

# ACQUISIZIONE E GESTIONE DEI DATI NEGLI EDIFICI STORICI: DAL RILIEVO ALLA COSTRUZIONE DEL MODELLO HBIM

## ACQUISITION AND MANAGEMENT OF HISTORICAL BUILDINGS DATA: FROM SURVEY TO THE CONSTRUCTION OF THE HBIM MODEL

A. Scianna, G.F. Gaglio, M. La Guardia.

ICAR-CNR (Istituto di Calcolo e Reti ad Alte prestazioni – Consiglio Nazionale delle Ricerche) GISLab c/o DICAM, Università di Palermo, Viale delle Scienze, Edificio 8, 90128 Palermo, Italy  
andrea.scianna@cnr.it; gfulvio.gaglio@gmail.com; marcellolaguardia87@libero.it;

**PAROLE CHIAVE:** Rilievo, HBIM, Beni Culturali, Modellazione 3D, TLS, UAV, fotogrammetria

**KEY WORDS:** Survey, HBIM, Cultural Heritage, 3D modelling, TLS, UAV, photogrammetry

### RIASSUNTO

Le procedure per l'acquisizione e gestione delle informazioni descrittive degli edifici sono state rivoluzionate, in questi ultimi anni, sia dall'evoluzione tecnologica degli strumenti di rilievo e delle tecniche di restituzione, che dalle nuove metodologie di gestione dei dati di progetto e di cantiere. Relativamente a quest'ultimo aspetto, l'emergente metodologia BIM (Building Information Modeling), basata sull'implementazione di librerie costituite da oggetti parametrici, permette di progettare e gestire un organismo edilizio nei suoi diversi aspetti, inglobando tutte le informazioni, anche provenienti dal rilievo, in un unico database di gestione del processo edilizio. Di recente, la completezza fornita dallo standard IFC (Industry Foundation Classes) ha reso estremamente interessante e rilevante l'applicazione del BIM all'edilizia esistente, ed in particolare, a quella storica. In quest'ultimo caso, la grande varietà di Beni Culturali presente sul territorio europeo, e la capacità del BIM di poter descrivere il manufatto sia dal punto di vista geometrico che semantico, hanno favorito lo sviluppo di modelli HBIM (Historic BIM). Nel caso specifico le modalità operative di rilievo e restituzione sono strettamente legate alle esigenze operative, dipendendo dalle caratteristiche architettoniche e fisiche del manufatto, dall'accessibilità del sito e dalle finalità di utilizzo del modello. La costruzione di un modello HBIM, infatti, deve tenere in considerazione una serie di problematiche dovute alla complessità delle parti, alla loro frammentazione o incompletezza, e alla difficile parametrizzazione degli oggetti. Alla luce di queste problematiche, nel presente lavoro vengono analizzati diversi aspetti relativi alla fase di rilievo e restituzione di un modello HBIM, prendendo spunto da alcuni esempi pratici, in maniera da riuscire a definire un "modus operandi" da seguire, strettamente legato alle possibili variabili e ai requisiti che caratterizzano tale metodologia.

### ABSTRACT

The procedures for the acquisition and management of building data, in recent years, have been revolutionised both by the technologic development of survey and restitution tools, that offers new possibilities on photogrammetric digital reconstruction, and by the new methods of project and building management. Considering this last field, the emerging BIM (Building Information Management) methodology, based on the implementation of libraries composed of parametric objects, allows the design and management of a building in its various aspects, incorporating all the necessary information, also from surveys, into a single management database of a building project. Recently, the completeness provided by the IFC (Industry Foundation Classes) standard has made BIM methodology extremely interesting to apply for the management of existing buildings, and in particular for historic buildings. In this latter case, the great variety of Cultural Heritage present on the European territory, and the ability of BIM to be able to map the building both from the geometric and semantic point of view, have stimulated the development of HBIM (Historic BIM) models. In the specific case, the operating methods of surveying and restitution are closely linked to the operational needs, depending on the architectural and physical aspects of the building, the accessibility of the site and the purposes of the model. The construction of an HBIM model, in fact, must take into account a series of problems due to the complexity of the parts, their fragmentation or incompleteness, and the difficult parameterisation of the objects. In the light of these problems, various aspects related to the survey phase and the restitution of an HBIM model are analysed in this work, inspired by some practical examples, in order to define a "modus operandi" to follow, closely linked to the possible variables and requirements that characterise this methodology.

### 1. INTRODUZIONE

L'idea del Building Information Modeling (BIM) comincia a prendere forma nel 1975 grazie al Prof. Charles M. Eastman, il quale teorizzò un unico modello virtuale tridimensionale di edificio al quale si sarebbe potuto associare un database relazionale di elementi architettonici e materiali (Eastman et al., 2008). Piante, prospetti e sezioni si sarebbero potute infatti ottenere da uno stesso modello insieme ad elenchi di materiali e analisi di

vario tipo (Eastman, 1976). Qualunque operazione o modifica applicata ad una parte del modello avrebbe prodotto l'aggiornamento di tutte le informazioni ad essa collegate e viceversa. Il concetto di BIM si è evoluto fino ad oggi in seguito all'introduzione sul mercato di alcuni software dedicati dove la condizione fondamentale è la possibilità di utilizzare librerie di oggetti parametrici che rispondono allo standard IFC (Industry Foundation Classes) (Laakso, Kiviniemi, 2012) per la descrizione dei componenti edilizi. Tale standard permette lo scambio di dati tra software diversi attingendo da un unico schema standardizzato di

database, dove elementi costruttivi con proprietà comuni, a cui corrisponde una rappresentazione grafica, sono raggruppati in famiglie.

La metodologia BIM, grazie agli strumenti di condivisione offerti dagli attuali software, permette di coinvolgere non solo architetti e ingegneri edili, ma anche tutti gli attori del processo edilizio. Si tratta quindi di una metodologia applicabile ad un edificio dal suo concepimento o rilievo, qualora esistente, fino alla sua effettiva realizzazione, trovando una sua utilità anche nelle successive fasi di gestione e manutenzione grazie all'integrazione con le tecniche di rilievo e monitoraggio (Volk et al., 2014).

Inizialmente, lo standard IFC è stato concepito per la progettazione e gestione di edifici di nuova costruzione, infatti, si basa sull'utilizzo di modelli standard di oggetti parametrici. L'utilizzo del modello BIM a partire dalla fase di progettazione del nuovo prende il nome di as-designed BIM.

In un secondo momento, poiché soprattutto in Europa la gestione e manutenzione del costruito è diventata l'attività edilizia più diffusa, il modello BIM è stato applicato anche agli edifici già esistenti, in modo da essere di supporto per tutte le operazioni di monitoraggio, gestione e manutenzione che accompagnano l'intero ciclo di vita del bene edilizio. Quest'ultima applicazione ha preso il nome di as-built BIM (Huber et al., 2011).

Negli ultimi anni l'as-built BIM si sta occupando di una particolare parte del costruito, il patrimonio culturale. Da qualche anno, si va facendo più strada, infatti, l'idea di sviluppare modelli virtuali del patrimonio storico che vada al di là della semplice rappresentazione fotorealistica. Quella che è stata definita come Historic BIM (HBIM) sarebbe infatti una nuova metodologia che si avvicina alla gestione dell'architettura storica attraverso l'uso di librerie riutilizzabili di oggetti parametrici costruiti attraverso i dati ottenuti dal rilievo (Dore et al., 2015) a cui è possibile associare diversi tipi di informazioni creando modelli che possono essere aggiornati nel tempo. Tuttavia alcune problematiche già presenti nell'as-built BIM si presentano in maniera più rilevante nell'HBIM. Innanzitutto bisogna tenere conto del fatto che il BIM nasce come metodologia dedicata alla progettazione di nuove costruzioni, orientando la totalità dei software sul mercato verso questa soluzione. L'utilizzo delle librerie di oggetti, infatti, aiuta il progettista nella scelta degli elementi da inserire nel modello, permettendo anche, entro certi limiti, una personalizzazione degli elementi stessi. Invece, nella rappresentazione del costruito ci si imbatte spesso in elementi disegnati ad hoc che, quindi, richiedono particolari modifiche degli oggetti standard presenti nelle librerie fornite (Logothetis et al., 2015). Ancora di più, negli edifici storici sono presenti molteplici elementi architettonici tra loro simili (cioè riconducibili alla stessa classe di oggetti) ma non uguali. Tali differenze, sono dovute alla realizzazione non industriale dei diversi elementi architettonico-costruttivi, aventi diverse configurazioni e decori, generando quindi un'enorme varietà degli elementi costruttivi. Tutto questo concorre ad aumentare le difficoltà di modellazione e ancora di più di parametrizzazione degli oggetti, rendendo problematica la realizzazione di una libreria standard riutilizzabile di elementi architettonici storici.

L'aspetto della parametrizzazione di oggetti appartenenti ad una libreria digitale (Ioannides et al., 2017) riutilizzabile dovrebbe costituire un requisito fondamentale all'interno della metodologia HBIM così come è stata teorizzata. Per la creazione di queste librerie standard è, quindi, necessario applicare delle procedure di modellazione, con il supporto delle più moderne tecniche di rilievo, che permettano una attenta scomposizione dell'edificio storico in componenti e sub-componenti da rappresentare.

Il BIM nel suo concepimento è pensato come applicabile per tutte le attività che riguardano il processo edilizio. Per fare questo il modello richiede un'elevata complessità di strutturazione non

sempre attuabile. Come, infatti, sarà mostrato più avanti, le modalità di modellazione/descrizione di un organismo edilizio possono essere dipendenti dall'utilizzo del modello stesso per alcune specifiche attività (calcolo strutturale, calcolo termico, ecc).

Attraverso la presentazione di alcuni casi di studio di cui si è occupato il laboratorio GisLab, saranno approfondite le problematiche connesse alla realizzazione di un modello HBIM. Successivamente verranno illustrate le tecniche di rilievo che fungono da punto di partenza per lo sviluppo del modello tridimensionale e che sono strettamente connesse alle esigenze realizzative.

## 2. L'ACQUISIZIONE E L'ELABORAZIONE DEL MODELLO HBIM: LE VARIABILI DA CONSIDERARE.

In questi anni presso il GisLab sono state studiate le potenzialità di applicazione del BIM all'edilizia storica, in particolare all'interno di siti archeologici. Il caso di studio dedicato alla cripta della Chiesa dei SS. Sergio e Bacco a Roma ha permesso di formulare e testare un preciso flusso di lavoro necessario alla costruzione di un modello HBIM completo (Scianna et al., 2014). La modellazione infatti necessita di due fasi preliminari, che consistono nella fase di rilievo e nella fase di categorizzazione degli elementi costruttivi. La conoscenza approfondita del bene risulta, infatti, un elemento essenziale per la corretta descrizione secondo la metodologia BIM. La categorizzazione degli elementi costruttivi permette di comprendere meglio la funzione degli elementi architettonici e la relazione con gli oggetti vicini consentendo la creazione di un database che faciliti l'operatore nell'attività di modellazione e nell'attribuzione di informazioni semantiche agli elementi disegnati. La modellazione vera e propria, infine, fornisce una serie di output in diversi formati e utilizzabili per diversi scopi (interoperabilità, disegni 2D, ecc).

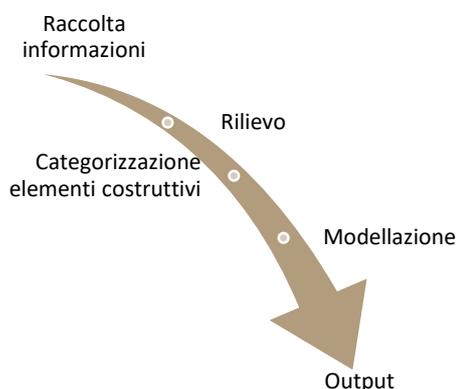


Figura 1. Il flusso di lavoro per la costruzione di un modello HBIM.

Nel processo di realizzazione del modello BIM in generale, ma ancora di più nel caso dell'HBIM (Fig. 1), entrano in gioco una serie di variabili fondamentali da considerare in fase di acquisizione ed elaborazione:

- esigenze progettuali;
- complessità degli oggetti;
- presenza di degrado nei manufatti architettonici;
- varietà architettonica.

Da un punto di vista operativo, l'efficacia di un modello HBIM può essere misurata in termini di soddisfacimento delle esigenze che ne hanno richiesto la realizzazione. In particolare, si è potuto appurare che è quasi impossibile creare un modello HBIM che possa soddisfare tutte le possibili esigenze progettuali. Come descritto in seguito, infatti, alcune esigenze si pongono talvolta in

contrasto tra loro durante la creazione del modello, diventando delle scelte alternative.

Di queste esigenze se ne possono individuare molte, tra cui:

- calcolo strutturale;
- analisi energetica;
- mappatura dei degradi;
- analisi del quadro fessurativo;
- monitoraggio;
- computo metrico;
- interventi di restauro/ricostruzione;
- condivisione del patrimonio culturale;
- estensione dell'accessibilità anche ai diversamente abili.

Ognuna di queste esigenze può richiedere la creazione di un modello appropriato, in cui il grado di dettaglio nella rappresentazione grafica 3D e nella descrizione semantica del bene architettonico può essere più o meno elevato in base alle necessità progettuali. Inoltre, a seconda del tipo di applicazione richiesta, diventa necessario un certo grado di interoperabilità all'interno del processo HBIM. In particolare diventa necessaria l'esportazione e l'importazione del modello in diversi formati all'interno di software specifici, spesso non tutti della stessa casa produttrice. Se il tipo di modellazione utilizzato non è compatibile con il formato di esportazione scelto, si incorre facilmente nella perdita di dati importanti e difficilmente recuperabili (Scianna et al., 2018). Per quanto riguarda, invece, la rappresentazione degli elementi architettonici, bisogna tenere conto della loro complessità ai fini di una corretta modellazione 3D. Molto spesso, infatti, negli edifici storici, sono presenti strutture architettoniche molto complesse che non sono pienamente visibili in una prima fase di rilievo. Infatti, in fase di rilievo, non sempre è possibile individuare elementi architettonici nascosti all'interno delle murature, come i punti di appoggio di archi e volte, o discontinuità strutturali (Figg. 2-3). Per questo motivo è fondamentale ottenere una esaustiva conoscenza delle tecniche costruttive del manufatto oggetto di studio. Solo in questo modo, infatti, potranno essere scelte le metodologie di rilievo più opportune, ai fini di generare, in fase di modellazione, una realistica ricostruzione 3D.

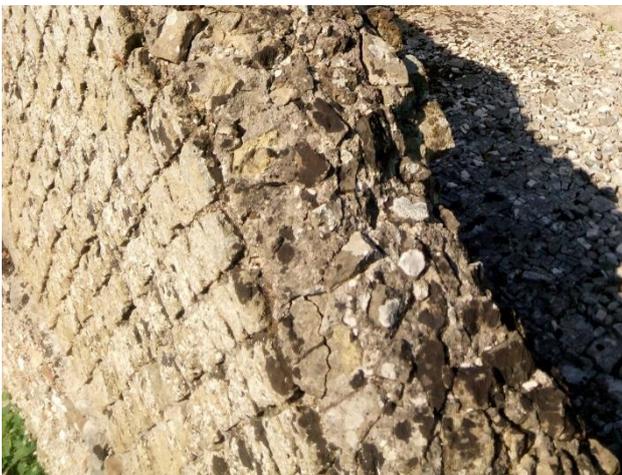


Figura 2. Esempio di discontinuità di materiale presente nella tipica muratura a sacco romana.

La possibilità di individuare le varie fasi del ciclo di vita degli elementi architettonici e di riconoscere le differenti componenti di una struttura, sono dei requisiti fondamentali del modello HBIM. All'interno del modello, infatti, il comportamento di ogni elemento, corredato da informazioni semantiche, è strettamente legato da determinate relazioni agli altri elementi che lo circondano.



Figura 3. Esempio di discontinuità strutturale visibile in cui la volta a botte è costruita in parte in mattoni e in parte in muratura.

Un altro fattore che caratterizza gli edifici storici e che rappresenta un'ulteriore variabile per la costruzione del modello HBIM è la presenza del degrado. In particolare il degrado, in particolare quello (Fig. 4) conseguente al crollo di parti di edificio rende molto difficoltoso la strutturazione o l'utilizzo di oggetti parametrici, complicando ulteriormente la fase di modellazione. Inoltre, nell'ottica di generare un modello analitico per effettuare delle verifiche strutturali statiche/dinamiche del manufatto, è necessario definire correttamente i vincoli geometrici e i parametri fisici durante la creazione degli elementi portanti. In questo caso, quindi, l'esigenza di una rappresentazione fedele del degrado può contrastare con lo sviluppo di un modello adatto anche ad un'analisi strutturale.



Figura 4. Esempio di manifestazione di degrado in un'apertura della Fornace Penna (RG).

Un'altra problematica da considerare nella modellazione in HBIM è connessa con la varietà degli elementi architettonici. Si tratta di un aspetto molto frequente nel patrimonio culturale e che si manifesta nella diversità di elementi simili, anche all'interno di uno stesso manufatto, aventi la stessa funzione architettonica e statica (Fig. 5). Tale varietà è dovuta sia alla presenza di più varianti all'interno di una stessa tipologia di elemento, ma anche alla produzione manuale in fase di realizzazione, che determina l'unicità di ogni manufatto o elemento costruttivo. Questa caratteristica costituisce un'altra variabile che può complicare notevolmente la modellazione in HBIM.



Figura 5. Esempio di varietà architettonica di elementi costruttivi in un complesso monumentale (Duomo di Monreale (PA)) aventi la stessa funzione architettonica e statica.

### 2.1 I requisiti della modellazione HBIM

La presenza di librerie standard di oggetti parametrici è una delle principali caratteristiche dei software dedicati al BIM che offre grandi vantaggi in fase di modellazione. La costruzione di librerie di oggetti, specifiche per il patrimonio culturale, è quindi un importante requisito, per sfruttare al meglio la metodologia HBIM. Tuttavia gli elementi costruttivi dell'architettura storica, come evidenziato precedentemente, mostrano delle caratteristiche profondamente differenti da quelle degli elementi architettonici dell'edilizia contemporanea. Ai fini dello sviluppo di queste librerie, è necessario eseguire una scomposizione del bene storico in categorie, analogamente a quanto avviene nel sistema edilizio moderno, in modo da individuare tutte le sue componenti e le relative funzioni. Ad esempio, nel caso precedentemente studiato della modellazione della Chiesa dei SS. Sergio e Bacco a Roma (Scianna et al., 2014), prima dell'effettiva realizzazione del modello, è stato creato un database gerarchico di elementi architettonici/costruttivi che ha permesso, successivamente, di individuare le relazioni fra gli elementi stessi (Fig. 6).

Database	Elementi architettonici	struttura muraria in opus quadratum	Pilastri architravi riempimento
Piante e sezioni			
Rilievo fotografico			
Modello BIM			

Figura 6. Esempio di database gerarchico di elementi architettonici di un sito archeologico.

Anche in un precedente caso di studio finalizzato alla creazione di un modello HBIM di un tempio dorico, è emersa la necessità di scomporre l'edificio, similmente a quanto può avvenire nella scomposizione del moderno sistema edilizio previsto dalla norma UNI 8290 (Fig. 7). Tale scomposizione in Classi di Unità Tecnologiche, Unità Tecnologiche, Classi di Elementi Tecnici ed Elementi Tecnici permette quindi di comprendere il ruolo e il comportamento di ogni elemento che compone l'organismo edilizio. Una volta individuato un preciso elemento architettonico, bisogna identificare alcune caratteristiche fondamentali ai fini di una corretta modellazione e parametrizzazione. Ogni elemento va quindi ulteriormente scomposto (Fig. 8) al fine di comprenderne le caratteristiche geometriche, le relazioni e i vincoli con gli altri elementi, le parti parametrizzabili, le informazioni semantiche che possono essere associate ad esso, quindi il proprio ruolo.

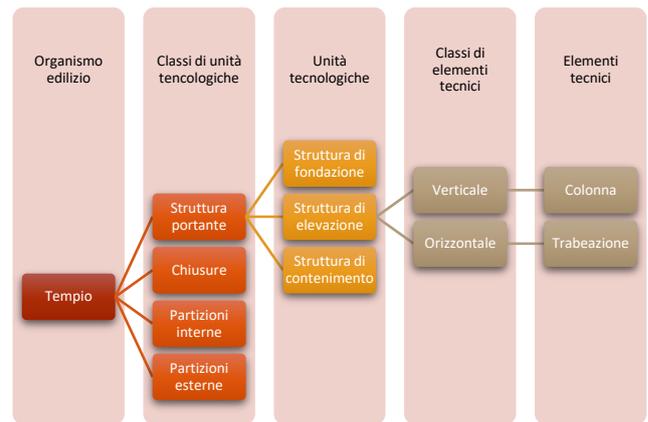


Figura 7. Esempio di scomposizione in categorie di un tempio dorico.

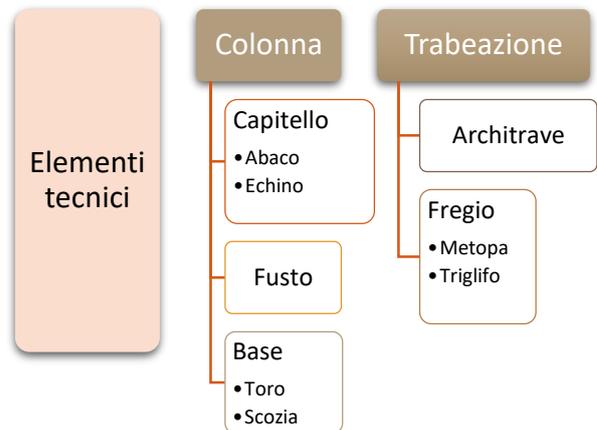


Figura 8. Esempio di scomposizione in categorie di un tempio dorico.

L'identificazione delle relazioni con gli altri elementi e dei vincoli costituisce un passaggio fondamentale per connettere gli elementi della struttura e per stabilire le variabili dimensionali di ogni singolo oggetto. Un corretto inserimento dei vincoli è anche necessario ai fini sia di una corretta parametrizzazione degli elementi costruttivi sia del corretto funzionamento del modello finale (Aubin, 2013). Gli elementi che compongono una colonna dorica, ad esempio, sono stati modellati separatamente e "agganciati" poi l'uno con l'altro tenendo conto del reale comportamento dell'elemento architettonico.

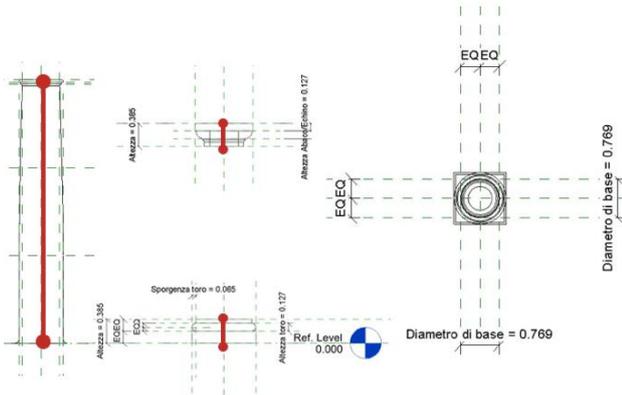


Figura 9. Parametrizzazione della colonna dorica.

La modellazione è stata effettuata partendo da alcune dimensioni principali rese poi parametriche in base ad una specifica dimensione di base (Figg. 9-10). Al variare dell'altezza infatti, ogni parte della colonna varia le proprie dimensioni mantenendo comunque le proporzioni corrette.

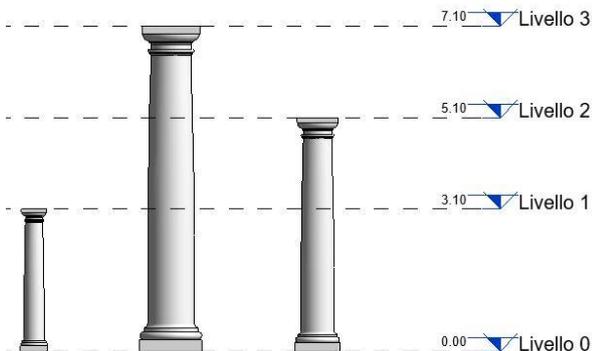


Figura 10. Variazioni di scala della colonna in base ai vincoli.

In questo modo si crea quindi una famiglia di colonne parametriche in altezza e larghezza. Tuttavia l'aspetto della varietà degli elementi architettonici precedentemente evidenziato e la presenza del degrado sulle strutture antiche rendono insufficiente una parametrizzazione di questo tipo. È stato necessario infatti rendere parametrica anche la sezione delle colonne attraverso l'uso di famiglie di profili. Sezionando opportunamente la nuvola di punti infatti è possibile ottenere l'andamento della sezione di porzioni di essa (Fig. 11). Caricando il profilo in una famiglia in cui vengono applicate precise operazioni automatiche di modellazione solida si ottiene un elemento parametrico che rispetta al meglio la geometria reale.

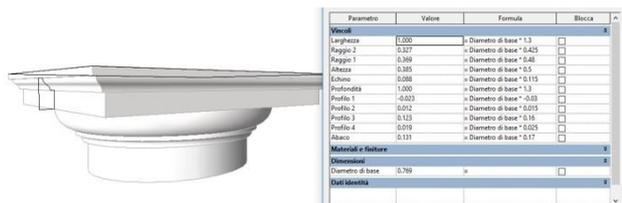


Figura 11. Modello parametrizzato di capitello.

Trattandosi però di operazioni automatiche non è possibile in molti casi rappresentare delle irregolarità come quelle dovute a mancanze di materiale causate da crolli o ad altro tipo di degrado. In questo caso quindi risulta più efficace e meno dispendiosa in termini di tempo una modellazione manuale ad hoc.

## 2.2 Livello di dettaglio e livello di sviluppo

Nella modellazione HBIM non sempre può essere necessario rappresentare un elemento architettonico con livello di dettaglio elevato. La precisione da raggiungere nella modellazione dipende dalla scala di rappresentazione e dall'utilizzo del modello finale. Il range di scala (massimo e minimo) di rappresentazione definisce il livello di dettaglio del modello al quale esso deve essere rappresentato. Considerando, ad esempio, un capitello corinzio, il livello di dettaglio può variare notevolmente in base alle esigenze della ricostruzione del modello (Fig. 12).

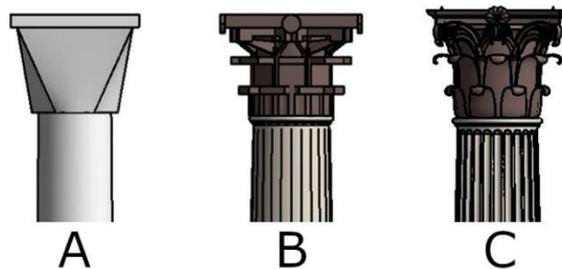


Figura 12. Tre diversi livelli di dettaglio grafico di un modello HBIM di capitello corinzio.

Nell'ambito del livello di dettaglio, è possibile considerare un'ulteriore suddivisione, distinguendo la componente grafica (livello di dettaglio grafico) dalla componente semantica (livello di dettaglio semantico) della rappresentazione.

In base invece alle finalità per cui viene creato il modello, deve essere delineato il livello di sviluppo da raggiungere. Riprendendo l'esempio del capitello corinzio, se la finalità fosse quella di effettuare un'analisi strutturale dell'edificio, una rappresentazione concettuale (Fig. 12 -A) del modello sarebbe sufficiente per lo scopo prefisso (così come richiesto dai software dedicati). Viceversa, nel caso di un intervento di restauro sarebbe necessario mostrare il manufatto così come è realizzato, approfondendo la modellazione con un livello di sviluppo avanzato (Fig. 12 -C). Si tratta quindi di un fattore che deve essere definito preliminarmente alla fase di modellazione, in maniera da stabilire a quale livello di definizione deve spingersi il modello.

A tal proposito si citano in seguito i livelli di dettaglio stabiliti dall'AIA BIM Protocol:

- LOD 100 – Rappresentazione concettuale;
- LOD 200 – Modelli generici e indicazione quantità;
- LOD 300/350 – Progettazione Esecutiva;
- LOD 400 – Progettazione Costruttiva;
- LOD 500 – Manufatto così come realizzato.

Tale tipo di differenziazione può essere paragonata in qualche modo alla più generale vigente suddivisione in fasi della progettazione edilizia legato al Codice degli Appalti (D. lgs. 50/2016):

- Progetto di fattibilità tecnica ed economica (progetto preliminare);
- Progetto definitivo;
- Progetto esecutivo.

## 3. HBIM E METODOLOGIE DI RILIEVO

### 3.1 Metodologie di rilievo e accuratezza

Alla base della costruzione di un modello HBIM, si può utilizzare come riferimento una nuvola di punti del manufatto reale, generata a partire dal rilievo. Come accennato in precedenza, negli ultimi anni le tecnologie di rilievo tradizionali sono state rivolu-

zionate, modificando a volte anche in maniera sostanziale la tipologia di approccio durante la fase di acquisizione dei dati (Fig. 13). Notevoli passi avanti sono stati fatti nel campo del rilevamento TLS (Terrestrial Laser Scanning) e dell'acquisizione fotogrammetrica, che permettono entrambe di ottenere nuvole di punti 3D descrittive del manufatto rilevato.

In particolare, considerando le acquisizioni di tipo TLS, le strumentazioni odierne permettono di acquisire nuvole di punti molto dense, ottenendo livelli di accuratezza molto elevati, ed in tempi ridotti. Molte strumentazioni permettono ormai di effettuare l'allineamento automatico delle nuvole, e di georiferire correttamente il modello finale attraverso la connessione con le reti geodetiche GNSS.

I livelli di accuratezza raggiunti da questo tipo di tecnologia sono ormai dell'ordine del millimetro, sempre nel campo del rilievo architettonico.

Notevoli passi avanti sono stati raggiunti anche nel campo della fotogrammetria, dove lo sviluppo degli algoritmi basati sull'SfM (Structure from Motion) ha permesso di ottenere ricostruzioni di nuvole di punti di ambienti a partire dalle immagini acquisite, rilevando in maniera automatica i punti omologhi mediante il riconoscimento dei contorni corrispondenti attraverso processi iterativi. Attraverso tale procedura, collegando la nuvola di punti ad una rete di target di coordinate note (ottenute da rilievo GNSS con eventuale integrazione topografica), è possibile ad oggi ottenere livelli di precisione centimetrica.

Il recente sviluppo delle strumentazioni APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) ha potenziato enormemente le possibilità del rilievo fotogrammetrico, permettendo di ricostruire in maniera completa la nuvola di punti di un edificio, sulla base di immagini riprese in volo da angolazioni differenti.

È chiaro che, ad oggi, l'acquisizione TLS può ottenere livelli di accuratezza più elevati rispetto a quella fotogrammetrica, tuttavia, la distribuzione delle nuvole di punti ottenute da strumentazione TLS è strettamente legata al posizionamento dello strumento (motivo per cui talvolta è impossibile l'utilizzo in luoghi impervi).

L'acquisizione fotogrammetrica, invece, oltre a poter essere ottenuta utilizzando strumentazioni molto meno costose, garantisce, utilizzando delle riprese aeree, una distribuzione uniforme della nuvola di punti sul territorio di riferimento, indipendentemente dal livello di accessibilità dell'area (in relazione al posizionamento più libero dei punti di presa).

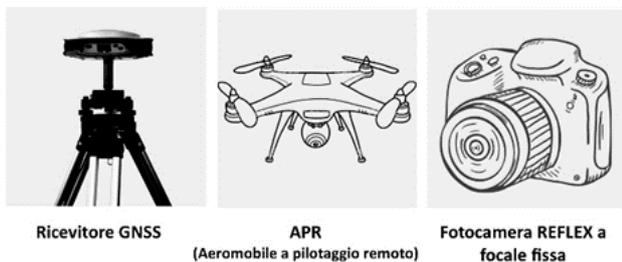
La possibilità di ottenere una nuvola di punti distribuita uniformemente, come verrà analizzato in seguito, risulta fondamentale ai fini della costruzione di un modello HBIM. Sono tanti, infatti, i fattori da considerare per scegliere la metodologia di acquisizione più opportuna e non sempre il livello di accuratezza massimo costituisce la prerogativa più importante. Inoltre bisogna sempre tenere conto del fatto che la nuvola di punti può essere utilizzata quasi esclusivamente solo come traccia per la creazione del modello BIM e che non è possibile una conversione automatica della stessa in modello HBIM. Come visto in precedenza, l'accuratezza della modellazione dipende molto dal LOD da raggiungere e si possono ottenere buoni risultati combinando opportunamente una modellazione di base con l'utilizzo di texture. In questo caso un attento lavoro sulle immagini diventa fondamentale per una buona resa visiva (Pocobelli et al., 2018). Alcuni software e plug-in invece permettono la conversione automatica di parti della nuvola in modelli 3D con annessi informazioni semantiche. Questi possono quindi essere inseriti all'interno delle famiglie di componenti dei software BIM. Un'operazione di questo tipo può essere effettuata solo nel caso in cui l'elemento considerato abbia un'effettiva corrispondenza con quelli appartenenti alle famiglie già presenti nel software, come muri, pilastri, porte ecc.. Infatti nel caso di elementi particolari come archi, cupole o elementi degradati diventa necessario creare manualmente nuove famiglie ricalcando parti della nuvola di punti (Scianna et al., 2018).

### 3.2 Livello di accuratezza in rapporto alle finalità del modello HBIM

La scelta della metodologia di acquisizione più opportuna in fase rilievo è strettamente connessa con le esigenze progettuali del modello a seconda che questo sia un modello HBIM o un semplice modello 3D. Tali esigenze, come visto in precedenza, possono differire notevolmente, influenzando le scelte metodologiche in fase di rilevamento.

Un caso esempio è stato quello della ricostruzione tridimensionale del Castello Manfredonico di Mussomeli (Fig. 14), sviluppata dal laboratorio GISLab, nell'ambito del progetto europeo PON NEPTIS (Scianna and La Guardia, 2017). L'obiettivo era quello di ottenere un modello 3D visualizzabile e navigabile in rete, utilizzabile, quindi, per finalità di condivisione del patrimonio culturale e di estensione dell'accessibilità ai diversamente abili. In questo caso, la scelta è ricaduta sulla ricostruzione fotogrammetrica di immagini scattate in volo da APR. L'estensione notevole dell'area di rilievo, l'irregolarità della superficie in esame e l'inaccessibilità di buona parte del sito hanno contribuito a ridurre l'accuratezza della nuvola di punti, pur mantenendo il range di errore di qualche centimetro (Tab. 1). Tuttavia, anche in questo caso, il modello ricostruito è stato pienamente funzionale per le esigenze progettuali richieste.

#### ACQUISIZIONE FOTOGRAMMETRICA



#### ACQUISIZIONE TLS (Terrestrial Laser Scanning)



Figura 13. Metodologie di rilevamento ed acquisizione dati.

Questa tecnica è tuttora in via di sviluppo, ed il contestuale miglioramento della qualità dei sensori e l'aumento della risoluzione delle camere, offre cospicui margini di miglioramento. Negli ultimi anni le strumentazioni APR sono state anche utilizzate equipaggiando i droni con strumentazione laser scanner, in maniera da scansionare in volo il territorio. Tuttavia i costi e i rischi legati a questo tipo di soluzione, ne limitano l'utilizzo.

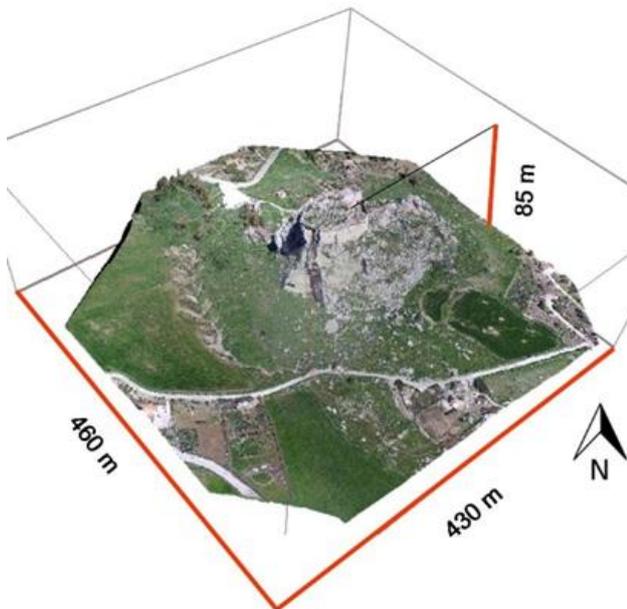


Figura 14. Margini del volume considerato per il rilievo del Castello di Mussomeli, da Scianna and La Guardia., 2017.

Dati elaborazione camera Zennuse X3	
Dimensioni sensore	6.17x4.55 mm
Risoluzione	4000x3000
Distanza focale	3.6 mm
Distanza focale eq.	20 mm
GSD Piazzale di ingresso (a 120 m)	5 cm/px
GSD corte principale (a 70 m)	2,91 cm/px
Errore medio	0.214 m
Numero di target	24

Tabella 1. Dati relativi all'acquisizione da APR nell'ambito del rilievo del Castello di Mussomeli, da Scianna and La Guardia., 2017.

Per la realizzazione di un modello HBIM, invece, possono essere necessari ulteriori accorgimenti a seconda del tipo di applicazione in cui sarà coinvolto il modello stesso (Fig. 15). Ad esempio, per evidenziare il quadro fessurativo di una muratura, oppure per monitorare gli spostamenti infinitesimi di un intradosso, è necessario ottenere un livello di accuratezza elevato. In questo caso è fondamentale acquisire una nuvola di punti con precisione millimetrica attraverso l'utilizzo di strumentazione TLS o eseguire un rilievo topografico di precisione.

In tutti gli altri casi, però, generalmente, avere a disposizione una nuvola di punti distribuita uniformemente con accuratezza centimetrica è sufficiente per la costruzione di un modello HBIM che risponda alle esigenze progettuali.

Applicazioni in scala architettonica	Accuratezza bassa (2-3 cm)	Accuratezza media (1 cm)	Accuratezza elevata (1-2 mm)
Calcolo strutturale	•	•	
Analisi energetica	•		
Mappatura degradi		•	
Quadro fessurativo			•
Monitoraggio			•
Computo metrico	•	•	
Ricostruzione		•	
Condivisione del patrimonio culturale	•		
Estensione accessibilità ai diversamente abili	•		

Figura 15. Livelli di accuratezza richiesti in base alle applicazioni del modello HBIM.

Considerando come esempio di studio l'attività di rilievo e la successiva costruzione del modello HBIM della fornace Penna (Fig. 16; Tab. 2-3), svoltesi per le sessioni Benchmark 2017 (Piras et al., 2017) e 2018 organizzate dalla Società Italiana di Topografia e Fotogrammetria (SIFET), si sono potute effettuare alcune riflessioni in merito alle tipologie di rilevamento per applicazioni HBIM.

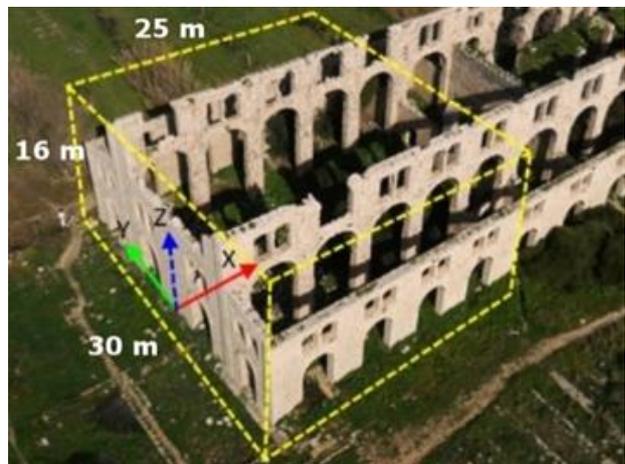


Fig.16 - Margini del volume considerato per l'attività del Benchmark SIFET 2017, da Piras et al., 2017.

UAV	PARROT BEBOP 2	DJI PHANTOM 4
Weight	500 g	1.380 g
Size	38,2 x 32,8 x 8,9 cm	48 x 48 x 19 cm
Max ascent speed	21 km/h	22 km/h
Max descent speed	60 km/h	14 km/h
Max speed	60 km/h	57,6 km/h
Max altitude	150 m	120 m
GNSS mode	GPS/GLONASS	GPS/GLONASS
Gimbal controllable pitch rage	From -90° to 0°	From -90° to +30°
Max flight time	25 min	28 min
Radio control	Tablet and smartphone	Tablet and smartphone
Max transmission distance	2 km (Wi-Fi: 300 m)	3,5 km CE 5 km FCC

	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$\Delta Z$ [m]	$\Delta TOT$ [m]
<b>Max</b>	0,057	0,068	0,064	
<b>Min</b>	-0,046	-0,097	-0,084	
<b>Mean</b>	-0,002	-0,004	-0,014	0,047
<b>St. dev.</b>	0,027	0,034	0,027	0,023

Tabelle 2-3 - Dati relativi all'acquisizione da APR nell'ambito dell'attività del Benchmark SIFET 2017, da Piras et al., 2017.

Il modello è stato realizzato in seguito ad una scomposizione delle parti dell'edificio (pilastri, archi, muri strutturali, ecc.) attraverso l'osservazione delle immagini scattate dal drone e ricalcando la geometria della nuvola di punti. Per ogni elemento sono state create apposite famiglie che rispettassero il reale comportamento degli stessi. Gli elementi sono stati quindi uniti rispettando la geometria reale. È stato ottenuto così un modello HBIM utilizzabile per molteplici attività, tra le quali l'analisi strutturale, la mappatura dei degradi, la fruizione online, sulla base della nuvola di punti generata dalla restituzione fotogrammetrica di immagini scattate da APR (Fig. 17). Non è stato necessario, quindi, avvalersi del rilievo TLS per ottenere un modello HBIM che potesse soddisfare tali requisiti. Infine, le textures utilizzate per completare il modello sono state ottenute dalle proiezioni ortogonali della mesh generata dalla nuvola di punti.



a)



b)

Figura 17. Confronto tra a) nuvola di punti e b) modello HBIM della Fornace Penna.

#### 4. DISCUSSIONE E RIFLESSIONI CONCLUSIVE

I casi di studio mostrati in questo articolo hanno messo in evidenza le potenzialità di una metodologia in via di sviluppo in cui sono ancora presenti diversi limiti. La maggior parte delle problematiche incontrate sono relative alla fase di modellazione e principalmente dovute alle ancora evidenti limitazioni dei software. I vantaggi dovuti all'utilizzo di una libreria di oggetti parametrici e gli elevati livelli di accuratezza raggiungibili in fase di rilievo, infatti, non sono pienamente sfruttabili.

La categorizzazione degli elementi costruttivi di un edificio non solo fornisce una maggiore conoscenza della struttura, approfondendo le informazioni ottenute tramite il rilievo, ma offre un grande aiuto nel pianificare una corretta modellazione e parametrizzazione di ogni componente della costruzione. Tuttavia la creazione di oggetti tridimensionali parametrizzati costituisce un passaggio molto complesso all'interno della fase di modellazione. La varietà delle forme nell'architettura storica infatti richiede operazioni di modellazione talvolta troppo complesse per i software resi disponibili sul mercato. Tuttavia, per quanto possibile, una parametrizzazione avanzata di un elemento architettonico non risulta sempre utile nell'applicazione del BIM al patrimonio culturale. Come evidenziato precedentemente infatti, la varietà di elementi architettonici dovuta a scelte stilistiche o alle tecniche costruttive e la presenza del degrado rendono la parametrizzazione degli elementi finalizzata alla loro ripetitività e riuso spesso poco utile ed estesa temporalmente. Spesso, infatti, risulta più efficace una semplice modellazione dell'elemento a cui aggiungere delle appropriate informazioni semantiche. Inoltre, nonostante gli ottimi livelli di accuratezza raggiunti oggi attraverso gli strumenti di rilievo, non sempre è possibile il loro pieno sfruttamento. A seconda delle finalità previste, varia il livello di sviluppo da raggiungere nella modellazione HBIM e quindi varia il tipo e la qualità di modellazione stessa. I software stessi inoltre, in alcune situazioni, richiedono una modellazione specifica delle singole parti in modo da rispettare vincoli e relazioni tra gli elementi. Ad esempio nel caso della modellazione della Fornace Penna, finalizzata anche all'analisi strutturale, è stato necessario semplificare in alcuni punti la vera geometria del manufatto. Per poter effettuare un calcolo strutturale automatico infatti, il software richiede una geometria più elementare. In altri casi invece, come ad esempio lo studio del quadro fessurativo di un edificio, il livello di accuratezza elevato è necessario. Quindi si può dire che il livello di accuratezza è in stretta relazione con il livello di sviluppo da raggiungere in fase di modellazione. Si è visto anche che l'interoperabilità del formato IFC non è sempre garantita a seconda del tipo di modellazione effettuata e del software utilizzato: un modello che rispetti la modellazione basata sulle famiglie di componenti di un software può presentare errori e mancanze se utilizzato in un altro software BIM.

Nonostante i limiti evidenziati, la costruzione di un modello HBIM risulta molto utile nel soddisfacimento delle esigenze relative alla conservazione e alla valorizzazione del bene culturale e costituisce uno strumento utilizzabile per tramandare e diffondere la conoscenza del patrimonio culturale per molteplici finalità.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

Aubin P. F., 2013, The Doric Column. *Renaissance Revit: Creating Classical Architecture With Modern Software*. Chapter 8, 2013, pp. 209-242.

Dore C., Murphy M., McCarthy S., Brechin F., Casidy C., Dirix E., 2015, Structural Simulations and Conservation Analysis -His-

- toric Building Information Model (HBIM). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W4, 2015, pp. 351-357.
- Eastman C., 1976, General purpose building description systems. *Computer-Aided Design*, Volume 8, Issue 1, 1976, pp. 17-26.
- Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K., 2008, Foreword. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. 2008, John Wiley & Sons, Inc.
- Huber D., Akinci B., Adan A., Anil E., Okorn B., Xiong X., 2011, Methods for Automatically Modeling and Representing As-built Building Information Models. *Proceedings of NSF Engineering Research and Innovation Conference*, Atlanta, Georgia, 2011.
- Ioannides M., Davies R., Chatzigrigoriou P., Papageorgiou E., Leventis G., Nikolakopoulou V., Athanasiou V., 2017, *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage*, 2017, Springer International Publishing Switzerland, pp. 161-199.
- Laakso M., Kiviniemi A., 2012, The IFC standard – a review of history, development, and standardization. *Journal of Information Technology in Construction*, Volume 17, 2012, pp. 134-161.
- Logothetis S., Delinasiou A., Stylianidis E., 2015, Building information modelling for cultural heritage: a review. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W3, 2015, pp. 177-183.
- Piras M., Di Pietra V., Visintini D., 2017, 3D modeling of industrial heritage building using COTSs system: Test, limits and performances. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W6, 2017, pp. 281-288.
- Pocobelli D. P., Boehm J., Bryan P., Still J., Grau-Bové J., 2018, Building information models for monitoring and simulation data in heritage buildings. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences- ISPRS Archives* Vol. 42, No. 2, pp. 909-916.
- Scianna A., Gaglio G. F., La Guardia M., 2018, BIM Modelling of Ancient Buildings. In *Euro-Mediterranean Conference* (pp. 344-355). Springer, Cham.
- Scianna A., Gristina S., Paliaga S., 2014, Experimental BIM Applications in Archaeology: A Work-Flow. *M. Ioannides et al. (Eds.): EuroMed 2014*, LNCS 8740, Springer International Publishing Switzerland, pp. 490–498.
- Scianna A., La Guardia M., 2017, Problematiche E Soluzioni Nel Rilievo Rapido E Nella Restituzione Fotogrammetrica Speditiva Di Beni Culturali In Contesti Ambientali Complessi. L'esempio Del Castello Manfredonico Di Mussomeli/Issues And Solutions On Quick Survey And Fast Photogrammetric Restitution Of Ch In Complex Natural Environments. The Example Of The Manfredonic Castle Of Mussomeli. *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia (SIFET)*, anno 2017, n.4, Sezione:Scienza, pp. 1-7.
- Scianna A., Castagnetti C., Matrone F., 2018), IL BENCHMARK SIFET 2018: Restituzione di modelli 3D/BIM/HBIM da nuvole di punti prodotte da rilievi UAV o laser scanning terrestre. *Atti della 22ma edizione della Conferenza Nazionale Asita 2018*, pp. 901-910.
- Volk R., Stengel J., Shultmann F., 2014, Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs. *Automation in Construction*, Volume 38, 2014, pp. 109-127.