

# MODELLI HBIM DA NUVOLA DI PUNTI: LA VERIFICA METRICA DEI DATI E LA VALUTAZIONE DEI RISULTATI

## HBIM FROM POINT CLOUDS: METRIC ACCURACY AND RESULTS ASSESSMENT

F. Matrone <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambientale, delle Infrastrutture e del Territorio (DIATI) - Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino (Italy) (francesca.matrone@polito.it)

**PAROLE CHIAVE:** HBIM, nuvole di punti, rilievo integrato, APR, laser scanner terrestre.

**KEY WORDS:** HBIM, Point clouds, integrated survey, UAV, TLS.

### RIASSUNTO

L'innovazione tecnologica degli ultimi anni che ha investito il settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni ha permesso di sviluppare e sperimentare nuove metodologie di rilievo a supporto della gestione del patrimonio edilizio esistente.

All'interno di questo contributo vengono trattate alcune metodologie di rilievo integrato quali fotogrammetria terrestre e aerea tramite APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) e tecnica laser scanner terrestre ai fini della costruzione di modelli architettonici tridimensionali. L'obiettivo di questa ricerca è dunque legato, a partire dalle nuvole di punti georiferite, alla definizione di geometrie e componenti parametriche in modelli tridimensionali *object-oriented* quali l'HBIM (*Historical Building Information Modeling*).

Il caso studio del Sacro Monte di Varallo (VC), un complesso devozionale del XV secolo dichiarato Patrimonio Mondiale dell'Umanità nel 2003, fornisce qui il campo di prova per l'applicazione di tale metodologia e per la successiva analisi e valutazione dei dati del modello parametrico realizzato. Questo confronto è condotto valutando la deviazione delle geometrie costruite nel modello HBIM dalla nuvola di punti, qui utilizzata come dato di riferimento.

La verifica dei risultati è stata condotta suddividendo l'edificio in componenti architettoniche e svolgendo le analisi di scostamento su ognuna di esse. Più in particolare sulle murature caratterizzate da una forte rastremazione, sulle coperture realizzate con software differenti, sugli elementi voltati di difficile realizzazione, sulle scalinate, colonne e balaustre, evidenziando come si possano raggiungere buoni risultati di approssimazione delle geometrie, seppur con ancora alcuni limiti dovuti al carattere storico del caso studio.

### ABSTRACT

The technological innovation of the last few years, which has involved the architectural, engineering and construction sectors, has allowed to develop and test new significant methodologies to support the management of the existing building heritage.

Within this contribution, some integrated survey methodologies such as terrestrial and aerial photogrammetry through UAV (Unmanned Aerial Vehicles) and terrestrial laser scanner technique for the construction of three-dimensional architectural models are described. The objective of this research is therefore connected, starting from the geo-referenced point clouds, to the definition of geometries and parametric components in three-dimensional object-oriented models such as the HBIM (Historical Building Information Modeling).

The case study of the Sacro Monte di Varallo (VC), a devotional complex of the fifteenth century declared World Heritage Site in 2003, provides here the test field for the application of this methodology and for the subsequent analysis and evaluation of the data of the parametric model realized. This comparison is carried out by evaluating the deviation of the geometries constructed in the HBIM model from the point cloud, used here as reference data.

The check of the results has been carried out by subdividing the building into architectural components and carrying out the deviation analysis on each of them. Specifically, on the walls characterized by a strong taper, on the roofs realized with different software, on the vaulted elements of difficult construction, on the stairways, columns and balustrades, highlighting how we can achieve good results of approximation of the geometries, albeit still with some limits due to the historical nature of the case study.

### 1. INTRODUZIONE

In un paese come l'Italia in cui i beni culturali censiti dal MiBACT sono più di 33 ogni 100 km<sup>2</sup> e in cui vi sono 53 siti "Patrimonio dell'umanità", più di ogni altro paese al mondo, è fondamentale porre l'attenzione su aspetti quali la documentazione di tale tipo di patrimonio e dotarsi di strumenti che ne consentano la conservazione.

L'interesse verso queste tematiche si può far risalire alla Carta di Atene del 1931 e poi alla Carta di Venezia di circa trent'anno dopo, in cui si afferma che "la conservazione e il restauro devono far ricorso a *tutte* le scienze e tecniche che possono

contribuire allo studio e alla salvaguardia del patrimonio architettonico".

Seguirono poi altre carte e documenti (Carta di Washington, 1987; *Charter for the Protection and Management of the Archaeological Heritage*, 1990; *Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*, 2003), in cui si evidenzia comunque la necessità di costruire, o ricostruire, una fase di conoscenza del bene, come base per la sua conservazione, e l'indispensabilità di un continuo aggiornamento della documentazione, al fine di garantirne il monitoraggio, con la manutenzione ordinaria e straordinaria, la gestione e la fruizione.

Sulla base non solo di queste premesse, ma anche della recente emanazione della normativa sulle opere pubbliche (UNI 11337 “Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni”) si rende fondamentale l’aggiornamento delle tecniche di documentazione del patrimonio, sfruttando anche gli ultimi sviluppi tecnologici nel campo dell’edilizia e del *building process*. Pertanto, soprattutto negli ultimi anni, si sta facendo sempre più ricorso alla metodologia BIM anche per la gestione e digitalizzazione del patrimonio costruito attraverso i modelli HBIM (*Historical Building Information Modeling*) (Brumana et al., 2013; Del Giudice, 2013; Oreni et al. 2014; Barazzetti et al., 2015; Inzerillo et al., 2016).

Lo scopo della ricerca qui presentata è quindi quello di indagare come la geomatica, con il rilievo metrico integrato, possa supportare la costruzione di modelli digitali HBIM, traendo spunto da alcune sperimentazioni già condotte (Hichri et al., 2013; Quattrini et al., 2015; Fregonese et al., 2017) valutare l’affidabilità e la precisione di tali modelli parametrici e indagare se questi possano costituire effettivamente validi strumenti per la conoscenza, la conservazione e la manutenzione dei beni architettonici.

Il contributo non si concentra perciò sulla strutturazione del database per la manutenzione programmata di questo tipo di patrimonio a partire dal modello HBIM, ma sulle tecniche e modalità di rilevamento dell’edificato storico a supporto della modellazione *object-oriented*, sulle successive fasi successive di costruzione del modello parametrico, con relative difficoltà e criticità, e sulla validazione e verifica dei dati ottenuti, tramite un confronto tra la nuvola di punti, che costituisce il dato di riferimento, e la rappresentazione tridimensionale digitale.

### 1.1 Caso studio

Il caso studio qui preso in esame è il Sacro Monte di Varallo Sesia (VC), un complesso religioso che, a causa della sua estensione territoriale e importanza storica, richiede l’utilizzo di complesse attività di manutenzione programmata e la definizione di nuove politiche di valorizzazione.

Tale complesso necessita inoltre di un aggiornamento dei dati metrici e della creazione di un database digitale che agevoli la gestione dei dati per la sua manutenzione e gestione.

Proprio per questi motivi si è deciso di testare e applicare la metodologia HBIM, per la strutturazione di una nuova base dati informatizzata, su questo caso studio.

In generale, i Sacri Monti sono particolari luoghi religiosi, sorti tra il XV e il XVII secolo, costruiti prevalentemente tra il Piemonte e la Lombardia e più in particolare nella regione prealpina compresa tra la Valsesia e il lago di Como.

Questi complessi religiosi sono caratterizzati dall’articolazione in un numero variabile di cappelle e opere architettoniche, che costituiscono le tappe di un percorso devozionale, il più delle volte in ambiente pedemontano.

Sulla totalità di nove Sacri Monti, dichiarati Patrimonio mondiale dell’Umanità UNESCO e inseriti nella *World Heritage List* nel 2003, il Sacro Monte di Varallo, fu il primo ad essere progettato e costruito nel 1491 (De Filippis, 2009).

A partire dal 2015, grazie ad una collaborazione tra il Politecnico di Torino (Dipartimenti DIATI e DISEG) e l’Ente gestore del Sacro Monte di Varallo, sono già stati realizzati i modelli HBIM di alcune cappelle (Fig. 1), con la costruzione di un unico modello federato che contiene i dati di ognuna di esse. Questo studio si focalizza sul Palazzo di Pilato, un edificio che affaccia a Sud su Piazza del Tempio e a Nord su Piazza dei Tribunali, costituito da 8 cappelle.

Esso è composto da un loggiato, coperto da volte a crociera, che affaccia su Piazza del Tempio (Fig. 2) e dal quale, tramite uno scalone e un passaggio con volta a botte unghiata, si può passare alla parte sottostante, su Piazza dei Tribunali, in cui sono presenti un piccolo portico, anch’esso con volte a crociera, e un portale decorato con tripla apertura.

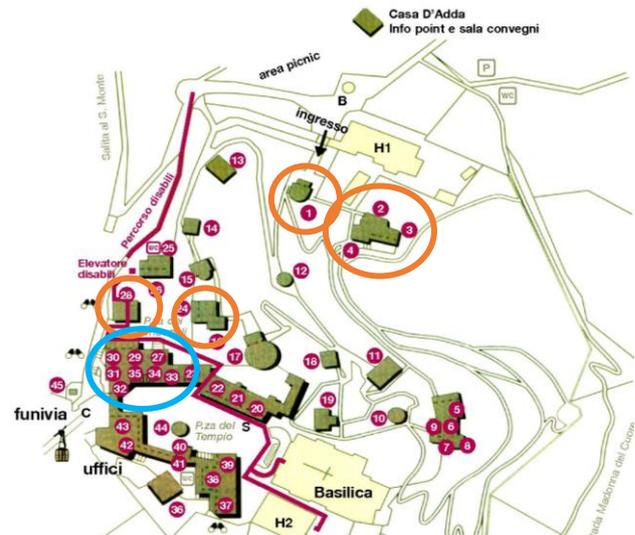


Figura 1. Disposizione delle 45 cappelle e individuazione di quelle già rilevate e digitalmente rielaborate. In blu il Palazzo di Pilato, qui approfondito.



Figura 2. Affaccio a Sud del Palazzo di Pilato.

Il Palazzo fu uno dei primi ad essere realizzati e ospita tutte le sacre rappresentazioni riguardanti la figura di Pilato, con un totale di 8 cappelle.

## 2. METODOLOGIA

La singolare disposizione urbanistica di questo Sacro Monte, posizionato su uno sperone roccioso a circa 600 m s.l.m. (Fig. 3), ha fatto sì che si rendesse particolarmente necessario un rilievo “multisensore”, ossia che prevedesse l’utilizzo di diverse strumentazioni quali stazione totale e GPS/GNSS per la tecnica topografica, APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per quella fotogrammetrica e laser scanner terrestre *Time of Flight*.

Il metodo seguito per l’acquisizione ed elaborazione dati è ormai ampiamente presente in letteratura (Chiabrando, Spanò, 2012, Remondino, El-Hakim 2006) e fa riferimento al metodo definito “convenzionale” di (Schuhmacher, Böhm, 2005).

Questo metodo (Fig. 4) è stato poi modificato in alcune parti per meglio adattarsi all’esigenza di creare una nuvola di punti importabile in un ambiente di modellazione *object-oriented*.

Esso ha inoltre previsto l'integrazione delle due nuvole di punti (fotogrammetrica e laser scanner) per raggiungere un'adeguata completezza del dato.

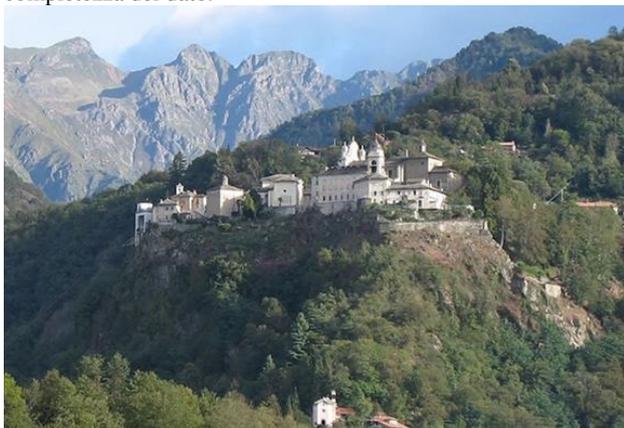


Figura 3. Posizione prominente del Sacro Monte di Varallo.

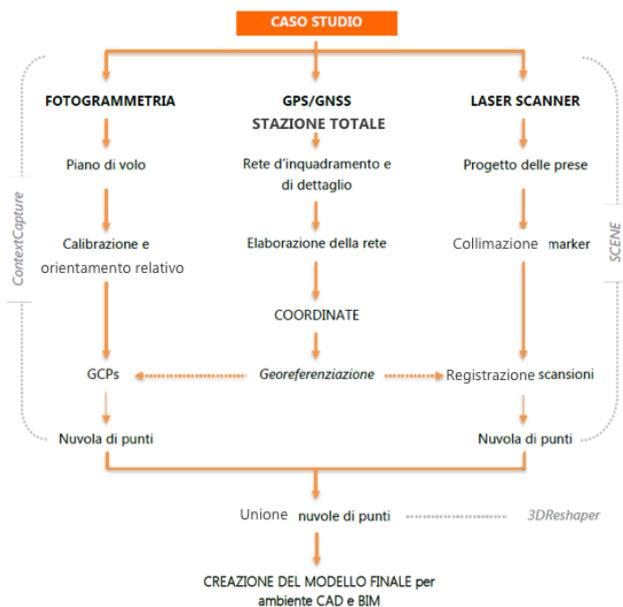


Figura 4. Sequenza delle fasi di elaborazione dati.

A seguito dell'elaborazione delle nuvole di punti e della costruzione del modello HBIM, sono stati condotti i confronti tra le nuvole di punti e il modello tridimensionale per la verifica metrica dei dati e la validazione degli stessi.

Infine, le informazioni relative alle geometrie presenti all'interno del modello (muri, coperture, serramenti, ecc.) e che vengono registrate come entità, una volta conclusa la modellazione, sono state esportate per la strutturazione di un database relazionale esterno, gestibile con MS Access del pacchetto Office, e reso disponibile per gli Enti preposti alla tutela del Sacro Monte.

## 2.1 Acquisizione dati

Per l'acquisizione dei dati al Sacro Monte di Varallo sono state svolte più campagne di rilievo dal 2015 al 2017.

Più in particolare, quella che ha interessato il Palazzo di Pilato si è svolta a Luglio del 2016 e ha previsto il posizionamento dei marker, sia a terra che sulle superfici murarie, l'impostazione delle reti d'inquadratura (tramite GPS/GNSS) di raffittimento e di dettaglio, la registrazione delle scansioni laser e la realizzazione del volo del drone.

Per ciò che concerne la **rete planimetrica**, una parte dei punti è stata rilevata con la tecnica GPS/GNSS in modalità statica, mentre laddove la copertura satellitare non era sufficiente per utilizzare il ricevitore GPS/GNSS, a causa della vicinanza di alcune pareti e spazi relativamente chiusi, sono stati posizionati dei vertici di raffittimento, misurati con tecnica topografica classica attraverso più strati di letture coniugate.

Nel nostro caso, il rilievo cinematico è stato condotto in tempo reale (RTK), controllando che fossero registrabili almeno cinque satelliti per entrambi i ricevitori e rilevando così la maggior parte dei marker a terra. Tale tecnica ha consentito il raggiungimento di una precisione centimetrica (Cina, 2014).

Le **scansioni laser**, per l'ottenimento di dati metrici densi, sono state acquisite nelle due piazze principali (Fig. 5) oltre che in vari spazi interni come il sottotetto della cappella 24, le zone porticate della Piazza del Tempio e il loggiato del Palazzo di Pilato, dove sono site le cappelle dalla 31 alla 35.

In totale, con lo strumento FARO Focus 3D, sono state effettuate circa 70 scansioni con una risoluzione di 1 punto ogni 5 mm.

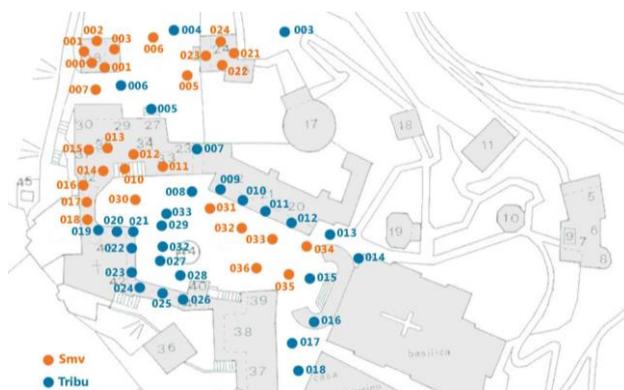


Figura 5. Scansioni laser effettuate nelle due piazze.

Per la **pianificazione del volo** è stato invece necessario conoscere a priori la scala di rappresentazione finale, poiché essa determina il limite di tolleranza entro il quale deve risiedere l'incertezza delle misure. In questo caso, dopo aver stabilito una scala di rappresentazione finale 1:100, è stato possibile definire la precisione entro cui mantenere tale tensione: scala 1:100  $\rightarrow \sigma = 100 * 0,2 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$ .

In base a questo sono stati stabiliti alcuni dei parametri fondamentali per pianificare lo schema di volo (GSD, altezza relativa di progetto  $H_{pro}$ , scala media del fotogramma  $mb$ , ecc.) ed è stato quindi possibile determinare i punti di inizio e di fine della strisciata.

Il volo del drone è stato pianificato grazie al programma *MissionPlanner*, un software *open source*, che può essere utilizzato sia come strumento di configurazione del volo che come strumento di controllo dinamico dell'APR.

Il drone utilizzato è un sistema aereo a pilotaggio remoto chiamato Valis DIATI PX01 ed è un esarotore sviluppato dal DIATI del Politecnico di Torino. Su di esso è stata montata una fotocamera digitale per l'acquisizione dei fotogrammi e, grazie al supporto mobile dotato di giunti cardanici lungo 3 assi, è stato possibile posizionare l'obiettivo ortogonale al terreno, per l'acquisizione di tipo nadirale, o di variare l'angolo di presa per un'acquisizione inclinata a 45°.

La fotocamera utilizzata è una SONY ILCE 5100 da 24,7 megapixel, una focale di 20 mm e dimensioni dell'immagine 4000 x 6000 pixel.

La velocità dell'APR è stata di circa 2-3 m/s, velocità non molto elevata a causa di problemi di strisciamento dell'immagine e

sono state impostate strisciate trasversali parallele tra loro in modo da avere una copertura totale. Sono stati effettuati tre voli: uno obliquo (a 45°) (Fig. 6a.) e due nadirali (Fig. 6b. e c.) con distanze totali percorse da ogni volo di circa 2-3 Km. I dati acquisiti tramite drone sono quindi pari a: un'area di rilievo di 37488 m<sup>2</sup> con una distanza tra le immagini di circa 8 m, un intervallo di scatto di 1,56 secondi e una quota del terreno variabile tra i 499 e i 642 m.



Figura 6. I piani di volo con *Mission planner*: volo obliquo (a) e nadirali (b) e (c).

## 2.2 Elaborazione dati

In questa fase sono stati elaborati i dati fotogrammetrici e le scansioni laser, controllando che le tensioni dei target (la discrepanza nel sistema di coordinate complessivo tra la posizione e l'orientamento dei due oggetti di riferimento corrispondenti nelle scansioni, ad esempio la distanza tra le posizioni dei due punti di riferimento come i marker) fossero inferiori ai 20 mm, rispettando così una precisione di  $\pm 20$  mm per una scala di rappresentazione finale di 1:100.

Più nello specifico sono state registrate circa 30 scansioni laser (inerenti il solo caso studio) con il software FARO Scene e selezionate circa 350 foto per la creazione della nuvola fotogrammetrica (Fig. 7) con il software *ContextCapture* della Bentley.



Figura 7. Nuvola fotogrammetrica elaborata con *ContextCapture* e caso studio.

Da sottolineare è come la nuvola ottenuta con i processi fotogrammetrici, nonostante le immagini oblique, conservi comunque alcune criticità relative alle parti meno rilevabili dalla camera montata sul drone, come le zone sottostanti gli sporti del tetto e gli interni dei porticati o del loggiato (Fig. 8).



Figura 8. Prospetto Sud: criticità della nuvola fotogrammetrica

**2.2.1 Data fusion:** In questa fase si è deciso di mantenere dalla nuvola fotogrammetrica i soli dati delle coperture e delle aree che non è stato possibile rilevare con il laser scanner come la parete Ovest (Fig. 9), non accessibile a causa dell'impossibilità del sensore ottico attivo di rilevarla per il forte declivio del terreno e l'angustia dello spazio.



Figura 9. In rosso le parti mantenute dalla nuvola fotogrammetrica, in RGB la nuvola laser scanner.

Si è così ottenuta la nuvola finale che però è stata ulteriormente filtrata a causa dell'eccessivo peso e numero di punti che non consentivano la sua elaborazione con il software successivo ReCap360.

**2.2.2 Preparazione della nuvola di punti per il software BIM-oriented:** Per rendere idonea la nuvola di punti alle elaborazioni successive è stato utilizzato ReCap 360 (*Reality Capture*), un software che permette di preparare le nuvole di punti per l'uso all'interno di un'ambiente CAD e BIM. Esso consente la suddivisione delle nuvole, siano esse da laser scanner o da fotografia digitale, in componenti architettoniche e la loro esportazione in .rcp, formato di file supportato da Autodesk Revit.

Si è deciso di suddividere la nuvola in più componenti architettoniche (Fig. 10), tenendo anche conto delle possibili elaborazioni successive, metodi e software da impiegare.

## 3. MODELLAZIONE PARAMETRICA

L'elemento distintivo di questo tipo di modello parametrico è l'integrazione non solo di parametri quali la geometria (coordinate), la topologia (relazione di connessione tra gli elementi) o la fotometria (caratteristiche visive delle superfici), già ricavabili da molti modelli 3D non BIM, ma anche parametri della composizione interna, dell'anno di costruzione o degli interventi di restauro, dei materiali, documenti d'archivio, ecc.

La modellazione di un edificio storico, a differenza di uno *ex-novo*, comporta però la creazione di una libreria con

componenti *ad hoc* per descrivere gli elementi che la compongono, infatti ad oggi, purtroppo, l'HBIM è fortemente limitato dall'irrelevanza delle librerie di oggetti, in cui non si può fare affidamento su oggetti standardizzati, e dall'impossibilità di determinare automaticamente dalle scansioni 3D le strutture degli edifici di diverse epoche storiche e di costruzione (Prizeman, 2015).



Figura 10. Suddivisione in regioni della nuvola di punti.

### 3.1 Importazione nuvole di punti e georeferenziazione

L'importazione delle nuvole di punti segmentate all'interno dell'ambiente di progetto è un'operazione relativamente semplice, tuttavia bisogna utilizzare alcuni accorgimenti affinché non venga perduta la georeferenziazione del modello.

È infatti necessario impostare il parametro "Posizionamento - Da origine ad origine" durante l'importazione della prima nuvola di punti e per le successive "Da origine ad ultimo posizionamento". Ciò permette di mantenere un sistema di riferimento locale, che consente di avere una georeferenziazione del modello in caso di aggiunta di altri elaborati dello stesso tipo.

Tuttavia questo procedimento è ancora soggetto a criticità poiché, nel caso in cui non si riesca a traslare il "punto base di progetto" di Revit in un punto di coordinate note, non sarà possibile lavorare correttamente nella finestra di progetto e si renderanno pertanto necessari ulteriori passaggi di collegamento tra modelli che ridurranno la precisione della georeferenziazione e del modello stesso.

### 3.2 La modellazione

"Il riconoscimento di oggetti in progetti HBIM include l'identificazione, l'estrazione delle relazioni e le informazioni semantiche. I metodi e i *tools* per il riconoscimento dell'oggetto differiscono in base alla complessità geometrica dell'edificio, il livello di dettaglio richiesto, la tecnica di cattura, il formato dei dati, il tempo di processamento. Oggigiorno sono disponibili molteplici metodi supportati da algoritmi" (Chiabrando et al., 2016).

Per velocizzare e facilitare il processo di riconoscimento degli elementi delle nuvole di punti, esistono alcuni plug-in che sulla base di algoritmi di riconoscimento (Volk et al., 2014), permettono di creare oggetti direttamente a partire dalle geometrie dalla nuvola di punti.

In questo caso studio sono stati testati due plug-in, *Scan to BIM* e *Kubit PointSense*, testando di ognuno i comandi che potevano tornare utili per il riconoscimento semi-automatico degli elementi del modello: muri, coperture, finestre e colonne. Oltre a questi è stata testata anche la possibilità, data da PointSense di creare un'ortofoto per la densificazione della nuvola di punti.

Grazie all'utilizzo di questi due plug-in è stato possibile ricreare in maniera piuttosto speditiva la geometria generale dell'edificio (muri, coperture e inserimento finestre).

Per le altre geometrie quali colonne, balaustre e grate delle cappelle sono stati invece utilizzati i "Modelli generici metrici" (Fig. 11), in alcuni casi basati su muri, in altri basati sul pavimento.

Le colonne ad esempio sono state interamente create tramite i comandi "Rivoluzione", "Estrusione", "Estrusione su percorso" e "Unione".



Figura 11. Modelli generici metrici di una colonna della balaustra, sovrapposta a nuvola di punti, e di un portale decorativo a Nord.

Per la creazione delle volte è stata utilizzata un'altra tipologia di modello generico metrico: il modello generico metrico *adattivo*.

Il "Modello generico metrico adattivo" è un "file di modello di Famiglia" che dà la possibilità di "creare componenti flessibili in grado di adattarsi a diversi scenari di progettazione" (Revit Autodesk). Queste componenti adattive posso essere utilizzate in sistemi ripetuti, rispettando però una serie di vincoli impostati dall'utente.

In questo caso la "Famiglia parametrica adattiva" è stata utilizzata per la modellazione degli elementi più complessi del modello, ossia quegli elementi caratteristici degli edifici storici la cui restituzione tridimensionale risulta solitamente molto difficoltosa: le volte.

La nuvola di punti del Palazzo di Pilato presenta 3 tipologie di volta differenti: volta a botte lunettata, volta a crociera, volta a vela.

Il modello parametrico di ognuna di esse è stato creato in maniera differente, ma per tutte sono stati comunque impostati dei "punti di riferimento" (Fig. 12) e delle quote che fungessero da base per la parametrizzazione una volta inseriti nel progetto.

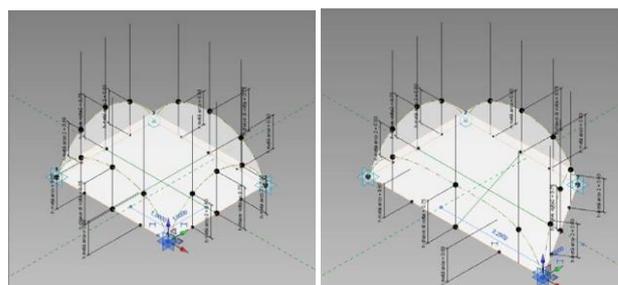


Figura 12. Verifica del punto di riferimento nel modello di famiglia della volta a crociera.

Se la costruzione delle volte a botte (Fig. 13) e a vela (Fig. 14) è stata relativamente semplice, la definizione delle volte a crociera non lo è stato altrettanto.

Infatti anche per la costruzione delle volte a crociera la base utilizzata per l'impostazione del modello è stata una volta a botte, dal momento che le unghie delle volte a crociera si ottengono dall'intersezione di due volte a botte.

Tuttavia, dal momento che non si voleva ottenere, come nel caso della volta a botte, l'inserimento di un vuoto in un solaio piano, ma era necessario poter vedere anche l'estradosso, poiché non sono stati eseguiti rilievi laser scanner al di sopra della volta e quindi non si aveva la certezza di come fosse realmente il solaio poggiante sulla volta, il procedimento per la sua realizzazione si è notevolmente complicato.

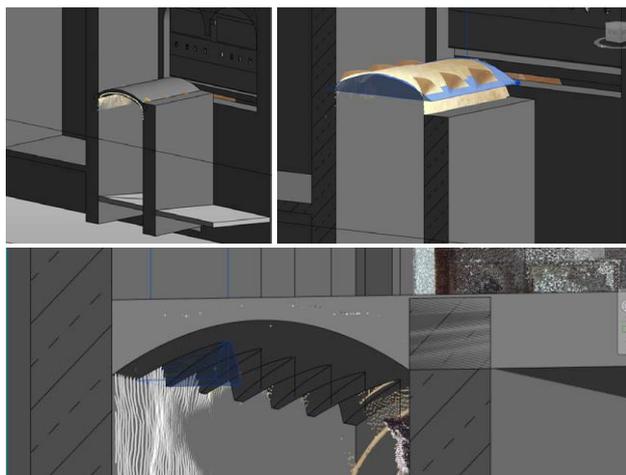


Figura 13. Primo tentativo di inserimento della volta a botte come "Solido" (sinistra) e successivo inserimento con "Solido di sottrazione" (destra). In entrambi i casi è stata mantenuta il più possibile la corrispondenza con la nuvola di punti. (In basso) Creazione del "Solido di sottrazione" per la rappresentazione delle lunette.

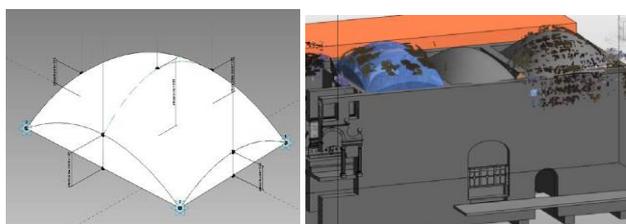


Figura 14. Realizzazione della volta tramite "Solido" e creazione del "Muro da superficie".

Infatti non è bastato solamente creare un "Solido" che fornisce la base per il "Muro da superficie" (Fig. 15), ma una volta creati i muri è stato anche necessario realizzare due "solidi di sottrazione" tali da conservare esclusivamente le unghie derivanti dall'intersezione, eliminando così le parti in comune, dette "fusi".

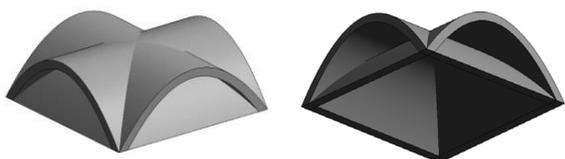


Figura 15. Volta a crociera con i fusi ancora da eliminare.

Prima di iniziare a creare i "solidi di sottrazione", si è però notato che la curvatura dell'arco, piuttosto acuta, non corrispondeva con quella, quasi a sesto ribassato, delle volte a crociera del loggiato. Nonostante i vari tentativi di modifica dei parametri di altezza della chiave di volta, non si è riusciti ad avvicinarsi alla curvatura della nuvola di punti, perciò è stato indispensabile modificare la Famiglia parametrica, aggiungendo

un nuovo parametro. Tale parametro è stato identificato in una nuova altezza a metà degli archi generatori (Fig. 16), in modo tale da garantire, tramite la sua modifica, qualsiasi curvatura desiderata. Si è così riusciti a inserire correttamente la volta all'interno del Progetto e, creando i "Solidi di sottrazione" si è potuto ottenere una volta a crociera senza fusi (Fig. 17).

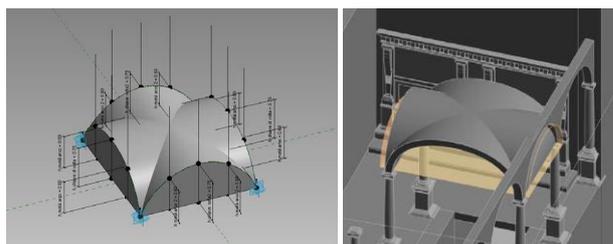


Figure 16 e 17. Nuovo modello realizzato per la costruzione della volta a crociera con i parametri stabiliti e solido di sottrazione (in arancione).

Infine, ragionamento a parte va fatto per le coperture, per la cui modellazione si è deciso di provare ad utilizzare due software differenti.

Il primo risultato è stato ottenuto con il plug-in *Poinsense* e il secondo con il plug-in *Meshflow* del software *Rhinceros*, in cui tutte le entità geometriche sono rappresentate mediante NURBS, una rappresentazione matematica tramite la quale è possibile definire accuratamente geometrie 2D e 3D come linee, archi e superfici a forma libera (Fig. 18).

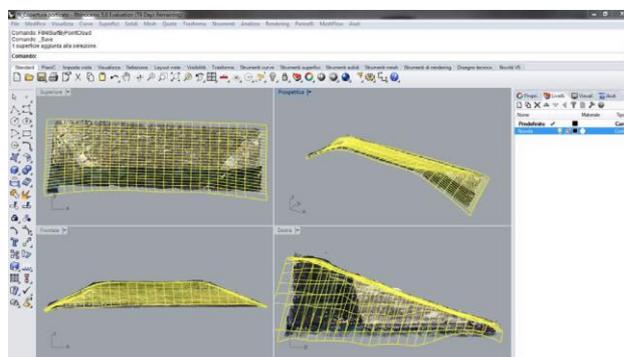


Figura 18. Superficie creata a partire dalla nuvola di punti.

La copertura così creata risulta molto "morbida" (Fig. 19), soprattutto se confrontata con quelle realizzate da PointSense. A questo punto si è deciso di mantenere tutte le coperture create con PointSense, anche se meno corrispondenti all'originale, per coerenza con il modello: infatti nella modello HBIM tutti gli elementi realizzati approssimano la realtà, ma non corrispondono perfettamente ad essa.

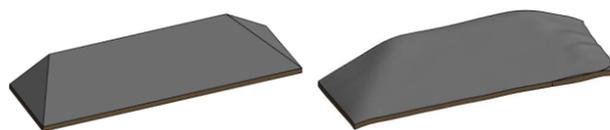


Figura 19. Confronto tra la copertura realizzata con PointSense (sinistra) e quella realizzata con Scan to BIM (destra).



Figura 20. Modello HBIM finale.

#### 4. VALIDAZIONE DATI

Conclusa la modellazione HBIM è stato opportuno condurre un confronto tra alcuni elementi realizzati con Revit e la nuvola di punti. Per far ciò, sono stati utilizzati i comandi relativi alla sezione *Surface Analysis Tools* dal plug-in *PointSense*, che è in grado di stimare lo scostamento tra la superficie e la nuvola di punti in termini metrici. Il software divide la superficie in analisi tramite una griglia a maglia quadrata di dimensioni impostabili e per ogni cella viene calcolata una serie di parametri quali il valore medio, minimo e massimo delle distanze tra i punti della nuvola e la superficie, la distanza del punto che proiettato sul piano è il più vicino al centro (*nearest value*) e il numero di punti appartenenti alla cella (*number of points*), qui impostata di 5 cm. Il colore verde corrisponde a scostamenti prossimi allo 0, mentre il rosso e il blu scostamenti maggiori con segno positivo o negativo rispetto alla nuvola.

In primo luogo, è stato utile confrontare le **murature**.

Da quest'analisi emerge che il software di modellazione non ha consentito automaticamente la realizzazione dei muri rastremati presenti nell'edificio storico e pertanto vi è uno scostamento >10 cm nelle parti inferiori delle murature, mentre in quelle superiori si registrano scostamenti sino a 3 cm, in linea con la tolleranza della scala di rappresentazione (Fig. 21).

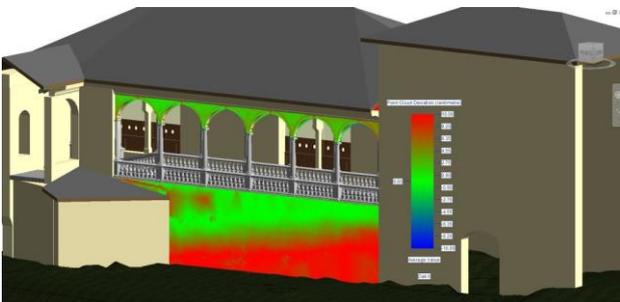


Figura 21. Deviazione della nuvola di punti dal modello.

Sarebbe stato possibile riprodurre gli spessori differenti tra le murature alla base (fino ad 1 m di spessore) e quelle alle quote superiori (70 cm) modellando o una Famiglia adattiva con un differente spessore, tuttavia questa procedura è piuttosto macchinosa da realizzare per tutte le pareti, o costruendo due muri differenti con diverse sezioni, ma in questo caso si genererebbe un gradino all'interfaccia delle due murature.

In secondo luogo, sono state confrontate le **coperture** del portico generate con i due differenti software.

In questo caso il risultato ottenuto è stato un discostamento più omogeneo, intorno ai 3/4 cm, nella copertura in teoria più fedele alla realtà generata con Rhinoceros (Fig. 22) e uno scostamento in inferiore, da 0 a 3 cm, in alcuni punti della copertura "geometrica" realizzata con *PointSense* (Fig.23), ma di gran lunga superiore, fino a 10 cm, in altre parti. Ciò potrebbe essere dovuto alla difficoltà dell'impostazione del parametro di inclinazione del tetto.



Figura 22. Copertura generata con Rhinoceros.

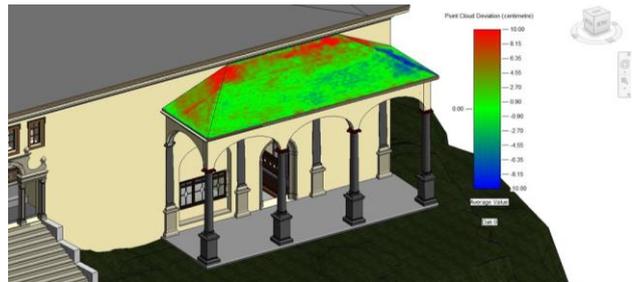


Figura 23. Copertura generata con PointSense.

Analogo ragionamento può essere fatto per la realizzazione delle **scale**.

Non ci sono stati problemi a costruire la piccola scalinata presente su Piazza dei Tribunali (Fig. 24), dove si registrano scostamenti di circa 2/3 cm, tuttavia il risultato non è stato lo stesso per lo scalone del loggiato, dove il maggior numero di alzate ha causato una differenza più evidente tra la nuvola di punti e il modello (Fig 25).

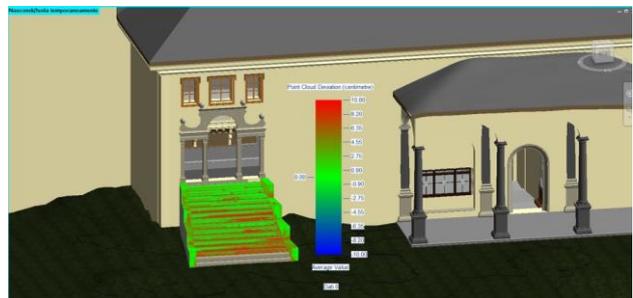


Figura 24. Scalinata in Piazza dei Tribunali.

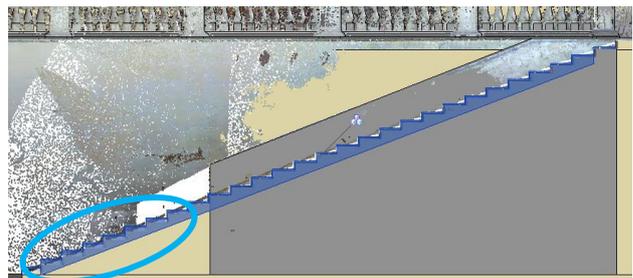


Figura 25. Sfasamento nella parte bassa dello scalone e completo allineamento nella parte alta.

Le scale, infatti, sono elementi rigidi che, a differenza di altri, non possono essere modificati più di un certo livello in Revit, pertanto l'asimmetria dei gradini dovuta sia all'utilizzo che alle mere questioni di cantiere, non può essere rappresentata.

Il problema qui è stato causato da un numero vincolato di alzate della scalinata, necessarie per coprire una certa altezza, che non può essere modificato. Nella parte superiore si nota il completo allineamento, tuttavia nella parte inferiore vi è una differenza tra

le pedate del modello e quelle della nuvola di circa 9 cm, dovuta appunto all'aggiunta da parte di Revit di un gradino in più.

Ulteriore confronto utile è stato quello delle **volte** a crociera, le più complesse da realizzare sia geometricamente che parametricamente e, pertanto, sono quelle che fanno registrare scostamenti maggiori, come anche evidenziato in altre ricerche (Adami et al., 2017).

In questo caso il valore medio della deviazione varia notevolmente da 1/2 cm fino a circa 10 cm (Fig. 26), proprio dovuto all'approssimazione di disegno che si è dovuta compiere per la realizzazione di queste geometrie.

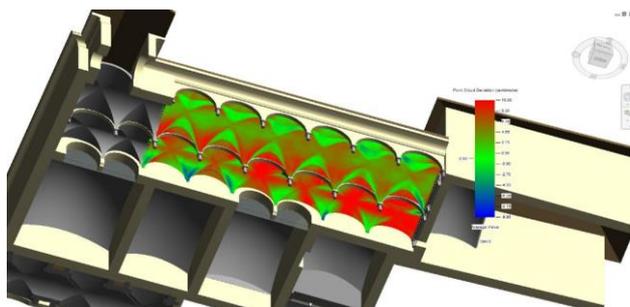


Figura 26. Deviazione delle volte a crociera del loggiato.

Infine scostamenti nettamente minori, nell'ordine di 1/2 cm si registrano nei modelli generici metrici costruiti *ad hoc* sulla base della nuvola di punti come le **colonne** e le **balaustre** (Fig. 27). Le uniche deviazioni maggiori si evidenziano sulle parti in pietra degradate e rovinate dal tempo.

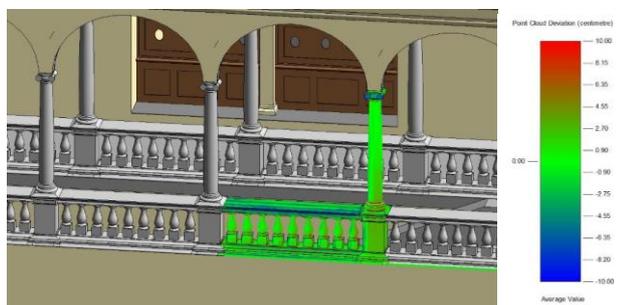


Figura 27. Valore medio della balaustre e colonna del loggiato.

## 5. CONCLUSIONI

L'utilizzo di modelli HBIM per lo studio e documentazione del patrimonio architettonico è sicuramente una direzione verso cui, anche grazie alla norma UNI 11337:4, il mondo dell'edilizia e del restauro tendono sempre più. Tuttavia, ad oggi, non esistono ancora soluzioni univoche e condivise per la creazione e gestione di tali modelli.

La modellazione BIM di un edificio storico, a partire dal supporto fondamentale delle nuvole di punti, è possibile, ma comporta ancora una notevole serie di approssimazioni al fine di definire un modello simile al reale, in tempi ragionevoli.

Dall'analisi dello scostamento tra la nuvola di punti e il modello parametrico emergono innanzitutto alcune criticità nella realizzazione delle murature rastremate. Per riprodurle sarebbero possibili differenti soluzioni, che tuttavia non è necessario applicare dal momento che nei modelli HBIM si intende creare oggetti che siano *simili* alla realtà, ma non perfettamente corrispondenti. Infatti lo scopo principale di tali elementi è quello di registrare informazioni utili alle attività di gestione e manutenzione programmata.

Permangono inoltre criticità legate anche alla geometria delle coperture, delle volte e delle scalinate; per quest'ultime, la rigidità della famiglia, che prevede proporzioni vincolate nel rapporto tra alzata e pedata legato alla normativa delle costruzioni ex-novo, non consente di ricostruire fedelmente l'elemento storico.

L'utilizzo di modelli generici metrici, per costruire elementi di dettaglio come le balaustre, evidenzia tuttavia, come sia comunque possibile costruire all'interno dei software *object-oriented*, elementi architettonici con scostamenti inferiori.

Bisogna quindi considerare quale sia lo scopo principale di un modello HBIM (restauro, documentazione, database, ecc.) e valutare se le precisioni e accuratezze raggiungibili con esso siano utili a tal fine. Talvolta infatti potrebbero essere sufficienti accuratezze inferiori e quindi tutte le approssimazioni condotte nella costruzione delle geometrie potrebbero risultare totalmente ininfluenti.

## BIBLIOGRAFIA

Adami, A., Scala, B., Spezzoni, A., 2017, Modelling and accuracy in a bim environment for planned Conservation: the apartment of Troia of Giulio Romano, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W3. 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 1–3 March 2017, Nafplio, Greece.

Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Oreni, D., Previtali, M., Roncoroni, F., 2015. HBIM and augmented information: towards a wider use community of image and range-based reconstructions. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XL-5/W7, pp. 35-42.

Brumana, R., Georgopoulos, A., Oreni, D., Raimondi, A., Bregianni, A., 2013, HBIM for documentation, dissemination and management of built heritage. The case study of St. Maria in Scaria d'Intelvi. *International Journal of Heritage in Digital Era*, Vol. 2 (3), pp. 433-451.

Chiabrando, F., Spanò, A. T., 2012, I sistemi laser scanning nei progetti e percorsi formativi d'Architettura, *Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia*, n. 3, SIFET, 2012.

Chiabrando, F., Sammartano, G., Spanò, A. T., 2016, Historical Building Models and their handling via 3D survey: from points clouds to user-oriented HBIM, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B5, 2016. XXIII ISPRS Congresso, 12–19 Luglio 2016, Praga, Repubblica Ceca, p. 633-640.

Cina, A., 2014, *Dal GPS al GNSS (Global Navigation System). Per la geomatica*, Celid, Torino.

De Filippis, E., 2009. *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia.

Del Giudice, M., Osello, A., 2013. BIM for Cultural Heritage, CIPA Strasbourg: BIM for Cultural Heritage, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XL-5/W2, pp. 225-229.

- Fregonese, L., Taffurelli, L., Adami, A., Chiarini, S., Cremonesi, S., Helder, J., Spezzoni, A., 2017. Survey and modelling for the BIM of Basilica of San Marco in Venice, 2017, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Nafplio, Greece, Vol. XLII-2/W3, pp. 303-310.
- Hichri, N., Stefani, C., De Luca, L., Veron, P., Hamon, G., 2013. From point cloud to BIM: a survey of existing approaches, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W2, XXIV International CIPA Symposium, 2–6 September 2013, Strasbourg, France.
- Inzerillo, L., Lo Turco, M., Parrinello, S., Santagati, C., Valenti, G. M., 2016. BIM e beni architettonici: verso una metodologia operativa per la conoscenza e gestione del patrimonio culturale, *DisegnareCon*, Le dimensioni del BIM, Vol. 9(16).
- Oreni, D., Brumana, R., Georgopoulos, A., Cuca, B., 2014. HBIM library object for conservation and management of built heritage, *International Journal of Heritage in Digital Era*, Vol. 3 (2), pp. 321-334.
- Priezeman, O. E. C., 2015, HBIM and matching techniques: considerations for late nineteenth- and early twentieth-century buildings, *Journal of Architectural Conservation*, 2015, 21:3, ISSN: 1355-6207.
- Quattrini, R., Malinverni, E. S., Clini, P., Nespeca, R., Orlietti, 2015, From TLS to HBIM. High quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Avila, Spain, Vol. XL-5/W4, pp. 367-374.
- Remondino, F., El-hakim, S., 2006, Image-based 3D modeling: a review. *Photogrammetric Record*, n. 21, Stuart I. Granshaw.
- Schuhmacher S., Böhm J., 2005, Georeferencing of terrestrial laserscanner data for applications in architectural modelling. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Mestre-Venezia, Italy, Vol. XXXVI, Part 5/W17, art. 15.
- Volk, R., Stengel, J., Schulmann, F., 2014, Building Information Models (BIM) for existing buildings – literature review and future need, *Automation in construction*, 38: 109-127.