello BIM e la nuvola di punti dell'intero Palazzo Ferretti è di 1 cm, con una standard deviation ( $\sigma$ ) di 16 cm, escludendo dal calcolo tutti gli elementi della

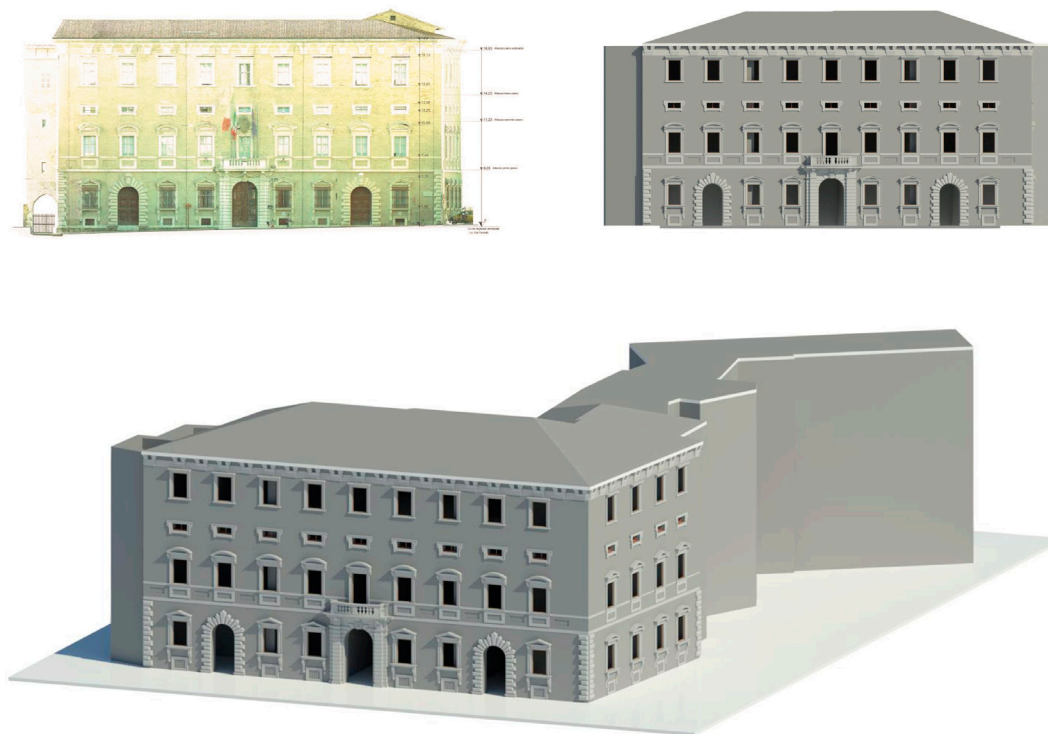


Figura 7 Modellazione HBIM di Palazzo Ferretti, confronto tra prospetto da rilievo TLS e prospetto da modello, vista assonometrica da Revit con ray-tracing

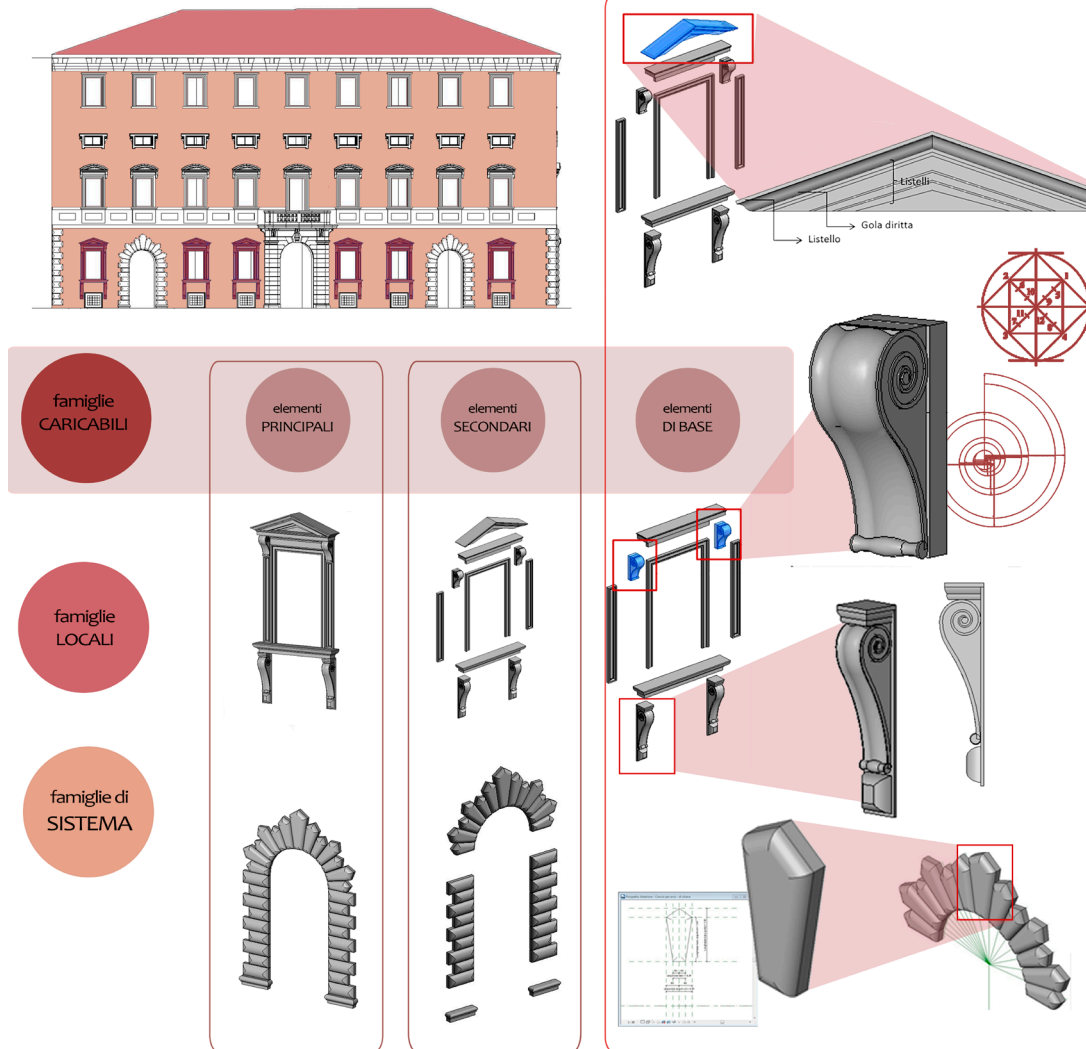


Figura 8 Modellazione parametrica tramite famiglie di sistema, locali e caricabili. Per queste ultime è evidenziata la scomposizione semantica e l'aderenza alle regole dell'architettura classica per geometria e nomenclatura

nuvola non modellati in ambiente BIM. È stata eseguita una ulteriore comparazione focalizzata sul prospetto est ottenendo una distanza media di 4 cm e  $\sigma$  di 7 cm. Gli esiti più significativi per il Palazzo Ferretti, relativi a questo step di lavoro, riguardano però, come già anticipato, la realizzazione delle librerie parametriche per le modanature esterne ed interne all'edificio.

Sono state definite infatti tutte le finestre a edicola, le cornici delle porte e le bugne, la balconata trionfale e tutte le cornici, con i relativi elementi di base e collegati semanticamente grazie alla nomenclatura delle parti e alla strutturazione insita in Revit. Questo costituisce un primo nucleo di una ontologia tipo per un edificio rinascimentale ai vari LOD. È in corso altresì il trattamento delle famiglie e l'esportazione in IFC (con codifiche IFC 2x2 e IFC 4x4) per verificare il mantenimento della struttura dati e la compatibilità con altri descrittori. Questo permetterà di valutare l'interoperabilità e la correttezza ontologica del modello esportando in formato IFC e analizzando il file di output per cogliere eventuali incongruenze o perdite di dati nel passaggio da ambienti di lavoro diversi. L'obiettivo infatti è quello di disporre di un file sorgente che sia accessibile a utenti di piattaforme diverse, facilmente editabile e visualizzabile, capace di trasportare metadati (quindi informazioni) arricchendosi delle stesse nel passaggio tra diversi operatori con competenze e specializzazioni diverse.

### CONCLUSIONI

Il lavoro qui presentato dimostra che è possibile sviluppare modelli 3D di alta qualità e semanticamente strutturati (semantic-aware) in grado di connettere i dati da rilievo geometrico con i database tematici descrittivi, quali quelli riguardanti le notizie storiche, gli interventi di manutenzione e/o restauro e le analisi sulla conservazione e il funzionamento strutturale della fabbrica. Questo apre la strada alla realizzazione di HBIM centralizzati che possano servire come set di dati completi di informazioni su tutte le discipline, in particolare per il restauro e la conservazione del patrimonio architettonico costruito, ma anche per la divulgazione e valorizzazione dell'architettura storica.

La strutturazione semantica del modello in ambiente BIM consente molteplici tipologie di arricchimento dei dati (data enrichment) sia a livello di categorie, di famiglie, di tipi e di singole istanze. L'analisi sull'interope-



abilità, garantisce varie possibilità di sfruttamento del modello e usabilità su diverse piattaforme con l'obiettivo di gestione a lungo termine del patrimonio culturale digitale e non solo.

L'obiettivo principale, raggiunto ad oggi nelle ricerche presentate, è una qualità elevata del modello 3D, combinando procedure efficienti di rappresentazione attraverso il Building Information Modeling con livelli di dettaglio complessi, a partire dalla misura e conoscenza del manufatto. La precisione geometrica ottenuta garantirà anche output di visualizzazione coerenti.

La qualità visuale e la ricchezza della rappresentazione sono indispensabili per una documentazione dettagliata e per ogni strategia di gestione in ambienti BIM per i beni culturali. Solo una volta garantiti questi aspetti, è possibile sviluppare strutture semantiche coerenti

ed efficienti, dal punto di vista tecnico/informatico ma anche di descrizione della fabbrica. Questo abilita poi procedure di gestione per determinare la corretta dei LOD (Level of Detail - Development) del rilievo e del modello.

Il nostro lavoro consente il pieno sfruttamento della precisione del laser scanner terrestre (TLS), poiché gli oggetti sono stati mappati sulla nuvola di punti in ambiente 3D, senza slice o con l'ausilio delle stesse solo per livelli di dettaglio coerenti.

Un obiettivo specifico del nostro approccio è stato inoltre quello di minimizzare i passi e le modifiche di formato lungo il processo di modellazione, per evitare la semplificazione o la perdita di informazioni. Il flusso di lavoro ottenuto e validato mostra alcuni miglioramenti rispetto ad altri in letteratura.

Abbiamo ottenuto una buona procedura per la modellazione parametrica a partire da dati laser, verificandone l'adeguatezza e validando il processo per due grandi monumenti. La valutazione della qualità del modello BIM ha dato in entrambi i casi risultati molto soddisfacenti: sia per la globalità dell'edificio che per singoli elementi più significativi. Sono stati valutati anche i disegni bidimensionali, estratti automaticamente dal modello di Revit: essi sono paragonabili sia alle slice dalla nuvola di punti che ad altri elaborati 2D precedentemente utilizzati per il restauro e la documentazione.

Inoltre, un altro obiettivo di successo nella nostra ricerca è quello di ottenere librerie parametriche di elementi architettonici, a partire da nuvole di punti o dall'indagine diretta tradizionale.

I modelli BIM ottenuti aprono a nuove interessanti prospettive di ricerca. Ad oggi servono come un insieme di dati che comprende informazioni complete e fornisce l'accesso alla gestione dell'esistente e a potenziali simulazioni di varie discipline. Per il futuro, proponiamo alcuni approcci da sviluppare in questo ambito:

a) la validazione delle ontologie studiate e realizzate, nella applicazione e gestione di ambienti interoperabili per il web semantico, soprattutto laddove si vogliono utilizzare database linked open data semantici per l'architettura e per i suoi contenuti. Questo è il caso specifico dello sviluppo previsto per il modello di Palazzo Ferretti, che dovrebbe permettere l'accesso non solo alle informazioni sull'edificio ma anche l'accesso ai reperti digitalizzati in esso contenuti.

b) lo sviluppo di ambienti collaborativi di BIM e di realtà aumentata (Augmented Reality) ad oggi uno standard per la visualizzazione del Cultural Heritage (CH) (Quattrini, Pierdicca, Frontoni, & Barcaglioni, 2016)

Di recente, alcuni studi stanno esplorando la comunicazione in tempo reale tra ambienti di realtà aumentata e BIM per la visualizzazione e il monitoraggio real time dei siti e degli edifici. Si prevede che la realtà aumentata possa svolgere questa funzione in modo efficace attraverso la visualizzazione del modello BIM nel suo contesto fisico.

In conclusione, una nuova metodologia per costruire un modello 3D semanticamente consapevole per architetture complesse è stato qui presentato. A partire da nuvole di punti da TLS, abbiamo ottenuto modelli HBIM di alta qualità, abbiamo effettuato la loro valu-

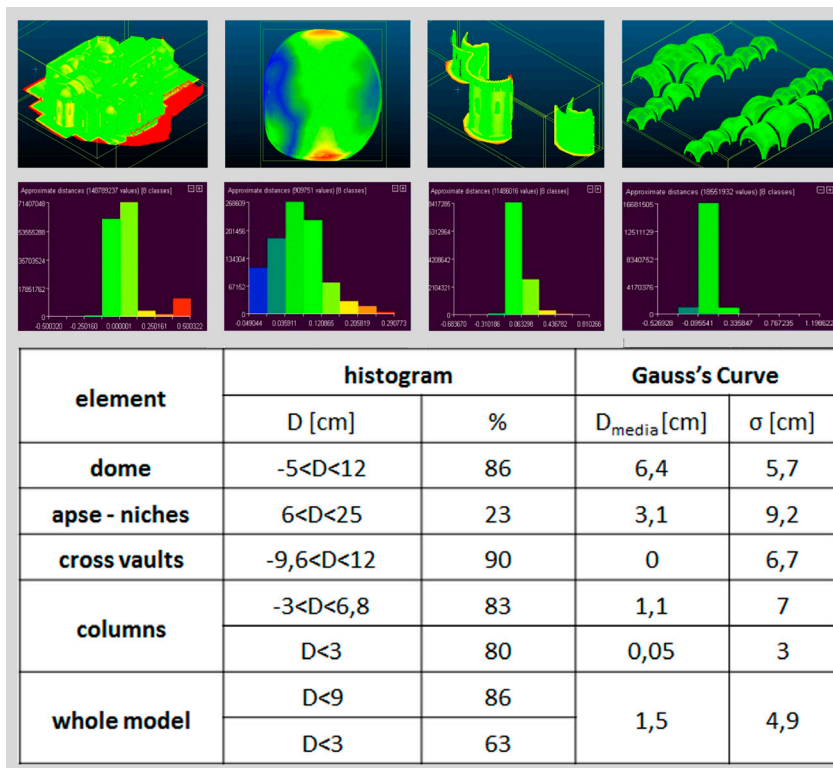


Figura 9 Valutazione di qualità per il BIM 3D di Santa Maria di Portonovo, comparazione della nuvola di punti con il modello esportato da Revit (sw. CloudCompare)

tazione e abbiamo creato le precondizioni per la loro gestione semantica. Questa ricerca promuove la diffusione HBIM: grazie allo sfruttamento della nuvola di punti, il BIM potrebbe diventare facilmente un ambiente in cui ottenere disegni tecnici completi per la conservazione della strutture storiche, compresa la documentazione 3D e le proiezioni ortogonali, ma anche collazionare tutte le altre informazioni e analisi (Figura 2).

In generale si riassumono i vantaggi che possono essere tratti dal BIM come quelli connessi principalmente al management dell'opera nel suo ciclo di vita, anche se parlando di edifici storici il concetto di "ciclo di vita" non è appropriato. Se consideriamo i dettati della European Charter of the Architectural Heritage, infatti il bene culturale è «espressione insostituibile delle diversità delle culture» ed il fine delle discipline

di conservazione è quello di «preservare l'estetica ed il valore del monumento» (ICOMOS, 1975), ne consegue che gli elementi che compongono l'architettura storica non sono solo artefatti fisici ma sono dotati di valori intangibili. Questi valori sono cruciali per rispondere alle domande "cosa", "perché" e "come" conservare. Necessariamente bisogna capire quale possa essere una metodologia efficace per strutturare le informazioni e quali possono essere le informazioni da collegare al modello e come effettuare questa operazione, valutandole caso per caso, ma il sicuro beneficio di disporre di un sistema informatizzato ed aperto di annotazione permette di cogliere l'opportunità di applicare i concetti di buona allocazione delle risorse derivati da un approccio di «conservazione programmata» (Della Torre, 2010).

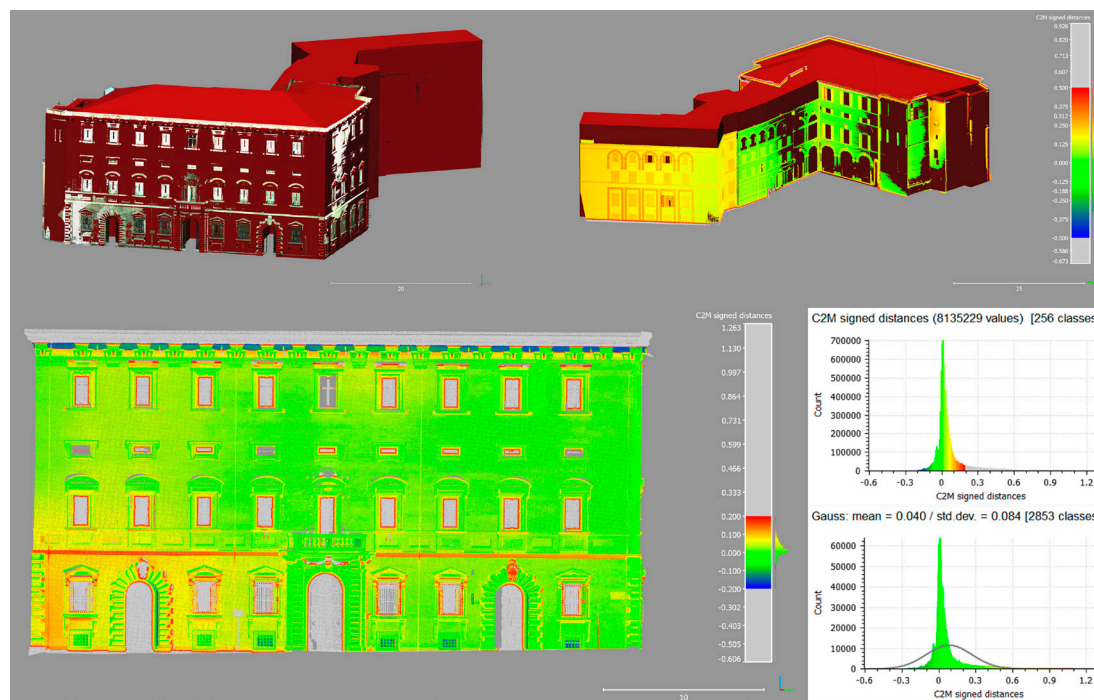


Figura 10 Valutazione quantitativa e qualitativa per il BIM di Palazzo Ferretti, comparazione della nuvola di punti con il modello esportato da Revit (sw. CloudCompare)

## NOTE

[1] L'IFC è definito nella norma ISO / PAS16739.

[2] Il rilievo laser scanner della Chiesa di Santa Maria di Portonovo è stato svolto dal Dip Dicea sez. architettura dai tecnici Luigi Sagone, Floriano Capponi e Giorgio Domenici, resp. Scientifico Paolo Clini, grazie alla gentile concessione del FAI (Fondo Ambiente Italiano) e della Soprintendenza ai Beni architettonici e Paesaggistici delle Marche.

[3] Il modello di Palazzo Ferretti è stato sviluppato in ambiente Revit nell'ambito delle tesi di laurea triennale di Fides Carosi, Valentina Carducci, Vincenzo Danzi, Marco Mattioli e Maria Laura Pierpaoli, tesi di laurea in Ingegneria Edile relatore Prof. Ramona Quattrini.

[4] In particolare gli autori vogliono ringraziare la Direttrice del Museo Nicoletta Frapiccini e tutto il personale per la collaborazione e il supporto messo a disposizione.

[5] Corso di Rilievo dell'architettura, Docente Prof. Paolo Clini, CUCS di Ingegneria Edile-Architettura, Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica delle Marche.

[6] Una volta create, le geometrie vengono vincolate ai piani di riferimento. Le quote che misurano le distanze tra un piano e l'altro sono associate ad un'etichetta che permette la parametrizzazione della famiglia in uso. Ad ogni etichetta può essere associata una formula a seconda dei vincoli noti o da imporre. Seguendo la semantica delle famiglie, il numero di grandezze parametrizzate sono decrescenti all'aumentare della categoria di famiglia.

## BIBLIOGRAFIA

Apollonio, F. I. (2012). BIM-based modeling and data enrichment of classical architectural buildings. *SCIRES-IT*, 2(2), 41-62.

Apollonio, F., Gaiani, M., & Sun, Z. (2013). 3D Modeling and Data Enrichment in Digital Reconstruction of Architectural Heritage. *ISPRS Archives*, 5, W2, 43-48.

Barazzetti, L. B. (2015). Creation of Parametric BIM Objects from Point Clouds Using Nurbs. *The Photogrammetric Record*, 30(152), 339-362.

Barazzetti, L., Fangi, G., Remondino, F., & Scaioni, M. (2010). Automation in Multi-Image Spherical Photogrammetry for 3D Architectural Reconstructions. The 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST.

Battini, C. (2009). 3D Web Survey: a new system to manage and view archaeological data. *Proceedings of the 14th International Congress Cultural Heritage and New Technologies*, (p. 273-281).

Bianchini, C., & Senatore, L. J. (2011). Metodi speditivi per la visualizzazione ed esplorazione interattiva di nuvole di punti. In *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*, Ricerca PRIN. Roma: Gangemi.

Clini, P., Nespeca, R., & Bernetti, A. (2013). All-in-one laser scanning methods for surveying, representing and sharing information on archaeology. *Via Flaminia and the Furlo tunnel complex. International archives of the photogrammetry, remote sensing and spacial information sciences*.

Della Torre, S. (2010). Conservazione programmata: i risvolti economici di un cambio di paradigma. Il

Capitale culturale - Studies on the Value of Cultural Heritage.

Dore, C. M. (2014). Semi-automatic generation of as-built BIM façade geometry from laser and image data. *ITcon*, 49, 20-46. Tratto da <http://www.itcon.org/2014/2>

Fai, S. R. (2014). Establishing an Appropriate Level of Detail (LoD) for a Building Information Model (BIM)-West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 123-130.

Gaiani, M., Apollonio, F. I., Clini, P., & Quattrini, R. (2015). A Mono-Instrumental Approach to High-Quality 3D Reality-Based Semantic Models. Application on the Palladio Library. *Digital Heritage. Granada: IEEE*.

ICOMOS. (1975). European Charter of architectural heritage. Tratto il giorno 06 14, 2016 da <http://www.icomos.org/en/charters-and-texts/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/170-european-charter-of-the-architectural-heritage>

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27(4), 311-327.

Oreni, D. B. (2014). Survey turned into HBIM: the restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake (L'Aquila). *ISPRS Annals of Photogrammetry*.

Pietroni, E., Forlani, M., & Rufa, C. (2015). Livia's Villa Reloaded: An Example of Re-use and Update of a Pre-existing Virtual Museum, Following a Novel Approach in Storytelling Inside Virtual Reality Environments. *Digital Heritage. Granada: IEEE*.

Quattrini, R. M. (2015). From TLS to HBIM. High quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.

Quattrini, R., Pierdicca, R., Frontoni, E., & Barcaglion, R. (2016). Virtual reconstruction of lost architectures: from the TLS survey to AR interaction. *ISPRS Annals 2016*, in press.

Schevers H., M. J. (2007). Towards Digital Facility modelling for Sydney Opera House using IFC and Semantic Web Technology. *ITcon*.

Volk, R. S. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Automation in Construction*(38), 109-127.

Wiet, M., & Beetz, J. (2013). BIMQL – An open query language for building information models. *Advanced Engineering Informatics*(27), 444-456.