

IL BIM PER LA MODELLAZIONE E GESTIONE INFORMATIVA DEL PATRIMONIO ESISTENTE E STORICO

Premessa

Nella sua prima applicazione nel settore delle costruzioni, l'**approccio BIM** ha avuto finalità di governo del processo edilizio per le **nuove costruzioni**.

Successivamente, la metodologia si è estesa nella forma **HBIM** rivolgendosi al settore degli edifici esistenti di interesse storico con **finalità**:

- **documentale** dello stato di fatto
- **gestionale** del progetto di recupero, del cantiere e delle successive fasi manutentive.

L'**HBIM**, dunque, differisce dal **BIM** in quanto l'edificio è sempre esistente, quindi si parla di modellazione *reality-based* ed il modello dovrà contenere tutte le informazioni inerenti all'edificio, acquisite attraverso un accurato processo di conoscenza della sua:

- consistenza geometrica
- morfologia
- caratterizzazione materico-costruttiva
- successione storica delle fasi costruttive
- altre informazioni

L'approccio promuove l'**efficace divulgazione della conoscenza** attraverso **elaborati e report interconnessi** al fine di gestire gli interventi risparmiando in termini di tempo e di risorse e limitando gli errori.

I vantaggi dell'utilizzo del BIM per il patrimonio storico sono legati all'efficiente **gestione delle risorse informative** nel tentativo di superare le criticità dovute alla **frammentarietà o insufficienza della documentazione disponibile** e, pertanto,

limitare le **incertezze** nella ricostruzione della **conoscenza** e nella **valutazione dello stato dei luoghi**.

Il valore aggiunto del BIM per il costruito risiede nella **maggiore accessibilità della conoscenza** attraverso l'impiego di piattaforme interoperabili, che si basano su:

- **costruzione ed implementazione di database relazionali**
- **collaborazione** delle expertises, dalla fase di progettazione a quelle di esecuzione e gestione degli interventi.

L'approccio HBIM consiste in:

1. **rilievo** delle strutture esistenti
2. **modellazione**
 - 2.2 modellazione **di informazioni**
 - 2.3 modellazione **di dati** in formati differenti
3. **gestione informativa** della conoscenza incrementale acquisita per finalità **diagnostiche** e, conseguentemente, per la formulazione di **ipotesi di intervento**.

Il BIM per gli edifici esistenti è nato e si è diffuso in quelle **nazioni** in cui la **conservazione del patrimonio** ha maggiore rilevanza e **risvolti significativi in termini economici, ambientali e culturali** (Regno Unito, Irlanda, Canada, Italia, Spagna, Egitto, etc.)

Un crescente interesse si è sviluppato per l'argomento nell'ultimo decennio, essenzialmente dal 2013 ad oggi. A livello globale, esistono differenti denominazioni che fanno capo al medesimo approccio:

- **HBIM** Historical Building Information Modelling
- **HBIM** Heritage Building Information Modelling
- **HBIMM** Historic Building Information Modelling and Management
- **BHIMM** Built Heritage Information Modelling/Management
- **CHIM** Cultural Heritage Information Management

- **CH and FM modelling** Cultural Heritage Modelling e Facility Management Modelling

In Inghilterra, l'**Historic England** - una istituzione esecutiva del governo britannico che si occupa della protezione del patrimonio storico e culturale - ha pubblicato una linea guida per implementare, in modo efficace e consapevole, l'approccio BIM nei progetti sul patrimonio esistente (2017).

Mentre, nel 2018, il **capitolo spagnolo della BuildingSmart** ha pubblicato una linea guida, specifica sull'utilizzo del BIM per il patrimonio culturale, a cui hanno contribuito professionisti ed accademici.

Tuttavia, non esiste attualmente un approccio internazionalmente approvato sull'uso del BIM per il costruito.



I documenti per la gestione del costruito con approccio BIM nel Regno Unito e Spagna

Da queste premesse si deduce, con immediatezza, **la particolare valenza del BIM per il recupero e per il restauro**. Questi settori, infatti, hanno avuto da sempre una

specifica **criticità** nel collazionare e tenere insieme una molteplicità di informazioni, spesso provenienti da fonti diverse e disponibili in formati assai differenti tra loro. Per altro verso, appare pure evidente come la genesi di un progetto di recupero parta dalle attività di rilievo e come queste, con le attuali tecniche, producano **restituzioni già strutturate (se non altro perché tutte in formati digitali)** per essere agevolmente gestite nelle logiche della modellazione informativa proposta dal BIM.

Una ulteriore considerazione riguarda la particolare vocazione a “risolvere” le criticità dei processi di collazione offerte dagli **ambienti di condivisione dati** che appaiono, forse, ancora più efficaci nel caso del governo dei processi edilizi per il recupero e il restauro di quanto lo siano per il caso delle nuove costruzioni. Non esiste ancora una sperimentazione consolidata in tal senso, ma non vi è dubbio che nei prossimi anni assisteremo a notevoli sviluppi che rivoluzioneranno gli approcci complessivi.

Se poi si guarda all'utilizzo dei **Visual Programming Language (VPL)**, come, ad esempio, DYNAMO, apparirà ancora più chiaro il potenziale dell'utilizzo dell'approccio BIM nei settori del recupero e del restauro: poter strutturare con il VPL sequenze logiche specifiche è di grande ausilio per la decodifica e per la gestione delle attività di diagnostica e di individuazione degli interventi che sono tipiche del recupero/restauro.

I passaggi da affrontare in un approccio HBIM

Fase 1 - Organizzazione del gruppo di lavoro

Fase 2 – Analisi preliminare

Fase 3 – Rilievo geometrico e reverse engineering

Fase 4 – Costruzione del modello HBIM “as-built/as-damaged”

Fase 5 - Arricchimento semantico

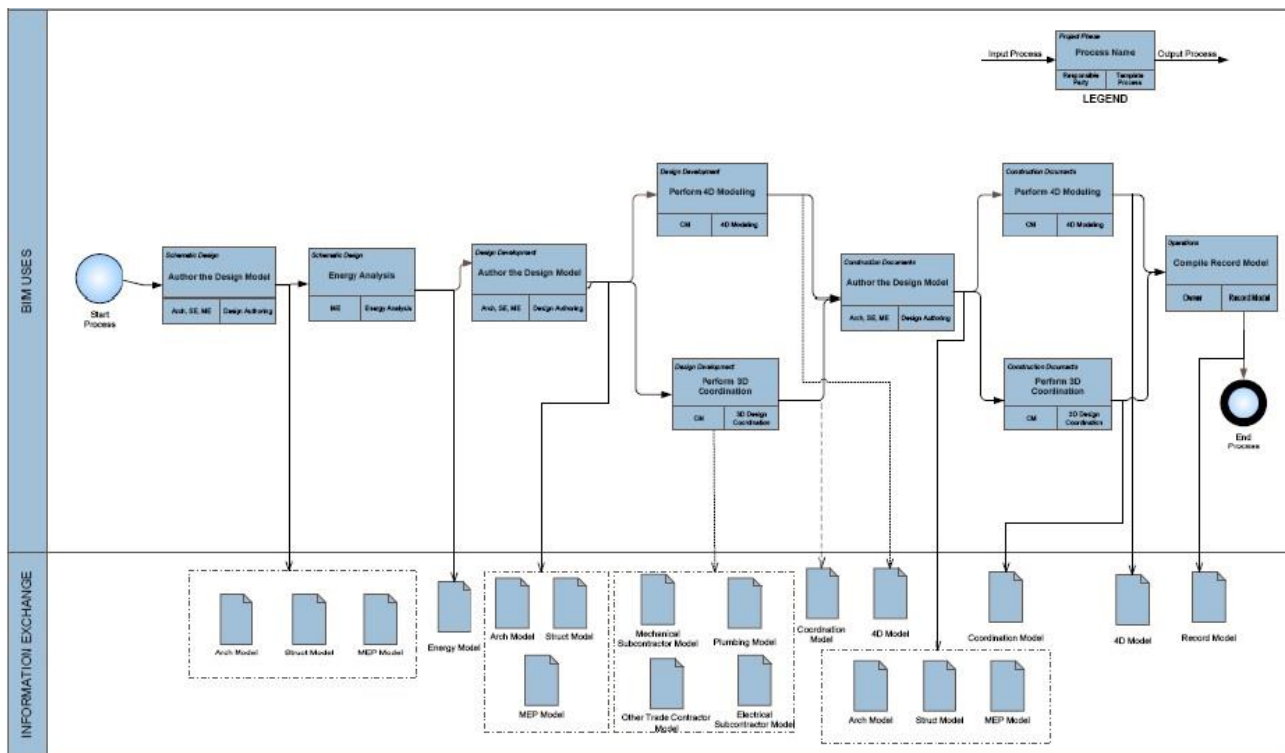
Fase 6 - Condivisione e gestione informativa

Fase 7 - Gestione del processo costruttivo di interventi di recupero

Fase 1 - Organizzazione del gruppo di lavoro

Lo step iniziale è l’**organizzazione del gruppo di lavoro** volta a definire responsabilità e ruoli, modelli di scambio, requisiti informativi e relativa strutturazione, per raggiungere il livello di dettaglio grafico ed informativo compatibile con gli usi del modello. Tali specificazioni vengono riportate dalla committenza nel **Capitolato Informativo** (l’Employer’s Information Requirements) ed esplicitate dall’affidatario prima nell’**offerta (oGI)** e, successivamente, nel **piano per la Gestione Informativa (pGI)** (ovvero nell’Execution Plan britannico).

Gli obiettivi e gli usi del BIM e la definizione degli scambi informativi vengono descritti nelle **mappe di processo**, ovvero nel formato Business Process Management and Notation (BPMN).



Esempio di mappa di processo

Una **classificazione di dati/informazioni** è necessaria per la rappresentazione e la gestione della conoscenza attraverso la mappatura dei dati per ogni modello di componente edilizio e fase di lavoro. Questa classificazione comprende **modelli e standard di gestione delle informazioni** (Model View Definition (MVD), IFC (Industry Foundation Classes), per fornire protocolli di comunicazione e promuovere l'interoperabilità.

Viene, quindi, definito il **Livello di Sviluppo (LOD)**. Si parte dal livello di dettaglio “**as-built**”, che diventa “**as-damaged**” nel caso l’edificio sia interessato da fenomeni di degrado e dissesti. I LOD comprendono il **Livello di Dettaglio (LoD)** e il **Livello di Informazione (LoI)**. Il LoD si riferisce agli elementi grafici, il LoI si riferisce alla descrizione di informazioni non grafiche.

In campo internazionale il livello di dettaglio della rappresentazione architettonica per il **recupero/restauro** è il **LOD 500**.

La **UNI UNI 11337-4:2017** definisce gli specifici **LOD per il restauro**.

I LOD da A a E non sono significativi se non per alcune opportune semplificazioni dei modelli di natura specialistica.

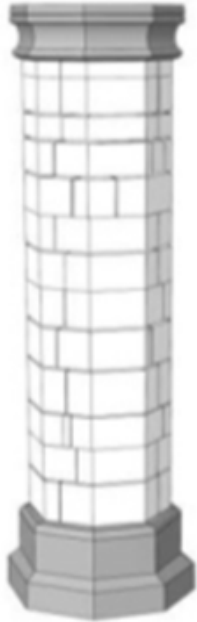
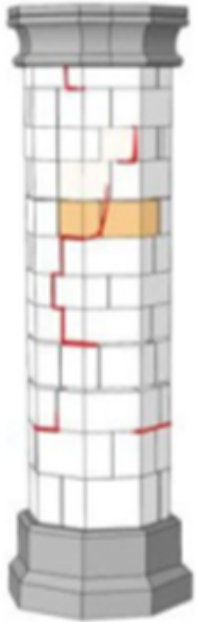
Nel **LOD F**, gli oggetti esprimono **la virtualizzazione rilevata sul luogo** dello specifico sistema esistente (**as-built**). Le caratteristiche quantitative e qualitative (dimensione, forma, ubicazione, orientamento, costo, ecc.) sono quelle specifiche del singolo oggetto. E' possibile identificare, ad esempio, i "sistemi" ed i "subsistemi" fino ai "componenti" in relazione ai "prodotti (da costruzione)" effettivamente installati. Sono definiti per ogni singolo prodotto **gli interventi di gestione manutenzione e/o riparazione da eseguirsi lungo un arco temporale di programmazione.**

Nel **LOD G**, gli oggetti esprimono **la virtualizzazione aggiornata dello stato di fatto** di una entità **in un tempo definito**. Si ottiene così la **rappresentazione storicizzata dello scorrere della vita utile di uno specifico sistema aggiornato rispetto a quanto trattato o installato in un precedente intervento**. Le caratteristiche quantitative e qualitative (dimensione, forma, ubicazione, orientamento, ecc.) sono aggiornate rispetto ad un precedente stato di fatto.

E' annotato ogni singolo (e significativo) intervento di gestione, manutenzione e/o riparazione e sostituzione eseguito nel tempo, così come sono registrate le forme di degrado eventualmente in essere.

Dunque, il modello HBIM collaziona informazioni grafiche, non grafiche ed attributi semantici relativi a:

- forme di degrado rilevati
- stratificazione costruttiva
- interventi subiti nel tempo
- caratteristiche materico-costruttive
- programmazione degli interventi del piano di manutenzione
- gestione degli interventi
- registro degli interventi

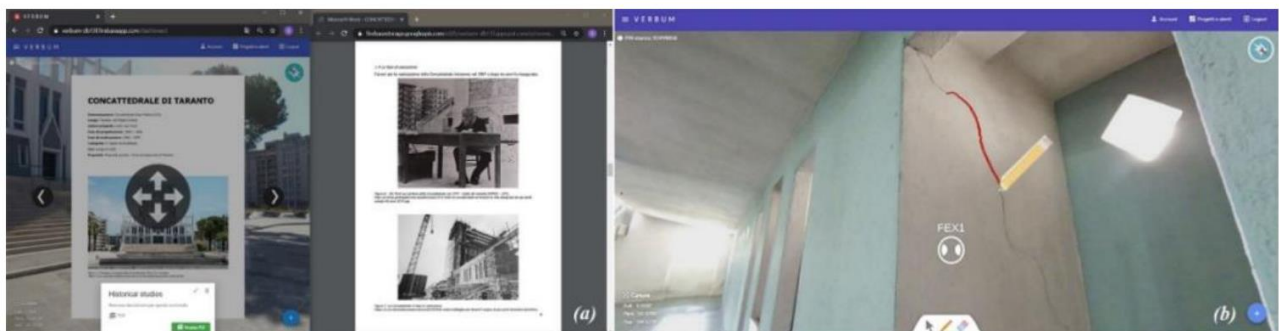
LOG F	LOG G
	
<p>L'oggetto è graficamente virtualizzato con un dettagliato sistema geometrico. Dimensioni, forme, localizzazione e orientamento sono specifici e corretti. Tutti i componenti dell'oggetto sono rappresentati in 3D e riflette la condizione "as-built".</p>	<p>L'oggetto è graficamente virtualizzato con un dettagliato sistema geometrico. Dimensioni, forme, localizzazione e orientamento sono specifici e aggiornati, tenendo in considerazione l'intero ciclo di vita e il precedente stato dei luoghi. La rappresentazione geometrica 3D deve essere fornita quando gli elementi vengono restaurati o sostituiti. Il rilievo del degrado deve essere rappresentato.</p>
<p>RESTAURO</p> <p>Livello di Informazione – Colonna</p> <p>LOI F – completa identificazione e descrizione dell'elemento (forma, localizzazione, dimensioni, orientamento, relazioni con gli altri elementi, analisi materica, processi, forme di degrado, danni, instabilità, diagnosi, interventi subiti, monitoraggio, pianificazione delle ispezioni e degli interventi periodici).</p> <p>LOI G – integrazione con l'informazione raccolta durante la gestione delle fasi (ispezioni, monitoraggio, registro degli interventi manutentivi programmati e a guasto avvenuto).</p>	

Proposta di LoD-LoI ('F and G') nella UNI 11337-3-2017 (Brumana et al., 2017).

Fase 2 - Analisi preliminare

La fase successiva è l'**analisi preliminare** della documentazione storica, fotografica e archivistica e dei disegni disponibili, al fine di ricostruire i caratteri tipologici e morfologici ed individuare alcune evidenti caratteristiche materico-costruttive, le tecniche di costruzione, le trasformazioni e gli interventi subiti. Le informazioni raccolte durante questa fase sono rilevanti per la pianificazione di indagini strumentali di rilievo geometrico, caratterizzazione materico-costruttiva e rilievo del degrado.

Recentemente, strumenti user-friendly sono stati implementati e testati per supportare gli attori del progetto di recupero e restauro sin dalla fase di analisi preliminare, ancor prima che il modello parametrico BIM sia completo. In concreto, strumenti di collaborazione di realtà virtuale, costruiti a partire da immagini sferiche acquisite in cantiere con sensori fotografici, consentono di ricostruire rapidamente l'edificio storico oggetto di lavoro, collegando tra loro le foto sferiche seguendo i reali percorsi distributivi. Inoltre, gli stessi strumenti posseggono strumenti di annotazione manuale di evidenze di quadri umidi e lesionativi, in analogia con la compilazione delle tradizionali schede di sopralluogo, come pure, appuntare, in via preliminare, le prime ipotesi di localizzazione e selezione delle indagini diagnostiche da programmare. Contestualmente, è possibile caricare nell'esatto punto di interesse, all'interno della piattaforma predisposta, la documentazione di supporto alla comunicazione tra gli attori del processo. Ad esempio, la documentazione storica, il piano di indagine delle prove diagnostiche da eseguirsi in sito, immagini storiche ed ricostruzioni dell'evoluzione costruttiva nel tempo, sotto forma di documenti pdf, immagini o video.



Strumenti di collaborazione e comunicazione in realtà virtuale, a partire da foto sferiche reali (es. **VERBUM**: S. Bruno, A. Sciotti, A. Pierucci, R. Rubino, T. Di Noia, F. Fatiguso, VERBUM – virtual enhanced reality for building modelling (virtual technical tour in digital twins for building conservation), *Journal of Information Technology in Construction*. 27 (2022))

Fase 3 - Rilievo geometrico e reverse engineering

Il rilievo geometrico viene effettuato integrando le tecniche tradizionali (rullina, metro laser, etc.) con tecnologie strumentali innovative. In quest'ultima categoria rientrano le tecniche per **l'acquisizione di misure tridimensionali** che può essere effettuata attraverso l'utilizzo di sensori tridimensionali che consentono di generare un'immagine 3D della scena che inquadrano.

La tipologia di sensori maggiormente adoperata per il rilievo geometrico è quella che utilizza la **radiazione luminosa**.

- Se si tratta di **luce naturale**, i metodi di misura si dicono “**passivi**” (**tecnica fotogrammetrica**, teodoliti, etc.)
- se invece la **luce è codificata** (es. luce laser), si parla di metodi “**attivi**” (**laser scanner**, strumenti a proiezione di luce strutturata, radar, stazioni totali, etc.)

Nella fase di rilievo è auspicabile la combinazione di differenti strumenti e tecniche di acquisizione perché **l'impiego combinato** delle due tecnologie risolve le criticità di ciascuno dei due metodi, inoltre le informazioni metriche provenienti da rilievi diretti, mappe e **rilievi CAD** esistenti sono indispensabili per **georeferenziare** e **scalare** il modello.

La selezione della tecnica di rilievo e dei dati da impiegare avviene in funzione di:

- proprietà della superficie da rilevare
- accuratezza e dettaglio geometrico richiesti
- dimensioni dell'oggetto
- collocazione spaziale
- esperienza degli operatori
- i costi del progetto

In particolare, il laser scanning rileva con difficoltà:

- superfici trasparenti
- superfici riflettenti
- superfici scure

mentre la tecnica fotogrammetrica riesce a catturare superfici con differente esposizione e proprietà ottiche sfavorevoli.

Le tecniche di rilievo possono essere eseguite in **modalità aerea** o **terrestre** (*close-range*).

- Nella **configurazione aerea**, le attrezzature sono installate su veivoli a pilotaggio remoto UAV (Unmanned Aerial Vehicles, ovvero **droni**) al fine di acquisire l'ambiente esterno dell'edificio e/o aggregati urbani.
- Mentre, la **configurazione terrestre** prevede l'installazione della strumentazione a terra su supporti.

In entrambi i casi, la campagna di acquisizione viene pianificata attraverso la **redazione di piani di acquisizione**, definendo:

- il numero di punti di presa
- la distanza dall'oggetto, da cui dipende il dettaglio.

a. Metodi attivi

I **sensori ottici attivi** rilevano la **posizione spaziale** della superficie o del punto rilevato, con la possibilità di associare l'**informazione cromatica** (pur di bassa qualità) registrata dal laser stesso o da una fotocamera digitale esterna integrata.

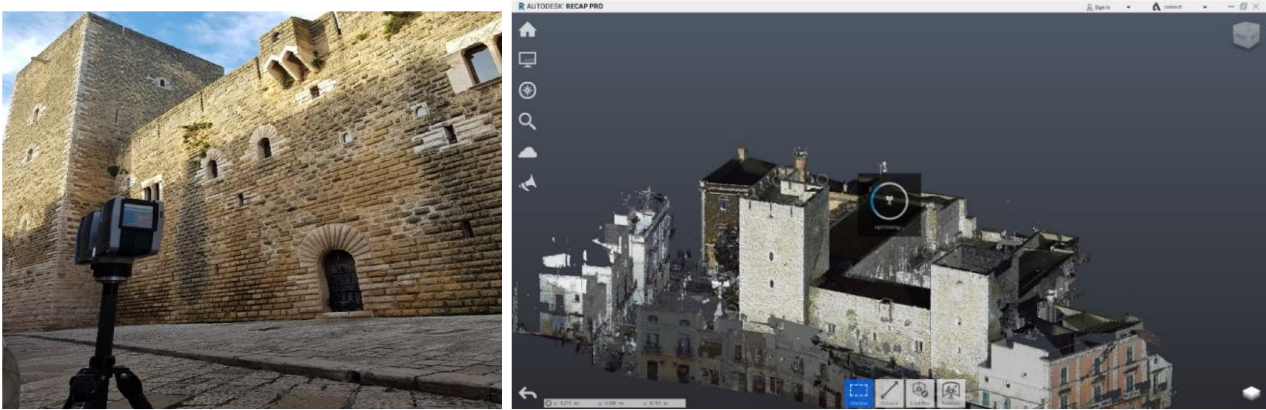
PRO: Gli strumenti attivi acquisiscono direttamente e in poco tempo grandi quantità di dati relativi ad una geometria complessa con un'accuratezza elevata.

CONTRO: questi sensori sono molto costosi, voluminosi e con limitata flessibilità di utilizzo.

Uno strumento attivo che impiega luce laser viene normalmente chiamato **range camera o laser scanner 3D**.

I rilievi geometrici con laser scanner appartengono alla categoria *range-based*.

- L'acquisizione di oggetti architettonici di medio-piccola dimensione viene effettuata con scanner che lavorano col principio di misura della triangolazione
- L'acquisizione a scala architettonica/urbana viene effettuata con sensori detti a tempo di volo o Time of Flight (TOF).



*Acquisizione terrestre laser scanning e ottimizzazione della nuvola di punti acquisita
(tesi di Antonio Morelli, Castello di Gioia del Colle, 2019)*

b. Metodi passivi

Tra i metodi di acquisizione passiva si ritrovano quelli basati sulla elaborazione metrica delle immagini (*image-based*) che trasformano i dati estratti dalle immagini in coordinate metriche 3D (attraverso algoritmi di *Structure for Motion* - SfM).

In tal modo, le immagini riportano informazioni per riprodurre **geometria** e **texture** del manufatto fotografato e, dunque, generare **modelli tridimensionali foto-realistici**.

PRO: strumentazione meno costosa e di più facile impiego (fotocamera).

CONTRO: La tecnica fotogrammetrica richiede un processo difficoltoso nel caso di acquisizione di grandi e complessi siti archeologici o architettonici (soprattutto nella fase di *merging* dei locali) o di utilizzo di immagini non calibrate o molto separate.

I recenti sviluppi hanno automatizzato molte procedure di restituzione, tuttavia la restituzione di un modello completo, preciso e dettagliato richiede l'intervento manuale di un utente.

In **fotogrammetria close-range**, se un oggetto viene ripreso in almeno due immagini prese da punti di vista differenti, le diverse posizioni dell'oggetto nelle immagini (la cosiddetta **parallasse**) consentono di ottenere **viste stereoscopiche** e derivare **informazioni 3D per sovrapposizione delle immagini**.

Il piano di acquisizione viene disegnato una volta identificata la **tipologia di fotocamera** da adoperarsi, di cui è necessario conoscere la **lunghezza focale**.

Dalla **lunghezza focale** dipende l'**accuratezza del rilievo fotogrammetrico**, valutata attraverso il *Ground Sampling Distance (GSD)*.

Il GSD è la distanza tra i punti centrali di due pixel vicini di un'immagine digitale, misurata sul terreno reale e si misura in mm/pixel o cm/pixel.

Minore è il GSD e maggiori sono i dettagli rappresentati all'interno di un'immagine.

La formula per calcolarlo è:

$$GSD = (D \times d) / f$$

- D è la distanza tra fotocamera e superficie (in aerofotogrammetria aerea equivale all'altezza di volo)
- d è la dimensione del lato di un pixel (che ha forma quadrata) del sensore fotografico (dipende dalla dimensione del sensore e dalla sua risoluzione)
- f è la lunghezza focale dell'ottica.

La lunghezza focale influisce sull'ampiezza della scena inquadrata in un'immagine e, dunque, sull'**angolo di campo, angolo di ripresa o Field of View (FOV)**, che si misura in gradi.

ESEMPIO: Per una fotocamera con lunghezza focale di 50 mm, l'angolo di ripresa è pari a 46°.

Inoltre, la distanza della fotocamera dalla superficie da registrare influisce sull'estensione di porzione acquisita. La **sovrapposizione** tra immagini consecutive non deve essere inferiore al **60/70%**, e dipende dall'apertura focale.

TIPS (suggerimenti) PER L'ACQUISIZIONE:

1. Nel caso specifico della fotogrammetria, prima di effettuare la sessione fotografica, si effettua la **calibrazione della fotocamera** utilizzando **targets con posizione ben precisa** in uno spazio tridimensionale, che vengono fotografati ad alta risoluzione, **oppure** utilizzando anche **punti fissi dell'ambiente con una precisione inferiore**, e per migliorare questo secondo

procedimento, senza target, è possibile inserire una misura nota tra due punti nello spazio per dare una corretta scala metrica all'oggetto.

2. Le foto devono essere scattate utilizzando le **impostazioni automatiche** della fotocamera, cercando di non modificare l'apertura dell'obiettivo o dell'oculare, e senza cambiare lo zoom, lasciando sempre il valore minimo di distanza, cioè lo zoom più basso.
3. Gli scatti devono essere fatti utilizzando un cavalletto, in modo **da mantenere un'altezza fissa** e in modo che le **immagini** siano **il meno mosse possibili**.
4. Le foto vanno scattate restando paralleli all'oggetto, muovendosi della distanza ottenuta dal piano di acquisizione con una sovrapposizione del 70% fra una foto e l'altra e, successivamente, fotografando a quote differenti, dal suolo fino all'altezza di sviluppo dell'oggetto, in modo da coprire l'intera estensione.
5. Successivamente, i parametri di orientamento esterno delle immagini vengono calcolati con la procedura di *bundle adjustment* e il principio della collinearità, sulla base dei parametri calcolati nella fase precedente di calibrazione.
6. La restituzione 3D della scena viene poi effettuata attraverso ulteriori **misure di punti omologhi** tra le immagini che vengono individuati nelle zone più rilevanti della scena da restituire, in modo da poterle definire con linee e superfici, soprattutto in campo architettonico.
7. Una volta estratte le corrispondenze tra le immagini, le coordinate **3D dell'oggetto** vengono calcolate utilizzando nuovamente le **equazioni di collinearità** e a seconda del numero e densità di punti 3D restituiti, si derivano **nuvole di punti dense o sparse**.
8. L'insieme di punti viene di solito segmentato o convertito direttamente in una **superficie poligonale (mesh)**.
9. Il **modello geometrico viene texturizzato**, proiettando direttamente le immagini o creando un'ortofoto, per una visualizzazione fotorealistica.

Esempi di software di restituzione 3D fotorealistica sono:

- Agisoft Metashape®
- Recap Photo Autodesk®

In particolare, Agisoft Metashape® possiede gli strumenti per l'allineamento delle macchine fotografiche e genera nuvole sparse e dense di punti (che posseggono informazioni metriche e cromatiche) o superfici poligonali (mesh), ortofoto e modelli foto-realistici con l'inserimento delle texture raccolte attraverso le foto.

TIPS PER LA POST-ELABORAZIONE:

1. Al fine di rendere il processo meno laborioso, è possibile analizzare le foto in gruppi separati, ovvero *chunk*, che vanno successivamente allineati gli uni agli altri ed uniti.
2. Il passo successivo è quello di **pulizia delle nuvole** generate dagli elementi non facenti parte dell'edificio (alberi, ostacoli, cielo, etc).
3. All'interno della nuvola di punti, sia densa che sparsa, è possibile individuare manualmente i punti detti "**point mark**" nelle foto in cui si ripresenta lo stesso punto, rispetto ai quali il **software acquisisce maggiore confidenza** sulla posizione reale dello stesso punto, per posizionarlo nello spazio tridimensionale.
4. I **markers** sono adoperati, altresì, per inserire una **scala metrica**, aggiungendo misure note, e, dunque, **scalare il modello**.
5. A partire dalla nuvola densa di punti, viene generata la **mesh poligonale** che va elaborata al fine di eliminare eventuale presenza di fori nella superficie, sintomo di limitata definizione dei dati acquisiti.
6. Ricavata la mesh, è possibile visualizzare una **texture autogenerata (ortomosaico)** che può essere esportata come immagine. Le foto scattate vengono posizionate sulla mesh per l'ottenimento di un rendering foto-realistico che può essere proiettato rispetto a piani determinati dall'utente per l'esportazione di ortofoto.
7. Le **mesh** così **ottenute**, possono essere esportate nel formato *.obj per ulteriori **elaborazioni**, come la **segmentazione di elementi architettonici**, da eseguire in altri software (ad es. Meshlab).

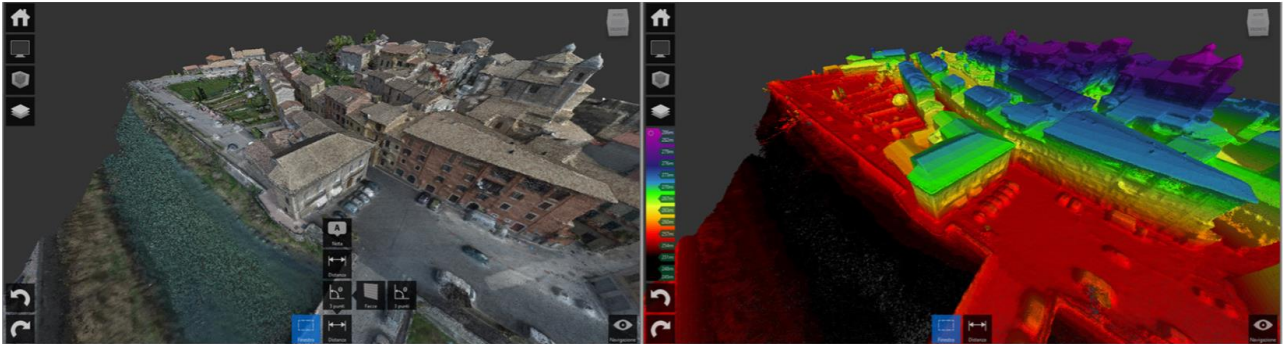
c. Reverse engineering

La ricostruzione del modello 3D fotoricostituito e della nuvola di punti, nella reale georeferenziazione e scala, è definita reverse engineering.

Le nuvole di punti, ottenute con laser scanning o fotogrammetria, possono essere esportate per l'utilizzo in altri software.

Il dato grezzo necessita di un intenso lavoro di post-elaborazione anche attraverso software differenti da quelli utilizzati dalla strumentazione, ad esempio, allo scopo di utilizzarli in software di modellazione BIM.

I formati (proprietary o liberi) in cui vengono condivise le nuvole di punti sono .asc, .obj, .pts ecc. a seconda dell'interoperabilità tra i software e dell'utilizzo (talvolta sarà necessario condividere solo dati geometrici, oppure dati geometrici e cromatici contemporaneamente).



Analisi della nuvola di punti ottenuta via laser scanner (Pelliccio, Saccucci, Grande, 2017).



Nuvola di punti e mesh ottenute attraverso tecnica fotogrammetrica (tesi di Domenico Modugno, Il rilievo del costruito nel BIM, 2016)

Fase 4 - Costruzione del modello HBIM “as-built/as-damaged”

Il modello BIM dell'edificio esistente viene costruito sulla base dei dati ed informazioni seguenti:

- Elaborati grafici esistenti (cartacei e CAD)
- Studio tipologico e morfologico

- Dati acquisiti via laser scanner e fotogrammetria, in modalità terrestre o aerea (droni) (*reverse engineering*)
- Librerie di oggetti parametrici esistenti

a. Uso di disegni CAD

Una delle tecniche maggiormente utilizzate per la modellazione BIM si basa sull'**utilizzo di un disegno vettoriale CAD** ottenuto dal rilievo di tipo tradizionale ed importato in un software di modellazione BIM per la costruzione del modello.

Tuttavia, questo metodo è caratterizzato da una estrema semplificazione: la prima viene effettuata sugli elaborati stessi, la seconda fase di semplificazione è legata all'uso di elementi standard del software.

b. Point-to-BIM/Scan-to-BIM

Qualora disponibili, le nuvole di punti e le mesh post-elaborate rappresentano il dato adoperato per la conversione in oggetti parametrici BIM dei componenti architettonici dell'edificio storico (fase **point-to-BIM/scan-to-BIM**). La creazione di modelli parametrici BIM degli elementi costruttive può essere effettuata tramite procedure **manuali, semi-automatiche o automatiche**, raggiungendo il livello di dettaglio grafico prefissato, in funzione del Livello di Accuratezza (LOA) e direttamente legato alla selezionata scala di rappresentazione.

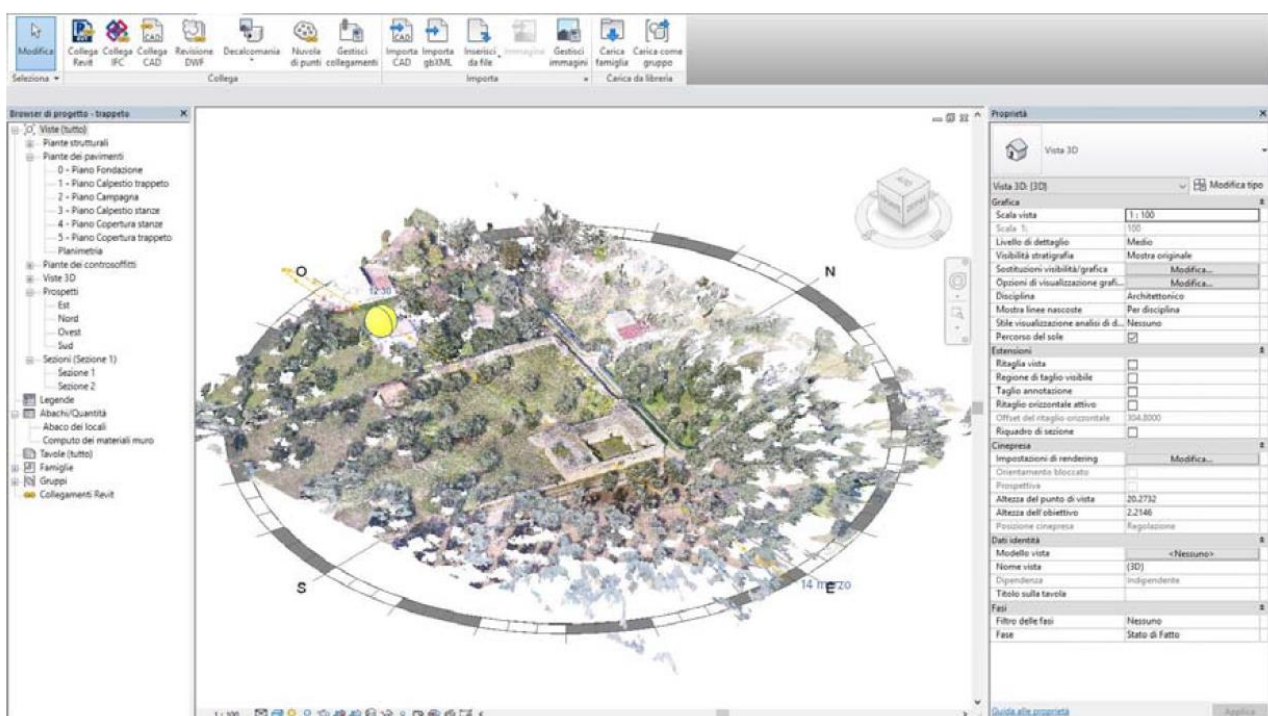
Gli oggetti BIM che rappresentano componenti edilizi ed architettonici ricorrenti delle tipologie edilizie e costruttive possono contribuire alla **popolazione della libreria di oggetti parametrici**.

1. Il metodo di **modellazione manuale** utilizza le nuvole di punti, importate nei software BIM (in formato proprietario *.rcp/*.rcs o formati non elaborati come *.las), come riferimento metrico per tracciare le primitive rispetto alle quali effettuare le operazioni booleane (es. estrusioni) o *Boundary Representations* (B-Rep). Tale procedura, che richiede comunque una notevole mole di lavoro, risulta abbastanza precisa, e ricalca la reale posizione degli oggetti rilevati nello spazio. La modellazione manuale può essere eseguita per oggetti di libreria di

componenti edilizi ricorrenti o come solidi di modellazione *in-place*, qualora specifici dell'edificio. In dettaglio, le procedure manuali possono essere eseguite sia disponendo dell'intera nuvola di punti, una volta caricata in ambienti BIM, come ad esempio per la modellazione dell'involcro edilizio (murature, orizzontamenti), oppure previa segmentazione delle stesse in elementi costruttivi identificati (ad esempio colonne, decorazioni, etc).

A seconda delle decisioni effettuate *ex-ante* sulla modellazione ed del tipo di accuratezza che si vuole raggiungere, viene definita la procedura di modellazione, soprattutto delle murature. Talvolta, è preferibile eseguire una semplificazione degli elementi architettonici e strutturali, ad esempio sulla modellazione della muratura che, generalmente, presenta sezioni irregolari e fuori-piombo. In questo modo, l'utilizzo di oggetti parametrici presenti nel software garantiscono la piena capacità di adoperare parametri geometrici e alfanumerici per la gestione informativa.

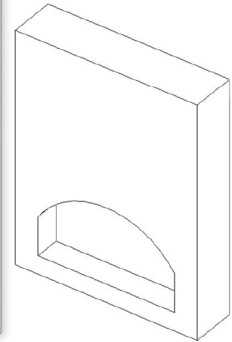
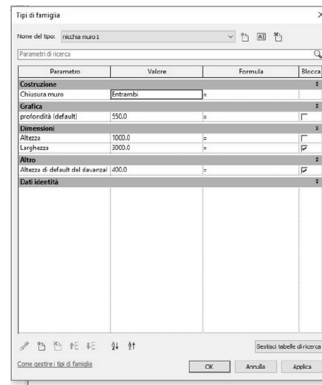
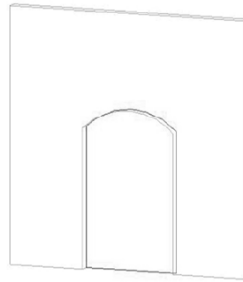
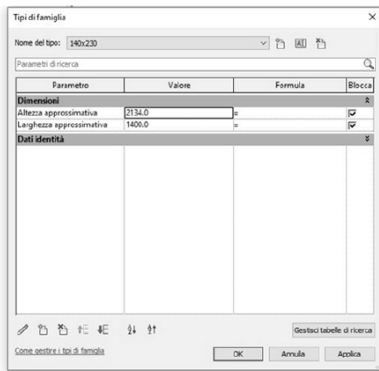
Nel caso di studio Masseria Macchia Trappeto, si è proceduto a creare il modello 3D sfruttando i piani e le sezioni derivanti dalla nuvola di punti, pertanto con procedura completamente manuale. Le aperture finestrate e gli accessi sono stati modellati come famiglia delle aperture strutturali (famiglia di sistema del software impiegato). Ogni istanza apertura ha forma e dimensione propria che viene modificata tramite parametri geometrici.



Importazione nuvola di punti, acquisita con tecnica fotogrammetrica aerea e terrestre, in software di modellazione BIM – (tesi di Domenico Modugno, Il rilievo del costruito nel BIM, Masseria Macchia Trappeto, 2016)

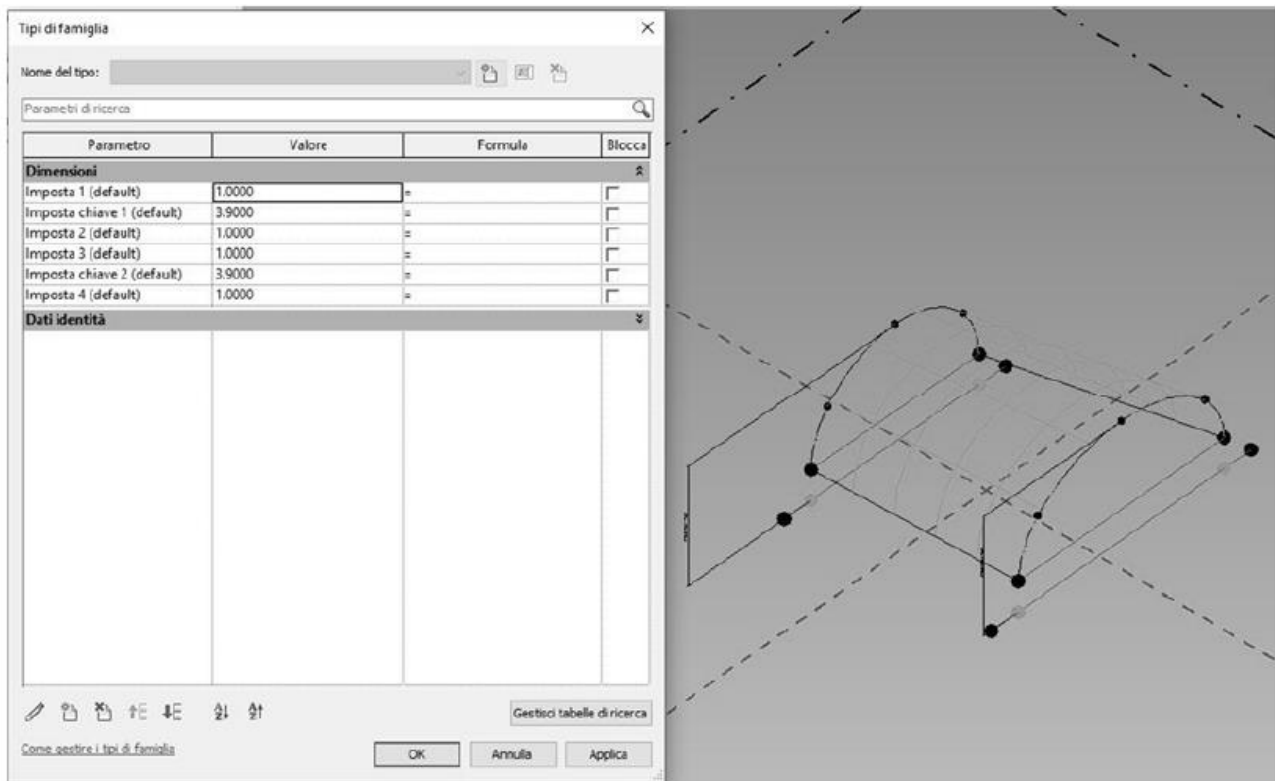


*Inserimento livelli nel modello, a partire dalla nuvola di punti
(tesi di Domenico Modugno, Il rilievo del costruito nel BIM, Masseria Macchia Trappeto, 2016)*



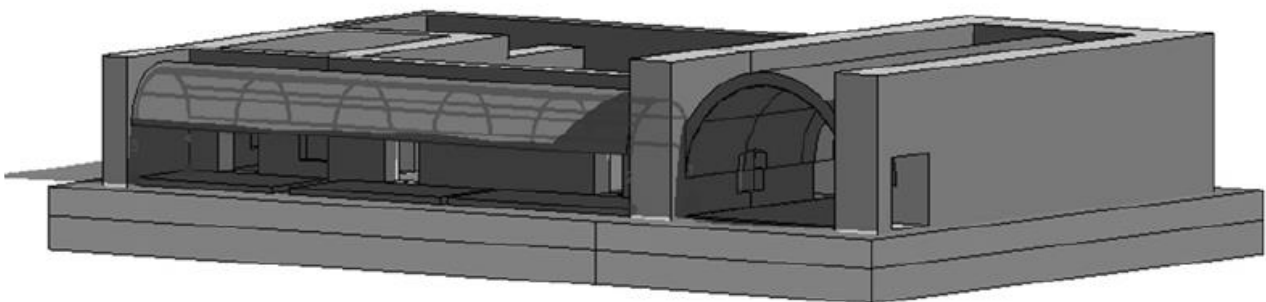
*Modellazione parametrica di aperture, finestre e nicchie
(tesi di Domenico Modugno, Il rilievo del costruito nel BIM, Masseria Macchia Trappeto, 2016)*

I locali presentano un sistema di orizzontamenti voltati a botte, la cui modellazione può essere effettuata a partire da una famiglia contenente una **superficie adattiva** che consente di scegliere i quattro vertici costituenti la sagoma in pianta della volta e **parametrizzata** in modo da modificare il piano di imposta ed il raggio della volta.

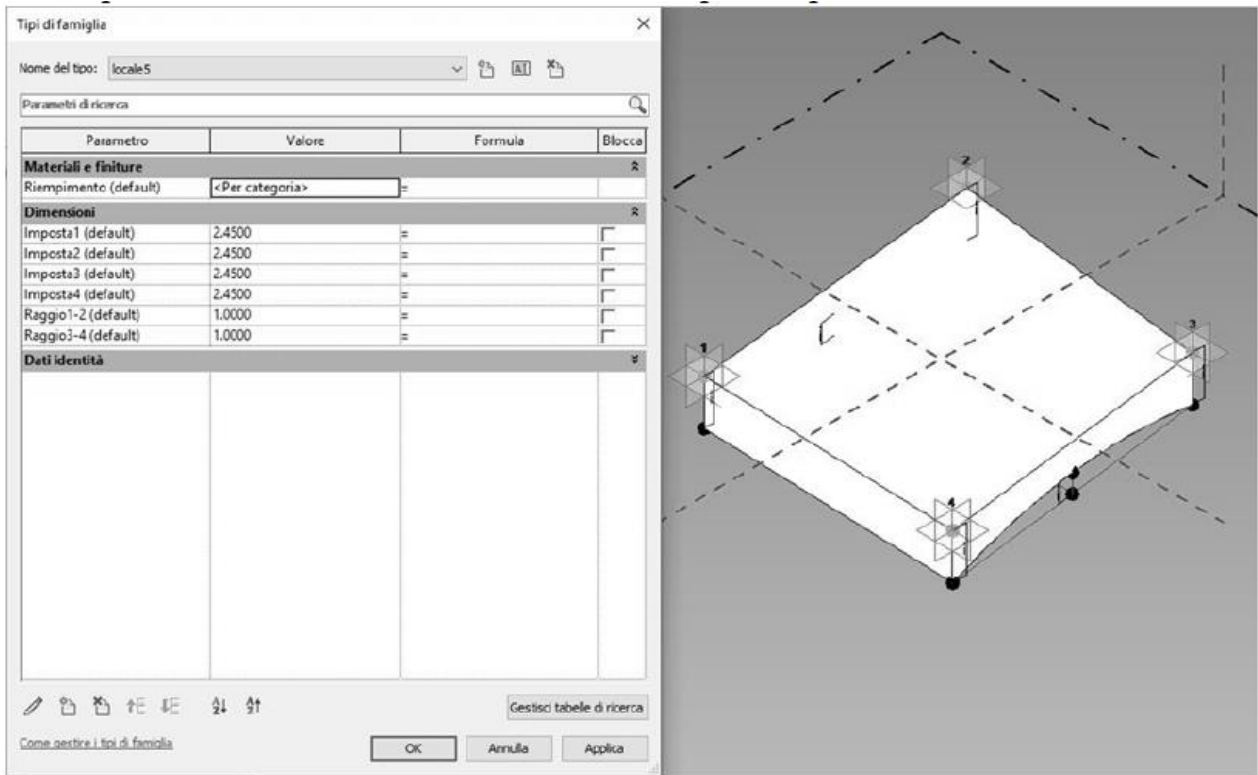


La famiglia così generata viene inserita nel modello per la generazione del “*tetto da superficie*” che costituisce la volta. Inoltre, a completamento del sistema voltato, è stato modellato il rinfiango partendo da un “modello generico di tipo adattivo” e aggiunto lo strato di copertura piano.

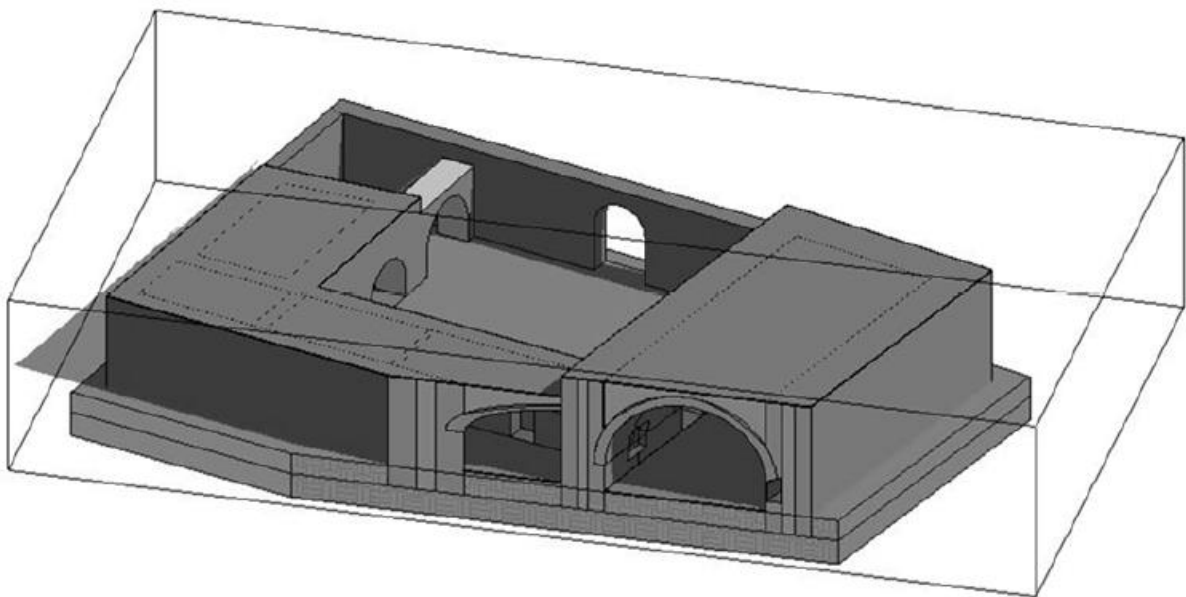
A seconda della tipologia e della morfologia di orizzontamenti voltati, la procedura di modellazione può variare. Talvolta, potrebbe essere necessario lavorare con modelli solidi *in-place* o superfici/mesh quando non sia possibile gestire oggetti parametrici a causa della elevata irregolarità geometrica.



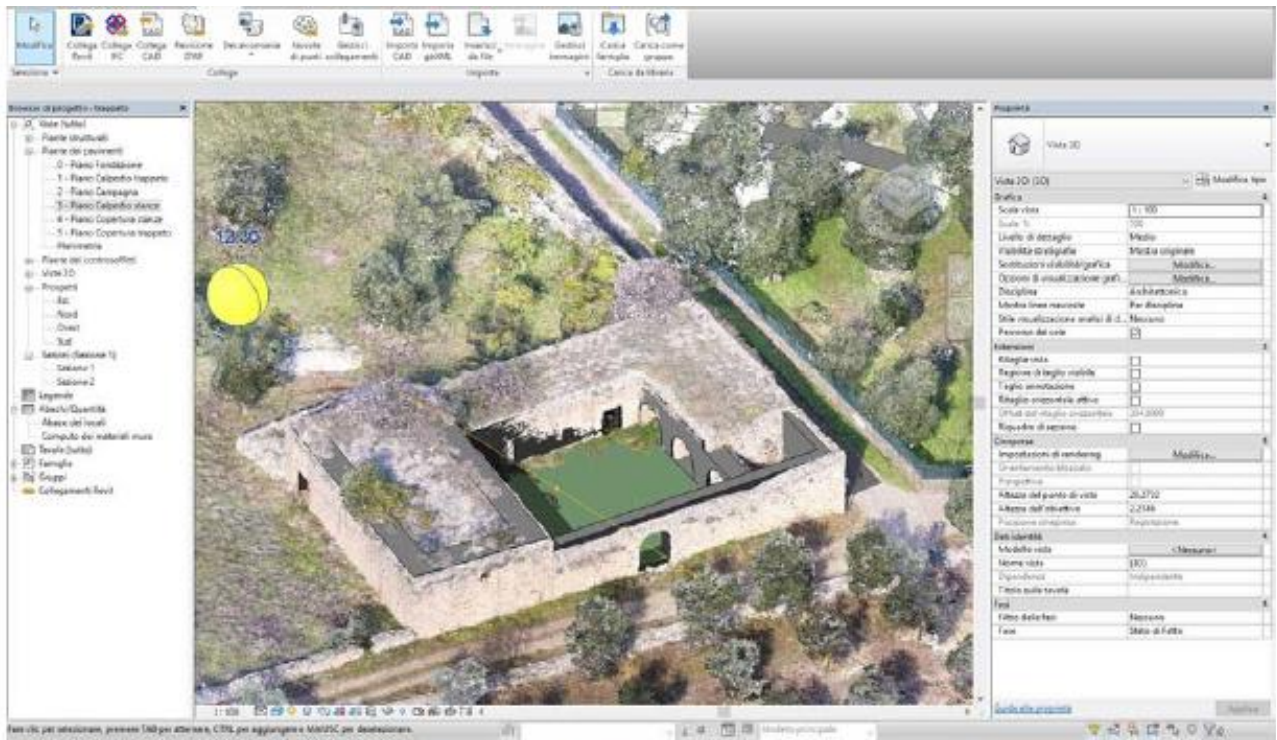
Inserimento della volte a botte come tetto da superficie costituita dalla superficie adattiva



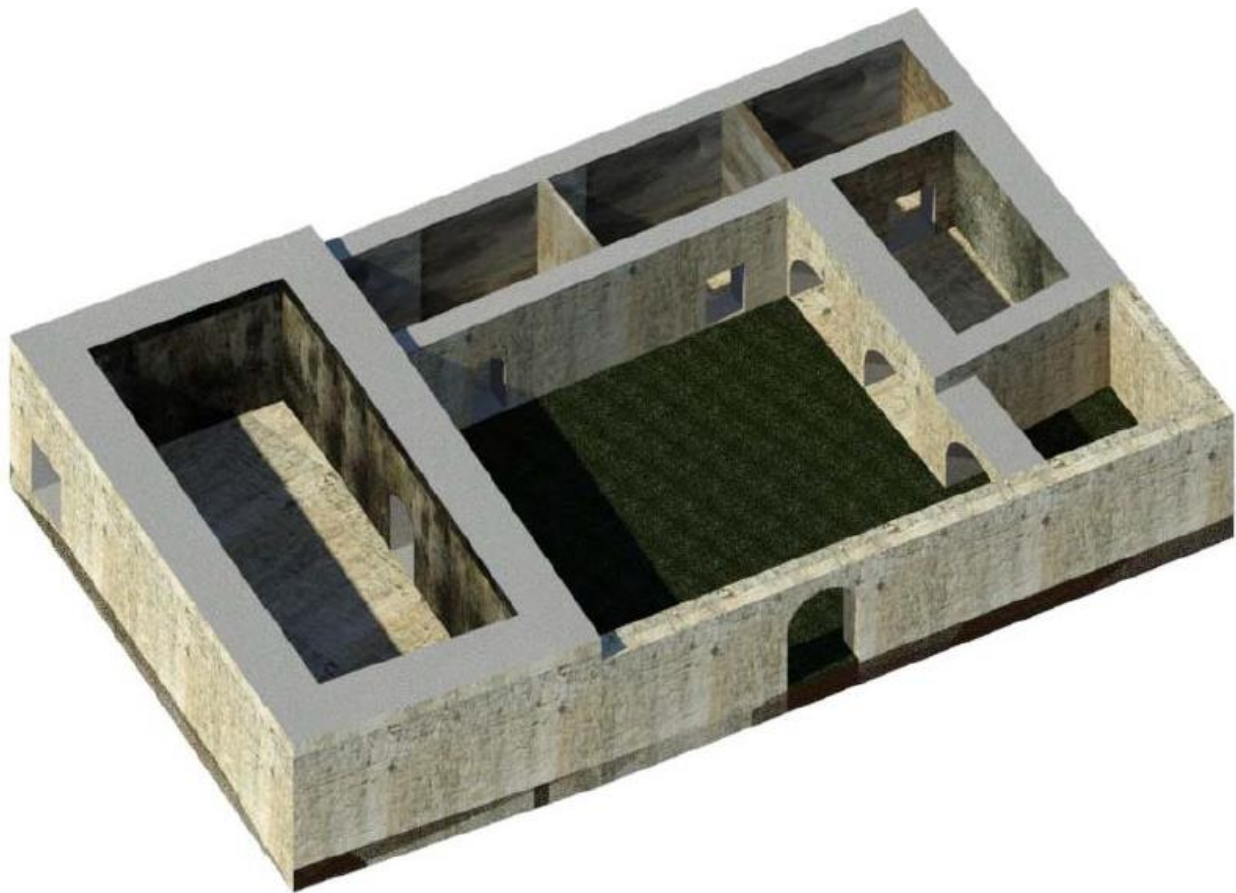
Modellazione del rinfiango come modello generico adattivo



Modello BIM completo (spaccato assonometrico)

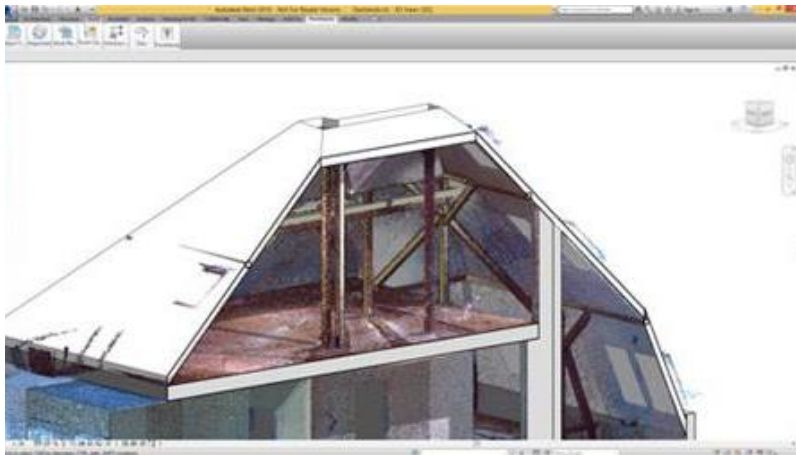


Confronto nuvola di punti e modello BIM

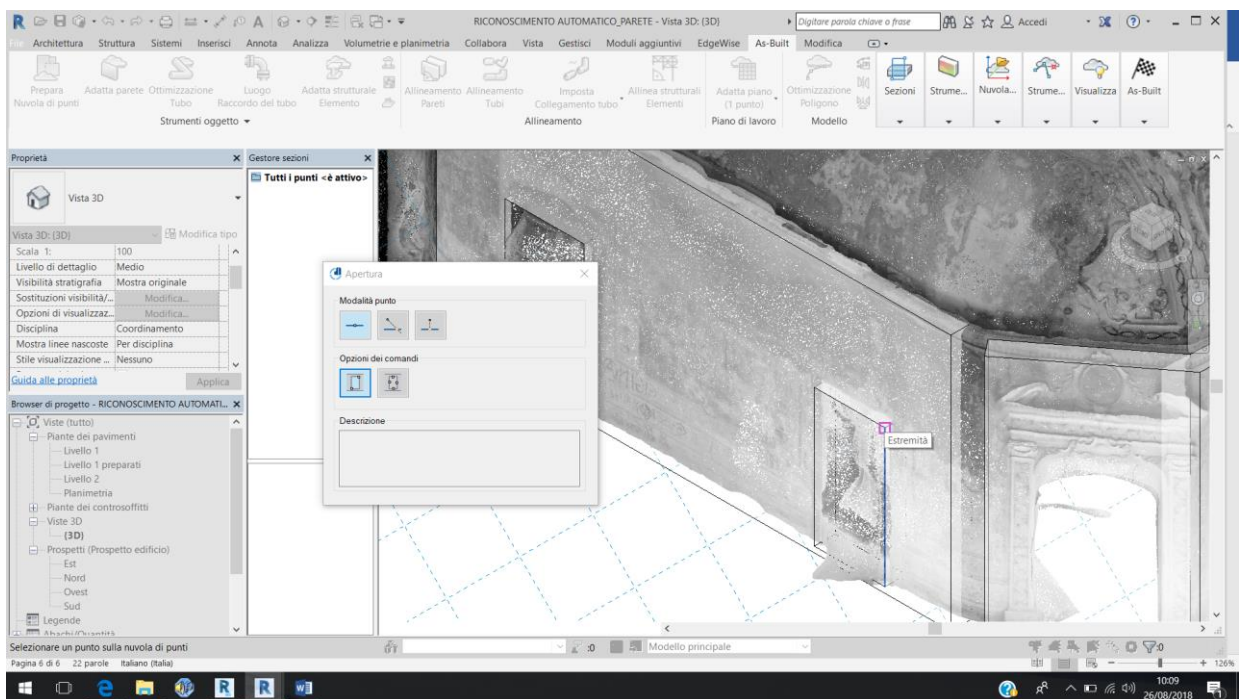


Render del modello BIM texturizzato

2. La **conversione semi-automatica/automatica** delle nuvole di punti avviene attraverso il **riconoscimento e la generazione automatica** di oggetti parametrici usando plug-ins (es. Leica Geosystems CloudWorx for Revit, che sostituisce Scan-to-BIM® IMAGINIT, EdgeWise® ClearEdge che attualmente lavora esclusivamente con dati scansionati, e As-Built for Autodesk® Revit® - plug-in della piattaforma FARO Technologies - includendo PointSense for Revit®, and Pointfuse®). Questi strumenti sono in grado di riconoscere oggetti costituiti da primitive geometriche semplici (muri, tubazioni, porte, finestre) e lavorano con algoritmi di riconoscimento e *best fitting*.

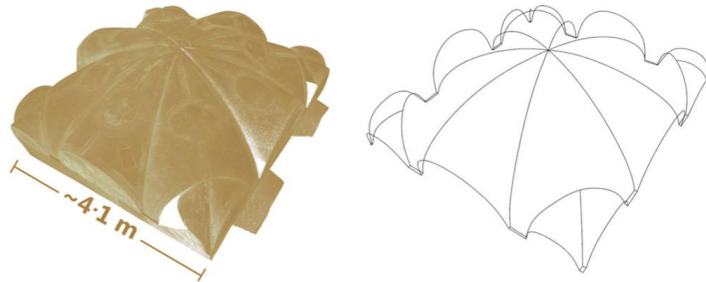


Uso di PointSense for Revit®, FARO Technologies, per la modellazione automatica del tetto



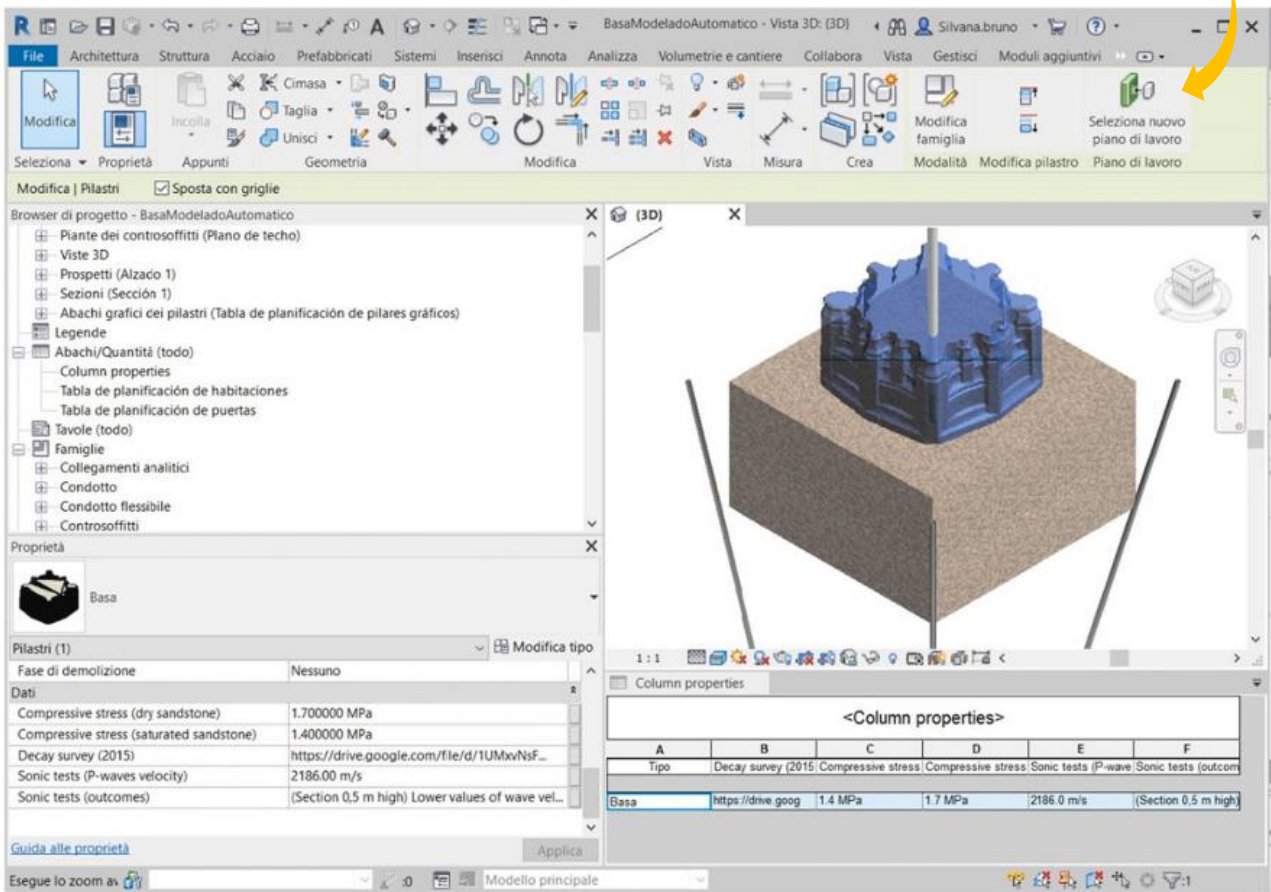
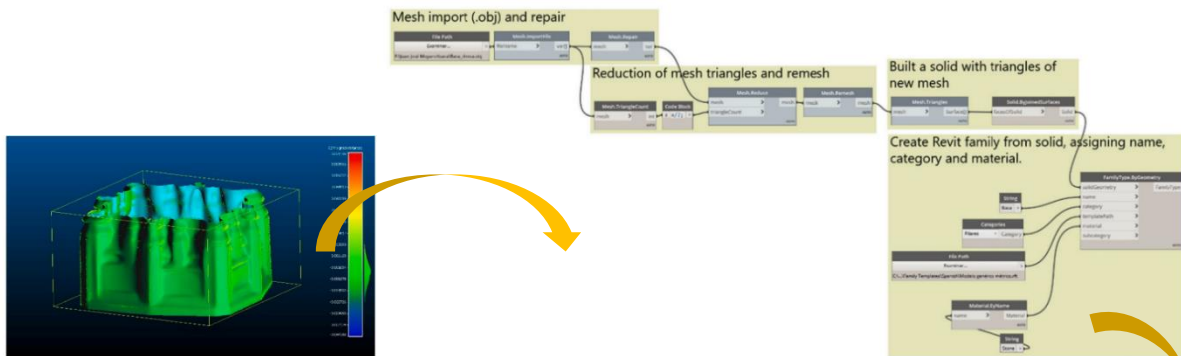
Utilizzo di As-Built for Revit per la modellazione semiautomatica di una porta a partire dalla nuvola di punti, Masseria Don Cataldo, tesi di dottorato di Silvana Bruno, 2019

3. Uno dei metodi operativi, nel caso di morfologie complesse, è la **conversione delle mesh in NURBS** (Non Uniform Rational Basis-Splines, traducibile in "Splines razionali non uniformi definite da una base"). Le mesh vengono importate in software tipo Rhinoceros per l'estrazione delle NURBS dalle mesh post-elaborate (comando *MeshToNURBS*). Si tratta di un procedimento semi-automatico che richiede la correzione manuale da parte di un operatore.



Creazione di oggetti parametrici BIM dalle nuvole di punti, adoperando NURBS (Barazzetti et al.)

Recenti sviluppi nella ricerca scientifica hanno portato alla definizione di procedure di conversione di modelli tridimensionali mesh in oggetti parametrici in ambiente BIM. In particolare, il flusso di lavoro porta dapprima all'ottenimento di mesh a partire da nuvole di punto ottenute da tecnica laser scanner (terrestre o aerea) o da mesh ottenute attraverso la tecnica fotogrammetrica di Structure for Motion (SfM). Necessaria è la segmentazione degli stessi dati tridimensionali grezzi, che può avvenire sia manualmente da parte dell'operatore che automaticamente, applicando algoritmi di riconoscimento e segmentazione, che funzionano per identificazione di caratteristiche ricorrenti (ad esempio colore, geometria). In quest'ultimo ambito, trova piena applicazione i metodi di segmentazione supportata dal Machine Learning (tra cui il Deep Learning). Successivamente, le mesh vengono convertite in superfici NURBS, queste ultime vengono trasformate in oggetti BIM mediante applicativi di programmazione visuale (ad esempio all'interno di Dynamo mediante il Mesh Toolkit). Tuttavia, tali geometrie non possono essere modificate dal punto di vista geometrico e dimensionale.

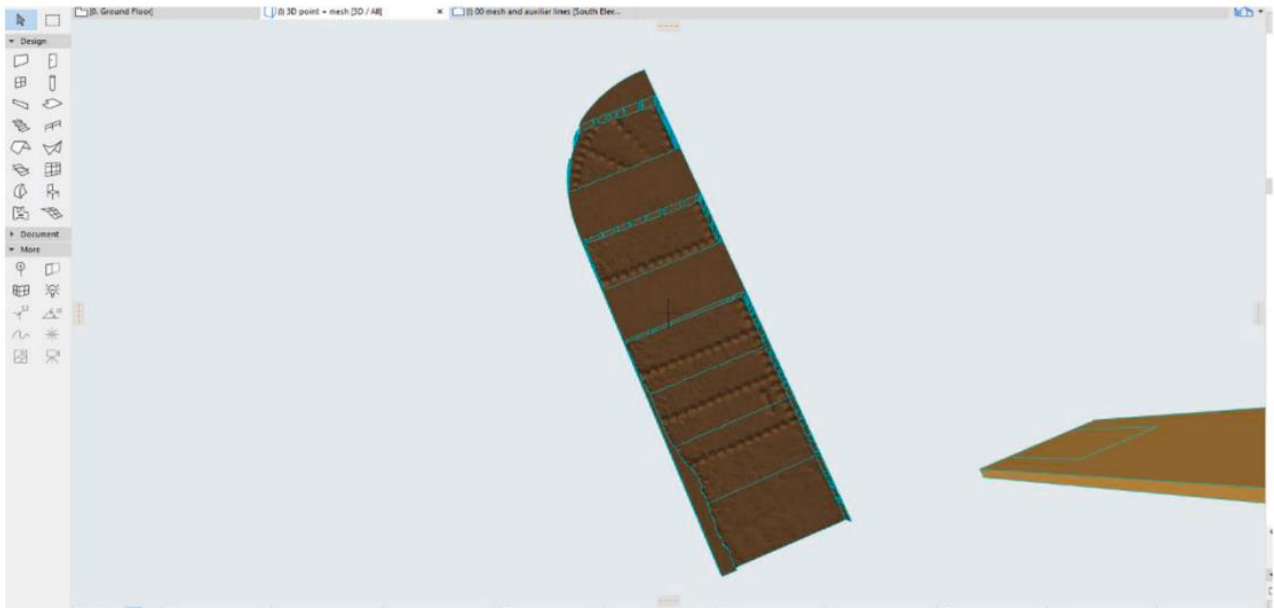


Creazione di oggetti BIM di elementi complessi utilizzando la superficie NURBS trasformata in specifiche famiglie BIM (J. Moyano, E. Carreño, J.E. Nieto-Julián, I. Gil-Arizón, S. Bruno, Systematic approach to generate Historical Building Information Modelling (HBIM) in architectural restoration project, Automation in Construction (2022))

Nella figura precedente, la nuvola di punti acquisita è stata segmentata manualmente, identificando il basamento di una colonna all’interno della chiesa di Santiago in Jerez de la Frontera (Spagna), e successivamente convertita in oggetto mesh tridimensionale, applicando algoritmi di decimazione e di ottimizzazione della stessa, prima di procedere alla conversione in oggetto BIM adoperando la pipeline in Dynamo.

Tuttavia, possono essere applicati algoritmi di segmentazione automatica, come ad esempio il classificatore multiscala 3D addestrando con classificatori binari elementari (CANUPO) che è

disponibile nel software open-source CloudCompare, il quale consente di riconoscere e classificare elementi caratterizzati da complesse geometrie (come superfici topografiche).



Modello geometrico della porta di ingresso principale della Casa di Pilato, Siviglia e inserimento nella nuvola di punti importata in ambiente BIM (J. Moyano, J. León, J.E. Nieto-Julián, S. Bruno, *Semantic interpretation of architectural and archaeological geometries: Point cloud segmentation for HBIM parameterisation*, *Automation in Construction*. 130 (2021))

Analisi delle deviazioni o scostamento

Sulla base del livello di accuratezza predefinita, della scala di rappresentazione e dell'uso del modello, viene fissato l'errore ritenuto accettabile tra la nuvola di punti ed il modello ed eseguita l'**analisi delle deviazioni o scostamento** per la valutazione della

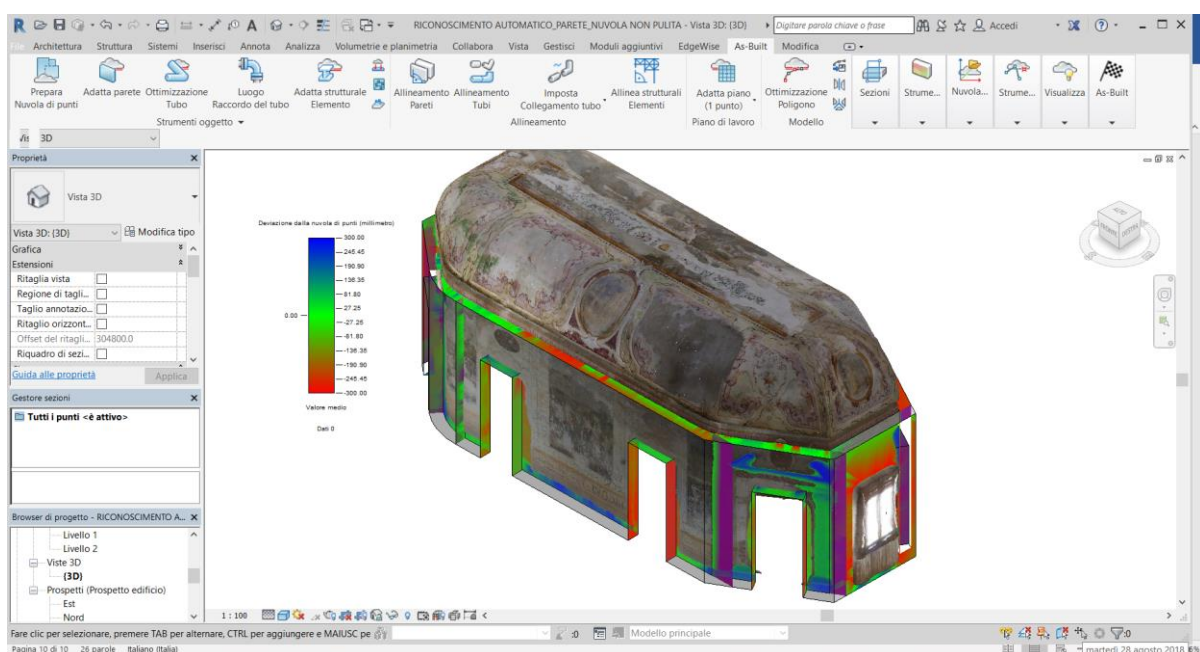
qualità del modello “*as-is/as-built*”. La valutazione del Livello di Accuratezza (LOA) viene effettuata tenendo in considerazione linee guida nazionali ed internazionali e gli obiettivi del progetto.

La “Level Of Accuracy (LOA) Specification Version 2.0” è stata redatta dal US Institute of Building Documentation come riferimento per chiarire il livello di accuratezza nella documentazione degli edifici esistenti (USIBD, 2016), e classificata secondo la tabella ad un livello di confidenza del 95%.

Level	Upper Range	Lower Range
LOA10	User defined	5 cm
LOA20	5 cm	15 mm
LOA30	15 mm	5 mm
LOA40	5 mm	1 mm
LOA50	1 mm	0

Livello di Accuratezza e corrispondenti deviazioni nuvola di punti/modello accettabili

L’accuratezza può essere valutata utilizzando software open source come CloudCompare (utilizzando la nuvola di punti come riferimento) oppure MeshLab, per misurare le differenze tra due mesh. Inoltre, l’analisi di deviazione per la modellazione automatica può essere valutata attraverso lo stesso plug-in, al fine di testare l’efficacia dell’automazione e la precisione del modello.



Analisi di deviazione con As-Built for Revit, Masseria Don Cataldo (tesi di dottorato di Silvana Bruno, 2019)

Proprietà nome tipo ed istanza degli oggetti BIM

Ciascun oggetto dovrà avere una denominazione ben codificata al fine di facilitare la gestione informativa, ad esempio:

`MuroDP_Ovest`

[Composizione stratigrafica della muratura]_[Orientamento]

Composizione stratigrafica della muratura:

MuroDP (Muro a doppio paramento) or MuroSP (Muro a singolo paramento)

Orientamento:

Nord, Sud, etc.

Fase 5 - Arricchimento semantico

Fondamentale passaggio è l'**arricchimento semantico** del modello, ovvero l'assegnazione di attributi atti alla descrizione del singolo componente edilizio.

Tale step di **modellazione informativa** presuppone l'**organizzazione dei dati** e il rispetto del Livello di Sviluppo inizialmente definito in termini di requisiti informativi.

Il modello HBIM "as-BIM/as-damaged" deve includere:

- la rappresentazione e la descrizione in parametri alfa-numeriche delle forme di degrado;
- la programmazione degli interventi per aggiornarlo a LOD G.

Inoltre, il modello deve essere organizzato in modo tale da riportare **le stratificazioni costruttive e gli interventi susseguitesesi nel tempo**, come dedotti dallo studio dei documenti archivistici e dall'analisi in situ.

a. Rilievo del degrado

Il **rilievo del degrado**, nella sua rappresentazione grafica e semantica (come contenuto alfanumerico degli attributi che descrivono le patologie e i dissesti), può essere effettuato nelle seguenti modalità:

- A. Rilievo del degrado non rappresentato nel modello, ma riportato in tabelle o elaborati collegati all'oggetto come collegamenti ipertestuali; le informazioni contenute riguardano la descrizione del degrado e del dissesto, cause del degrado, stato di conservazione e interventi da intraprendere;
- B. Elaborati grafici 2D della mappatura del degrado rappresentata come campiture ed estratti dalle viste del modello BIM 3D; la vista specifica può essere collegata alla relativa istanza interessata (parete, copertura, etc);
- C. Modellazione 3D a partire dai profili delle forme di degrado (linee, polilinee, etc.) presenti in elaborati CAD esistenti;

- D. Modellazione 3D a partire dalla segmentazione e conversione delle nuvole di punti e mesh, ed utilizzo di componenti adattivi come template di famiglia parametrica;
- E. Rappresentazione delle misurazioni del fenomeno di umidità attraverso algoritmi personalizzati di Dynamo;
- F. Estrazione automatica di fessurazioni a partire da ortofoto, textures o immagini rettificate attraverso algoritmi di edge detection e conversione in polilinee;
- G. Importazione delle nuvole di punti relative alle forme di degrado, all'interno dell'ambiente BIM, previa segmentazione manuale o automatica delle stesse;
- H. Utilizzo di nuvola di punti e mesh renderizzate come interfaccia istantanea degli apparati decorativi e dello stato dei luoghi attraverso link ipertestuali al modello BIM. Inoltre, i risultati dei rilievi geometrici possono essere visualizzati contemporaneamente al modello BIM nelle piattaforme di modellazione oppure adoperate per applicazioni di Realtà Virtuale e Realtà Aumentata.



G. Importazione delle nuvole di punti relative alle forme di degrado, all'interno dell'ambiente BIM, previa segmentazione manuale o automatica delle stesse (tesi di laurea Tecnologie innovative di gestione della fase di diagnosi del costruito A. Gravina e V. Giannuzzi)

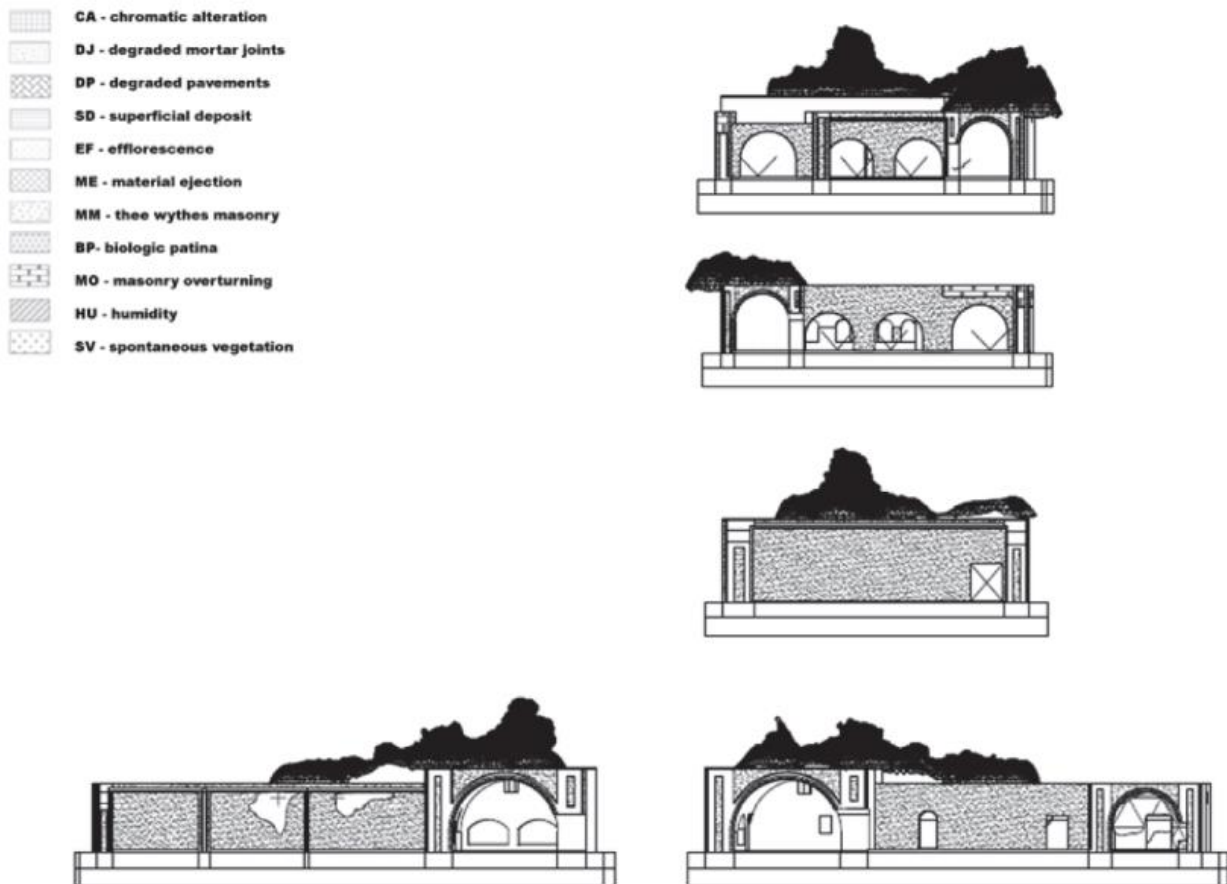
Tuttavia, l'utilizzo di **oggetti 2D o 3D** sfrutta le **capacità gestionali dell'approccio BIM** perché corredati di attributi riguardanti:

- descrizione del degrado/dissesto
- scatto fotografico
- estensione
- proposta di intervento
- relativo importo

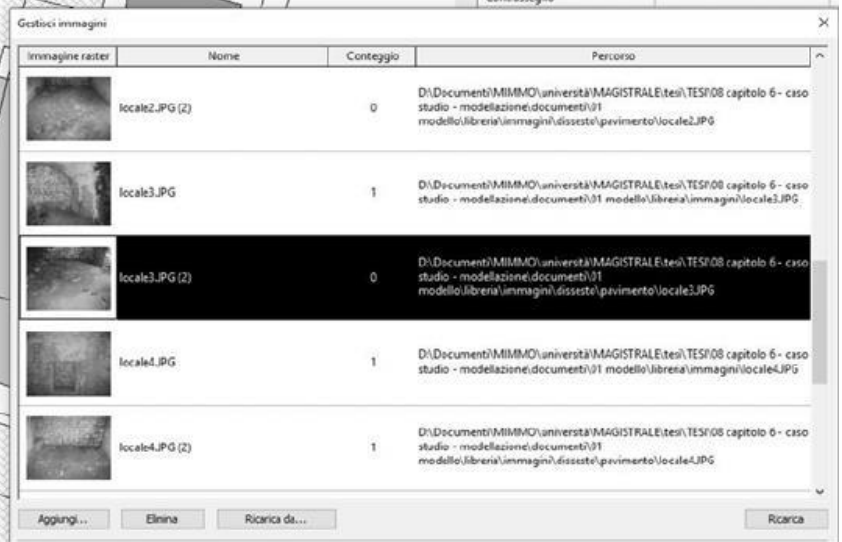
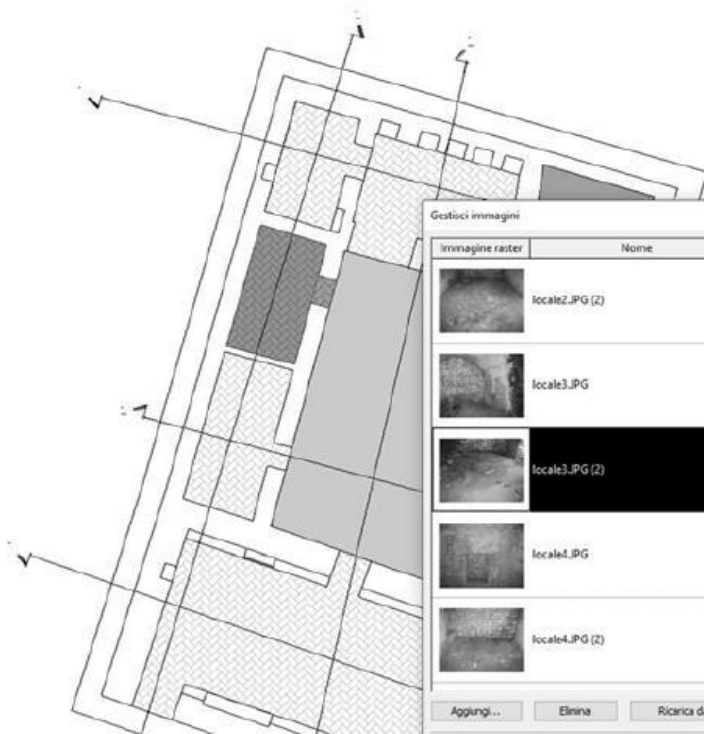
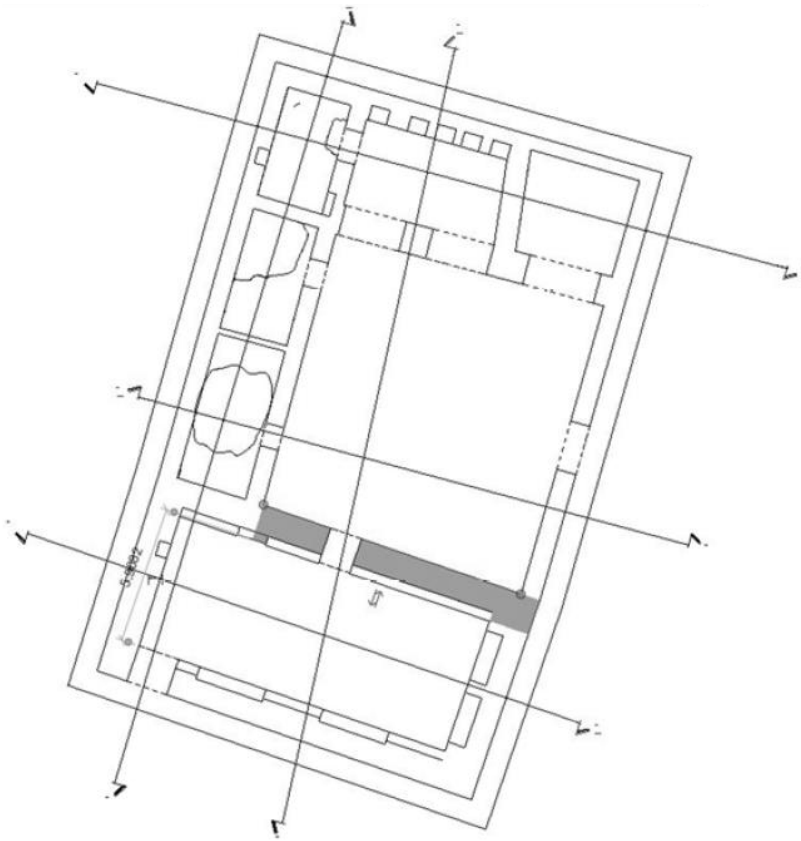
Dapprima, viene fatta la distinzione tra patologie diffuse e localizzate per adottare l'approccio adeguato alla modellazione.

Viene organizzata la legenda che riporti le patologie, a ciascuna associato un retino (parimenti al procedimento tradizionale su file CAD).

- Le **patologie diffuse** possono essere rappresentate con l'**annotazione della regione (campitura)** e **parametrizzate con l'imputazione di un parametro dedicato**, inserito negli elementi costruttivi (pavimento, muro, modello generico, tetto), in modo da poter aggiungere una descrizione.

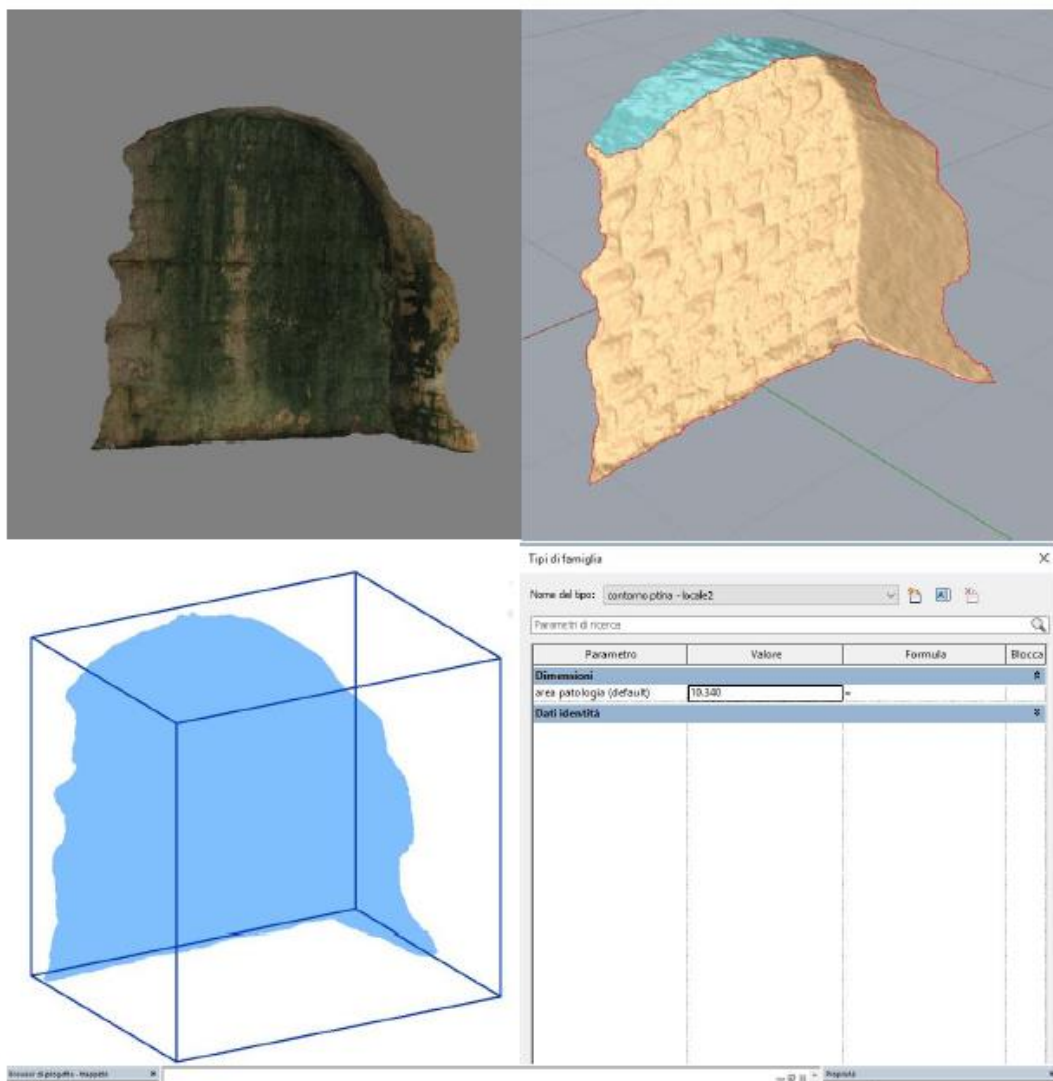


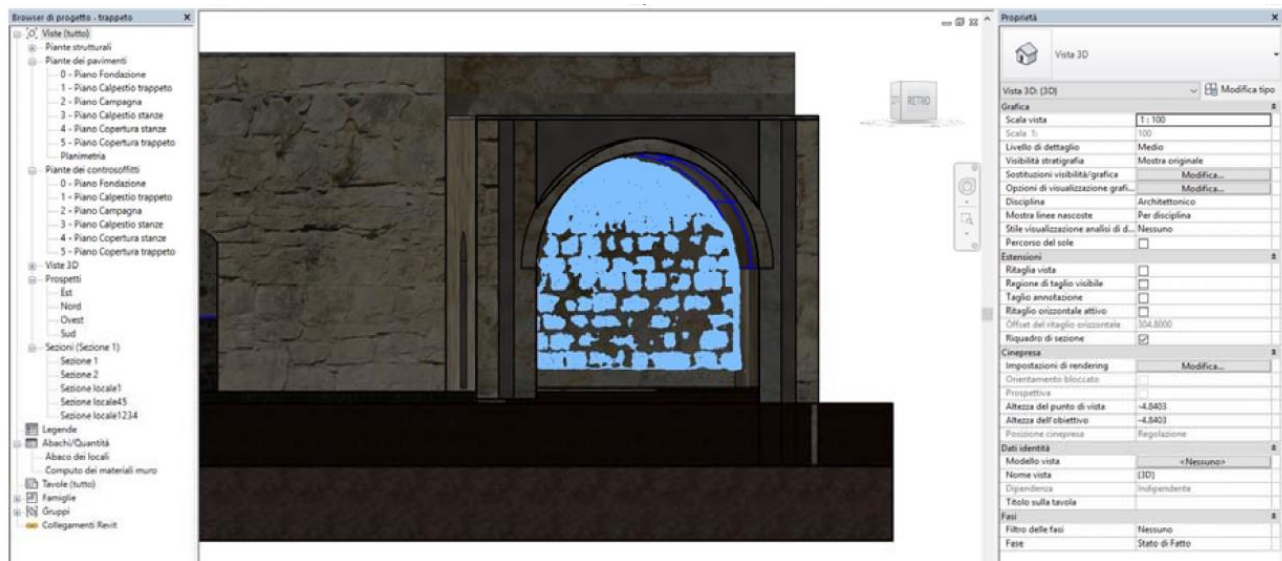
Rappresentazione del rilievo con campiture 2D su pianta, prospetti e sezioni del modello BIM 3D



Imputazione dei parametri descrittivi delle patologie e dissesti rilevati (scatti fotografici, descrizione, estensione, cause di dissesto e degrado)

- Per quanto riguarda le **patologie localizzate** può essere effettuata una procedura diversa. La nuvola di punti del locale viene segmentata laddove presente la forma di degrado ed esportata come mesh nel formato *.obj in ReCap Autodesk®). Il file viene caricato in Rhinoceros e trasformato in contorno con il comando “EstraiContorno”, oppure trasformato in NURBS con il comando “MeshToNurbs”. Tramite il comando “Area” viene ricavata la dimensione della superficie interessata dalla patologia. Il contorno o la NURBS ottenuta vengono esportati nell’estensione *.dxf, importati in Revit nel template di una nuova “famiglia basata su modello generico” per rappresentare la forma di degrado. L’estensione del degrado, come valutata all’interno di Rhinoceros, viene introdotta come parametro di istanza. La famiglia così elaborata viene inserita nell’host corrispondente del modello.





Mesh del degrado muschi e licheni

b. Indagini diagnostiche

Nella fase di arricchimento semantico rientrano i risultati delle eventuali prove diagnostiche effettuate per la **caratterizzazione materico-costruttiva e la valutazione prestazionale**. Come verifiche complementari, possono essere effettuati test distruttivi e non distruttivi (es. georadar, test sonici e ultrasonici, ecc.) per la **caratterizzazione materico-costruttiva** e la **valutazione dello stato di degrado dei luoghi**. In questa fase ricade il monitoraggio continuo delle condizioni ambientali (temperatura, umidità, etc.) e occupazionali tramite sensori, RFID e Internet of Things (IoT) nel caso sia necessario operare in termini di sostenibilità e risparmio energetico. Trattandosi di un approccio per la gestione informativa, è importante l'**inclusione dei metadati** riguardanti le informazioni su piano di indagine ed installazione delle attrezzature, elementi target (colonna / pilastro, muro, ecc.), tipologia del profilo di acquisizione, numero di punti di rilevamento e relativa geolocalizzazione.

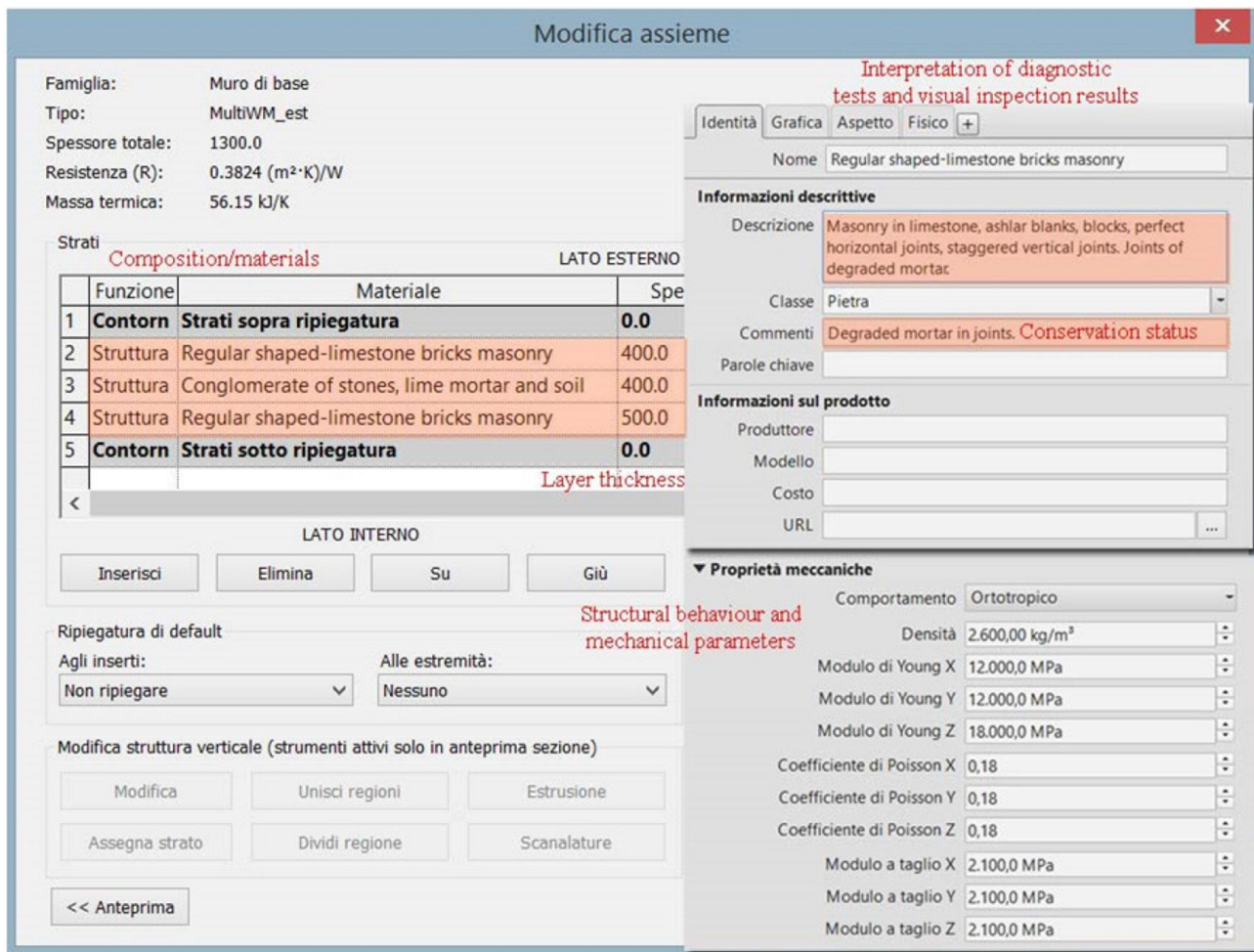
Queste informazioni e dati possono essere inclusi nel modello in differenti modalità:

- Link ipertestuale del documento *.pdf come attributo assegnato al relativo oggetto parametrico;
- Inserimento di attributi alfanumerici e immagini come proprietà del relativo oggetto parametrico;

- Richiamo degli attributi inerenti alle prove diagnostiche, inseriti come proprietà dell'oggetto, all'interno degli abachi/tabelle direttamente gestibili dal modello 3D;
- Richiamo degli attributi inerenti alle prove diagnostiche, inseriti come proprietà dell'oggetto, all'interno degli elaborati grafici direttamente gestibili dal modello 3D;
- Costruzione e gestione di piattaforme in cloud per la cooperazione e condivisione dei documenti e delle informazioni (es. BIM 360).

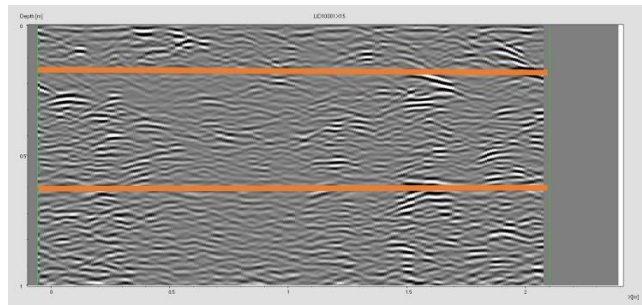
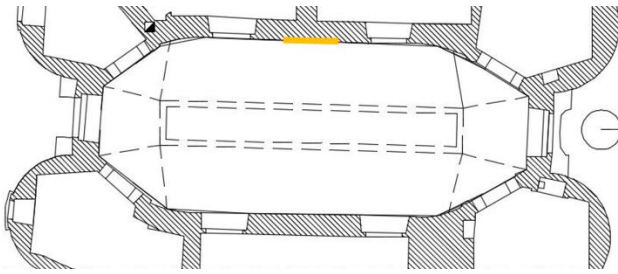
La fase propedeutica all'inserimento degli attributi è la codificazione degli stessi, stabilendo la **denominazione** e il **tipo di dato** (numerico, testuale, immagine, collegamento ipertestuale).


MuroDP_Ovest	
Construction	
Struttura	Mostra struttura
Materiali e finiture	
Materiale strutturale	Muratura in conci irregolari in pietra calcarea.
Dati identità	
Nota chiave	M(=Muri)
URL	Ad es. report e schede tecniche
Descrizione	Muratura in conci irregolari di pietra calcarea, giunti verticali sfalsati e giunti orizzontali. Degrado dei giunti di malta.

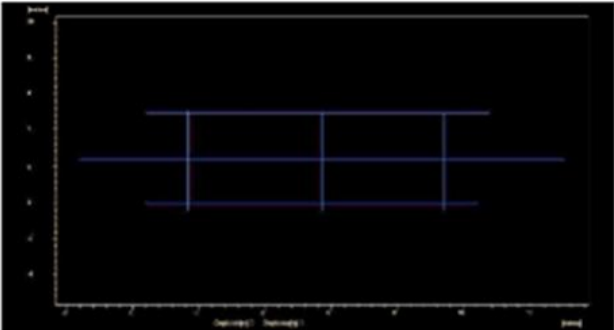
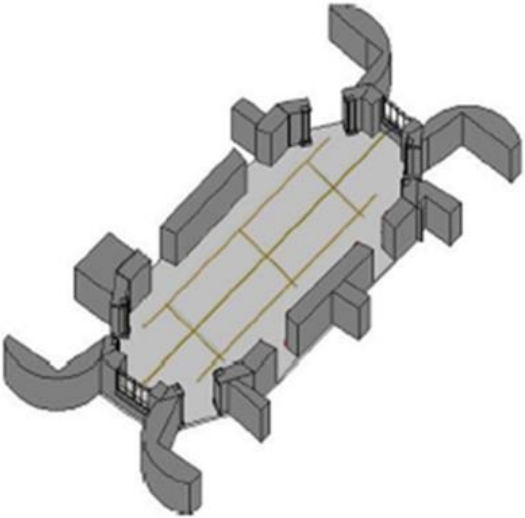


Parametri dell'oggetto parametrico Muro strutturale

È possibile inserire metadati e risultati delle prove diagnostiche come immagini associate agli oggetti parametrici che rappresentano i profili di acquisizione. Nel caso mostrato di seguito, la prova GPR (Ground Penetrating Radar), eseguita per identificare la stratigrafia muraria, ha rilevato due paramenti murari di spessore circa 20 cm. Inoltre, all'interno degli oggetti parametrici riguardanti i profili, è possibile associare l'attributo URL per creare il link ipertestuale al report dell'indagine diagnostica in *.pdf. Uguale procedura potrà essere adottata per la gestione di ulteriori prove diagnostiche.



Codice documento: RP/2016/22/RDR/01		Rapporto di Prova INDAGINE RADAR
Committente:		
Luogo: Salone centrale della Masseria Don Cataldo, in Adelfia.		
Data indagine:	Data rapporto:	
Apparato di misura: <ul style="list-style-type: none"> • Sistema radar IDS DAD FastWave monocanale a 16bit • Antenna IDS TR600V 2000MHz File acquisizione: doncat01/160429AA.ZON		Modalità di esecuzione: L'indagine radar è stata eseguita sulla superficie muraria del salone a quota 0.69m dal piano di calpestio e 0.96m rispetto allo spigolo a sinistra della porta. Nello specifico, sono stati acquisiti 13 profili longitudinali con passo 0.10 cm e 22 profili trasversali con passo 0.10m su un'area complessiva di 2.10m X 1.20m.
GRIGLIA AA: 		LOCALIZZAZIONE INDAGINE (sezione AA): 

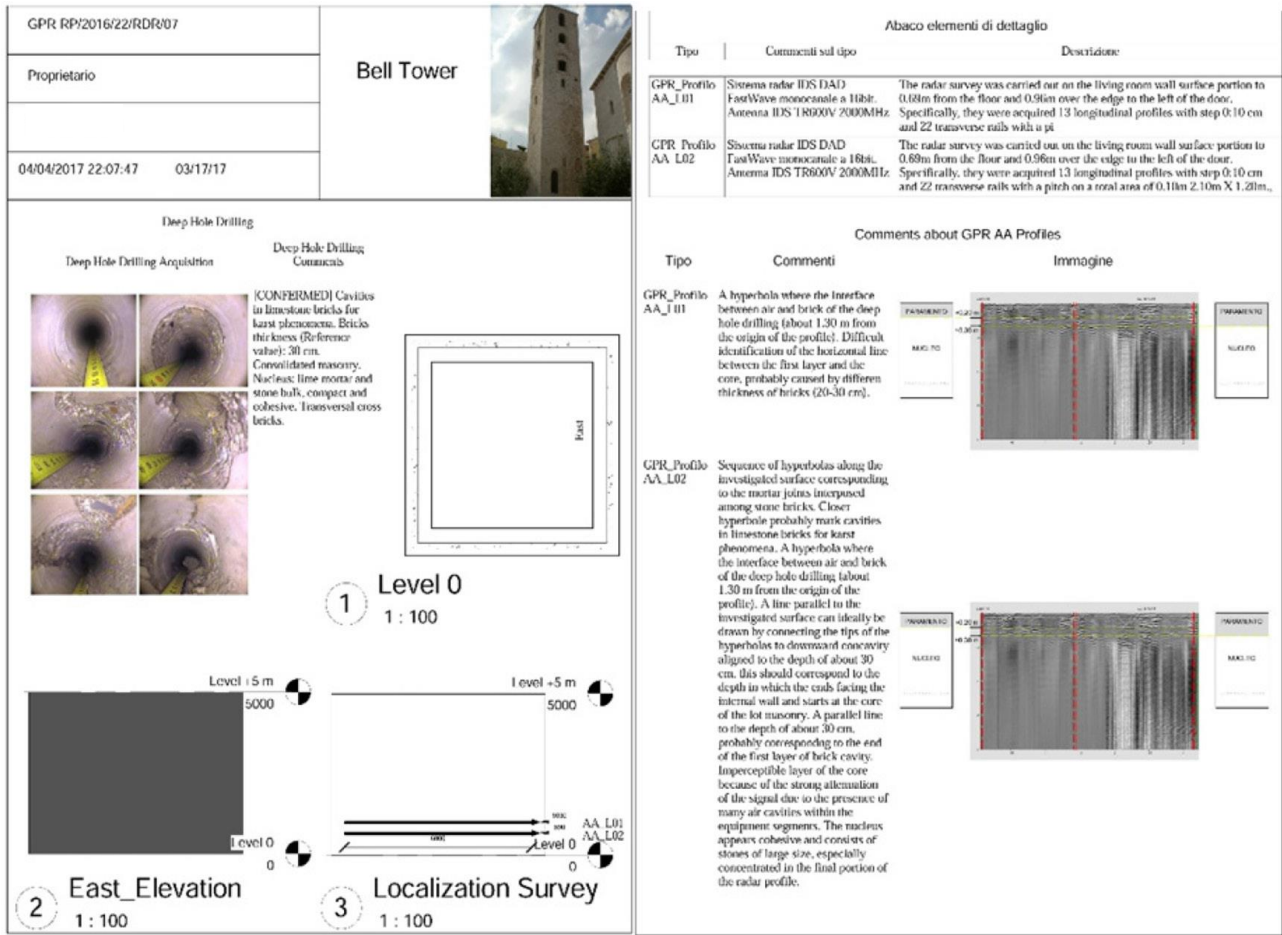
Codice documento: RP/2016/22/RDR/01		Rapporto di Prova INDAGINE RADAR
Committente:		
Luogo: Salone centrale della Masseria Don Cataldo, in Adelfia.		
Data indagine:	Data rapporto:	
Apparato di misura: <ul style="list-style-type: none"> • Sistema radar IDS DAD FastWave monocanale a 16bit • Antenna IDS TR600V 600MHz File acquisizione: doncat01/160429AB.ZON		Modalità di esecuzione: L'indagine radar è stata eseguita sulla superficie di calpestio del salone a quota 4.03 m. Nello specifico, sono stati acquisiti 3 profili longitudinali con passo 2.45m e 3 profili trasversali con passo 4.20m su un'area complessiva di 72.56 mq .
GRIGLIA AB:		LOCALIZZAZIONE INDAGINE:
		

Inclusione dei metadati e dei risultati delle prove GPR (Ground Penetrating Radar) per l'identificazione della stratigrafia dei paramenti murari (tesi di laurea Anna di Lorenzo, Masseria Don Cataldo, 2015)

Gli attributi inerenti alle prove diagnostiche possono essere così codificati all'interno dell'oggetto parametrico corrispondente.

Tipo	
GPR_ProfileAA_L01	Denominazione Tipo: GPR_Profilo [CodiceProfilo]_L/T[numero profilo], Longitudinale/Trasversale
Testo	
GPR Codice Profilo	[CodiceProfilo]_L/T[numero profilo]
Dati	
GPR_File di acquisizione	
GPR_Metodologia	Punto di riferimento per la localizzazione del profilo (altezza, distanza); - Numero di longitudinale (L) e trasversale (T) profili; - Distanza tra i profili; - Area totale investigata (per profili tridimensionali)
GPR_Strumentazione	Descrizione tecnica della strumentazione adoperata
GPR_Immagine radar	Importazione immagine
GPR_Commenti	Descrizione dei risultati ottenuti per la caratterizzazione materico-costruttiva.

Con l'inserimento di tali attributi, sarà possibile anche richiamarli per organizzare elaborati direttamente nella piattaforma BIM.



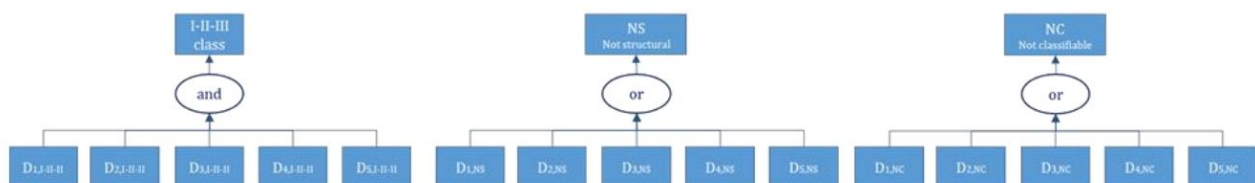
Report diagnostico organizzato nella sezione Tavole della piattaforma Revit

I dati acquisiti sono altresì adoperati per formulare la **diagnosi**, ovvero sia l'**identificazione delle reali cause di degrado** e disponibili per simulare il **comportamento strutturale**, le **prestazioni energetiche**, nonché per **pianificare gli interventi di retrofit energetico e rinforzo strutturale**.

In aggiunta, il modello tridimensionale, convertito in formato interoperabile IFC, potrebbe essere adoperato in software deputati alle analisi strutturali o energetica, prestando attenzione che il livello di dettaglio grafico sia compatibile con i requisiti geometrici e computazionali richiesti dai software.

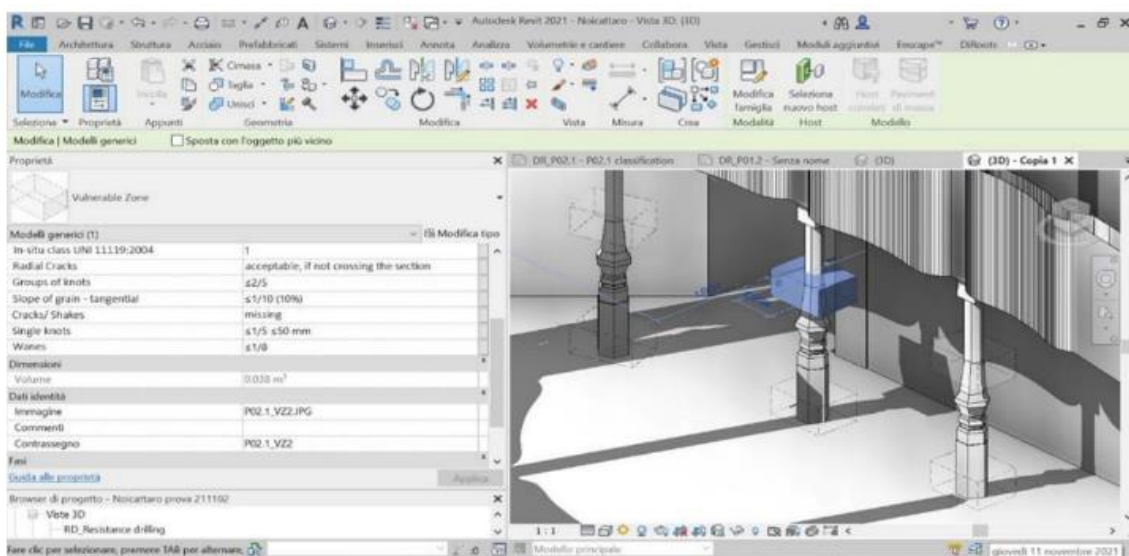
Altra modalità di gestione dei dati e delle informazioni rinvenienti dalle attività diagnostiche riguarda la programmazione e l'implementazione di strumenti personalizzati di supporto alle decisioni per la valutazione delle prestazioni dei componenti edilizi. Ad esempio, è possibile strutturare strumenti per automatizzare la definizione delle classi di resistenza di elementi strutturali lignei in accordo con lo

standard italiano UNI 1119:2004: “Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera” che fornisce un metodo di valutazione della categoria di resistenza (in classi da 1 a 3, non strutturale-NS, non classificabile-NC) combinando dati qualitativi e quantitativi rinvenuti dall’analisi in situ di difetti tipici degli elementi lignei, come nodi singoli, gruppi di nodi, fessure radiali e tangenziali delle sezioni critiche selezionate per ciascun elemento. In particolare, l’utilizzo del VPL ha consentito di ricostruire il ragionamento logico alla base dell’approccio metodologico per consentire di inferire in maniera automatica le conclusioni (classi di resistenza), a partire dai valori codificati assegnati a ciascuna forma di degrado che concorre alla definizione della classe di resistenza delle sezioni critiche individuate.

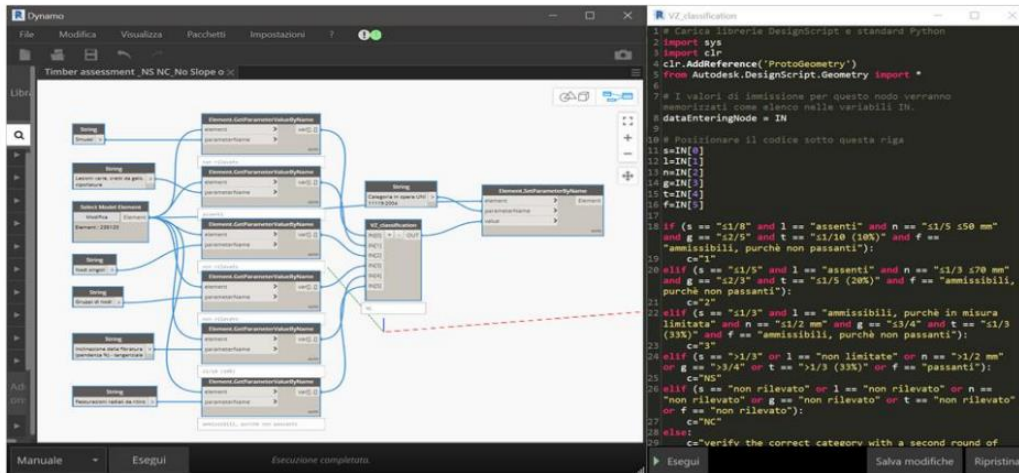


DEFECT	CATEGORY				
	I	II	III	NS	NC
D1 Wanes (w)	$\leq 1/8$	$\leq 1/5$	$\leq 1/3$	$> 1/3$	inaccessible
D2 Cracks/Shakes (c)	missing	missing	limited	not limited	inaccessible
D3 Single knots (k)	$\leq 1/5, \leq 50\text{mm}$	$\leq 1/3, \leq 70\text{mm}$	$\leq 1/2$	$> 1/2 \text{ mm}$	inaccessible
D4 Groups of knots (g)	$\leq 2/5$	$\leq 2/3$	$\leq 3/4$	$> 3/4$	inaccessible
D5 Slope of grain (sgr)	$\leq 1/14 \text{ (rad)}, \leq 1/10 \text{ (tg)}$	$\leq 1/8 \text{ (rad)}, \leq 1/5 \text{ (tg)}$	$\leq 1/5 \text{ (rad)}, \leq 1/3 \text{ (tg)}$	$> 1/5 \text{ (rad)}, > 1/3 \text{ (tg)}$	inaccessible
D6 Radial Cracks (rdc)	Acceptable, if not crossing the section			Crossing the section	inaccessible

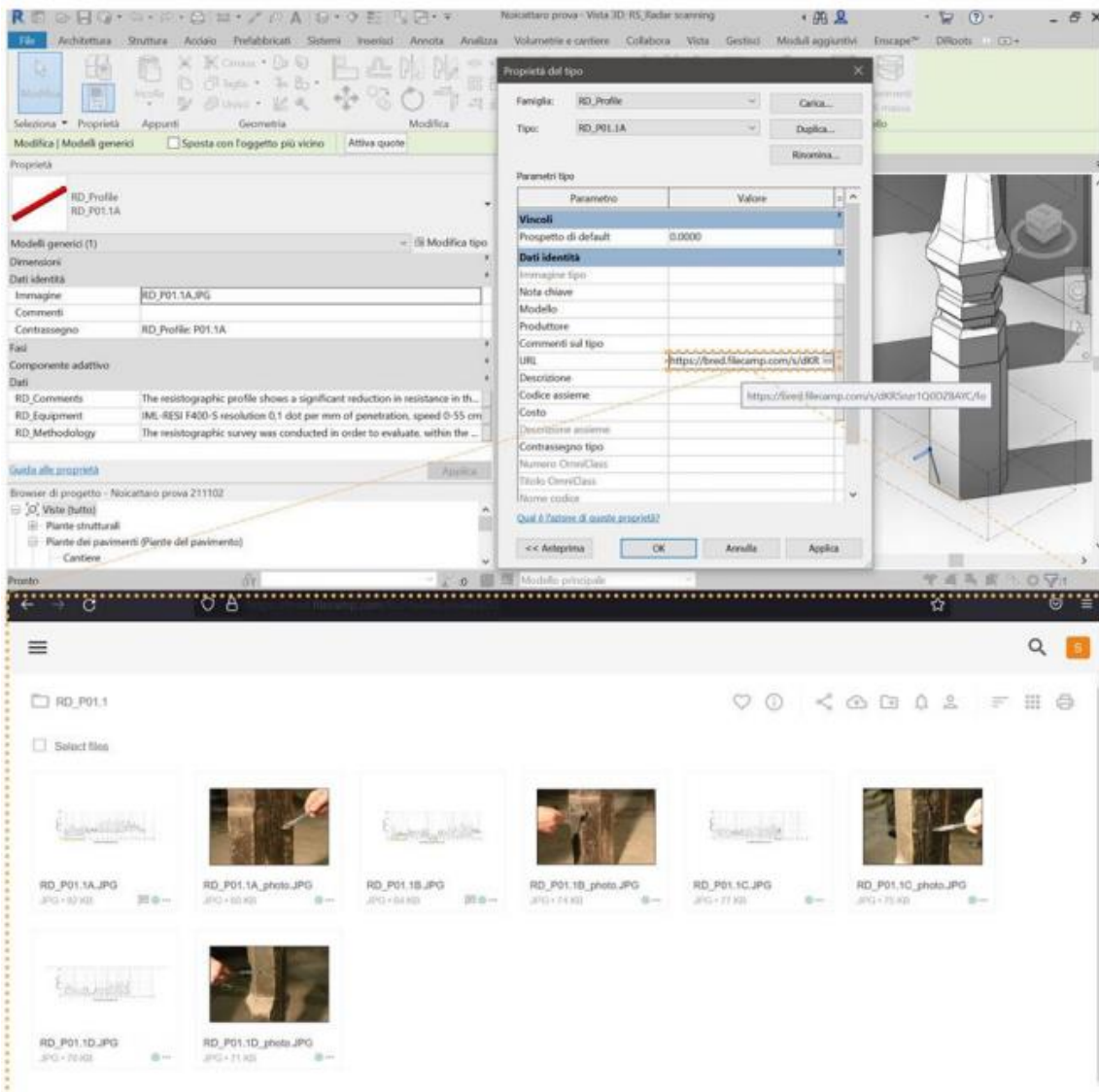
Schema di inferenza logica per la classificazione delle zone critiche di elementi strutturali in legno



Modellazione BIM della zona critica del pilastro e visualizzazione dei relativi parametri



Classificazione delle zone critiche in VPL Dynamo



Modellazione BIM del profilo della prova diagnostica e collegamento a un database esterno, basato sul web, relativo a casi studio precedenti

c. Interventi

L'imputazione dei parametri permette anche di associare a ciascuna forma di degrado e dissesto il corrispettivo intervento migliorativo, introducendo una descrizione, immagini, schede tecniche, prezzi unitari. Quest'ultimo dato è utilizzabile per effettuare il computo metrico estimativo direttamente all'interno del modello BIM, organizzando abachi in cui vengano richiamati i parametri necessari.

- Nel caso di rappresentazione di **patologie puntuali** basate su modelli generici, oltre al parametro "area", viene inserito il parametro relativo alla descrizione della patologia, quello relativo alla corrispondente descrizione dell'intervento da realizzare, ed il costo di quest'ultimo. Dunque viene ricavato un abaco delle quantità utilizzabile per una stima dei costi degli interventi.

<Patologie puntuali>						
A	B	C	D	E	F	G
Nome	Immagine	Descrizione	Intervento	Costo	Area	Volume
contorno - efflorescenze - locale2: contorno - efflorescenze - locale2						
contorno - efflorescenze - locale2: contorno - efflorescenze - locale2	efflorescenza - I	Cristallizzazione de	Trattamento di para	52.00	12.66 m ²	
contorno - efflorescenze - locale3: contorno - efflorescenze - locale3						
contorno - efflorescenze - locale3: contorno - efflorescenze - locale3	efflorescenza - I	Cristallizzazione de	Trattamento di para	52.00	15.27 m ²	
contorno - patina - locale2: contorno ptina - locale2						
contorno - patina - locale2: contorno ptina - locale2	patina - locale2.	il biodeterioramento	Pulitura delle super	52.00	10.34 m ²	
contorno - patina - locale3: contorno - patina - locale3						
contorno - patina - locale3: contorno - patina - locale3	patina - locale3.	il biodeterioramento	Pulitura delle super	52.00	23.83 m ²	
contorno - patina - locale4: contorno - patina - locale4						
contorno - patina - locale4: contorno - patina - locale4	patina - locale4.	il biodeterioramento	Pulitura delle super	52.00	3.10 m ²	
contorno - patina - locale5: contorno - patina - locale5						
contorno - patina - locale5: contorno - patina - locale5	patina - locale5.	il biodeterioramento	Pulitura delle super	52.00	22.71 m ²	
contorno - vegetazione - copertura: contorno - vegetazione - copertura						
contorno - vegetazione - copertura: contorno - vegetazione - copertura	copertura 01.JP	presenza di piante	Iniezione di fito-veleni	5.11	0.00 m ²	
riempimento Volta a botte: locale1						
riempimento Volta a botte: locale1		degrado dei riempi	Perforazione a roto	110.87	0.00 m ²	64.66 m ³
riempimento Volta a botte: locale5						
riempimento Volta a botte: locale5		degrado dei riempi	Perforazione a roto	110.87	0.00 m ²	15.77 m ³
riempimento Volta a botte: locale234						
riempimento Volta a botte: locale234		degrado dei riempi	Perforazione a roto	110.87	0.00 m ²	29.19 m ³

Abaco quantità e costi degli interventi sulle patologie localizzate

- Le **patologie diffuse**, invece, vengono prima suddivise in base all'host di riferimento. Per ciascun host vengono attribuiti i parametri per la descrizione della patologia e dell'intervento con il relativo costo. In base a questa suddivisione, ed utilizzando le stratigrafie impostate in fase di modellazione, vengono estratti gli abachi relativi, in modo da recuperare le informazioni relative alle superfici interessate. Dai dati recuperati da ciascun host, viene estratto un ulteriore abaco generale di tutte le patologie diffuse.

<Patologie diffuse - pavimento>						
A	B	C	D	E	F	G
Tipo	Nome	Immagine	Descrizione	Intervento	Costo	Area
1_Calpestio						
1_Calpestio	D/P - Vegetazione	pavimento locale1.JPG	presenza di piante	Iniezione di fito-veleni	5.11	82.41 m ²
1_Calpestio	D/P - Degradato pavimento	pavimento locale1.JPG	degrado dovuto all'	Rimozione con rec	45.00	82.41 m ²
5_Calpestio						
5_Calpestio	D/P - Vegetazione	pavimento locale5.JPG	presenza di piante	Iniezione di fito-veleni	5.11	31.28 m ²
5_Calpestio	D/P - Degradato pavimento	pavimento locale5.JPG	degrado dovuto all'	Rimozione con rec	45.00	31.28 m ²
234_Calpestio						
234_Calpestio	D/P - Vegetazione	pavimento locale4.JPG	presenza di piante	Iniezione di fito-veleni	5.11	13.77 m ²
234_Calpestio	D/P - Degradato pavimento	pavimento locale4.JPG	degrado dovuto all'	Rimozione con rec	45.00	13.77 m ²
234_Calpestio	D/P - Vegetazione	pavimento locale3.JPG	presenza di piante	Iniezione di fito-veleni	5.11	15.52 m ²
234_Calpestio	D/P - Degradato pavimento	pavimento locale3.JPG	degrado dovuto all'	Rimozione con rec	45.00	15.52 m ²
234_Calpestio	D/P - Vegetazione	pavimento locale2.JPG	presenza di piante	Iniezione di fito-veleni	5.11	19.71 m ²
234_Calpestio	D/P - Degradato pavimento	pavimento locale2.JPG	degrado dovuto all'	Rimozione con rec	45.00	19.71 m ²

Abaco quantità e costi degli interventi sulle patologie diffuse

Patologie puntuali						
Nome	Immagine	Descrizione	Intervento	Costo	Area	Volume
contorno - patina - locale3: contorno - patina - locale3						
contorno - patina - locale3: contorno - patina - locale3		il biodeterioramento del materiale inorganico è ascrivibile a differenti tipi di processi: fisico-meccanici (disgregazione, sviluppo di microfrazioni, distruzione del substrato da parte di microrganismi) e chimici (decomposizione e trasformazione del substrato lapideo). Può essere causato da biodeteriogeni autotrofi (batteri, alghe verdi, licheni, muschi, piante superiori) o eterotrofi (funghi, eumiceti, attinomiceti, uccelli).	Pulitura delle superfici interessate da diffuso attacco biologico (licheni) consistente nella asportazione meccanica delle incrostazioni mediante leggera spazzolatura, applicazione di biocida ad azione meccanica con bisturi; rimozione di residui tenaci con applicazione di piccole quantità di acqua ossigenata a 120 vol. e/o azione meccanica con microsabbatrice; aspirazione continua del materiale rimosso; eventuale lavaggio con solvente. Da misurarsi in percentuale di superficie trattata.	52.00	23.83 m ²	

Esempio di parametri relativi alla presenza della patologia "patina biologica" e relativi interventi locali e diffusi

d. 4D HBIM come stratificazione degli interventi susseguiti nel tempo

Nella gestione della conoscenza inerente all'edificato storico ricopre ruolo importante lo **studio delle stratificazioni costruttive** e degli **interventi subiti nel tempo**, sulla base del quale vengono pianificati gli interventi di conservazione e manutenzione. Introducendo la **quarta dimensione del tempo** all'interno del modello geometrico tridimensionale, viene creato un nuovo strumento per i professionisti per supportare lo studio dell'evoluzione costruttiva, per formulare ipotesi del passato, individuare le cause dei dissesti/degrado esistenti causati da interventi antropici ed effettuare decisioni sui possibili interventi.

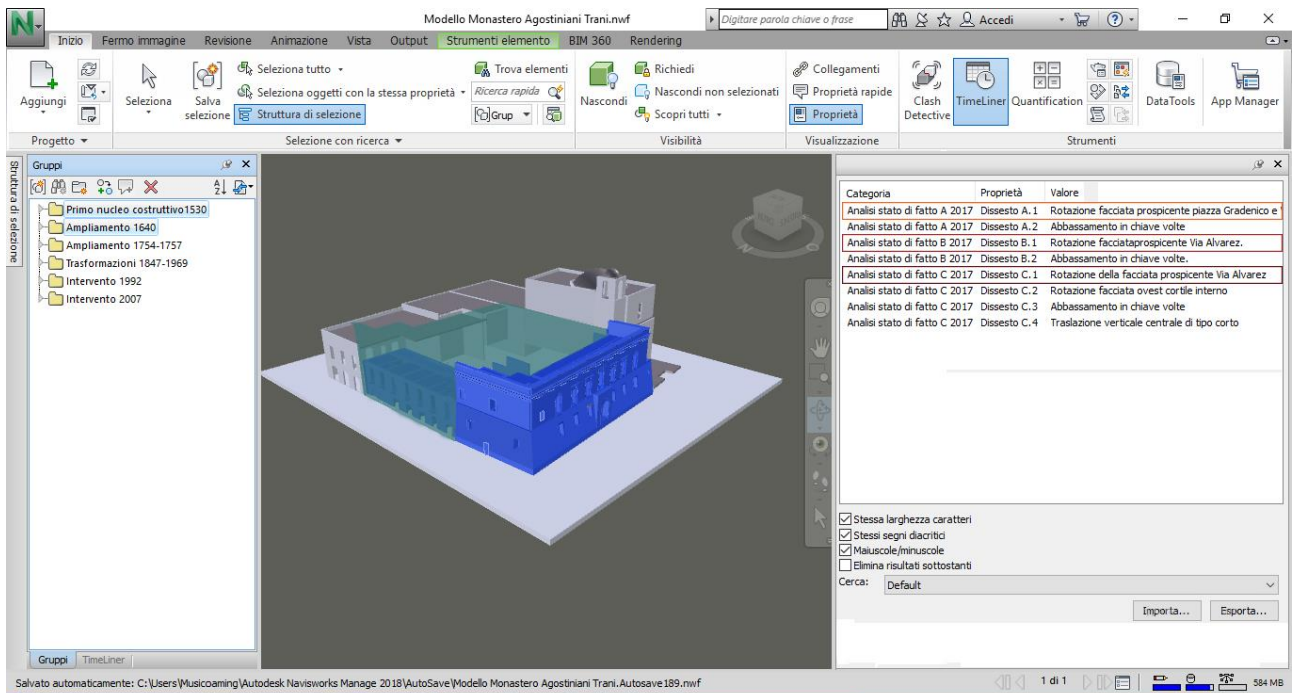
In tale metodo, **si beneficia della caratteristica del BIM come *database relazionale* e dell'introduzione del parametro temporale per la gestione del sistema di conoscenza degli edifici storici.**

I parametri inseriti nel modello BIM si riferiscono all'evoluzione storica e costruttiva, a precedenti interventi, e alla **descrizione dei quadri lesionativi e umidi.**

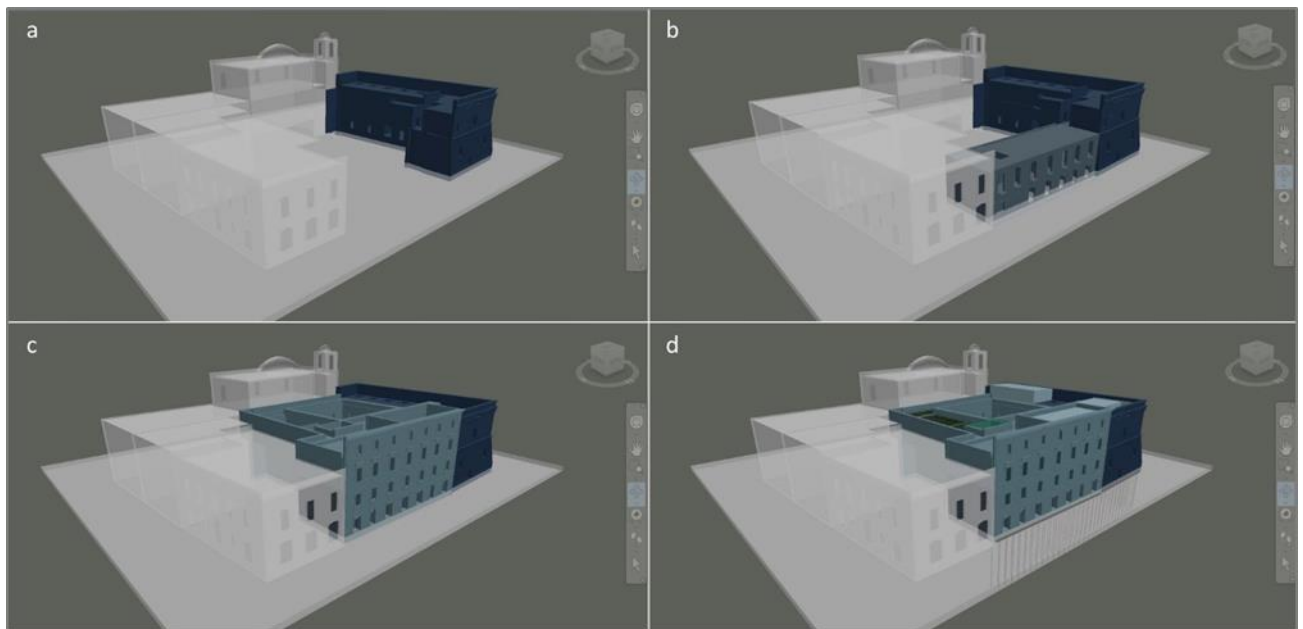
Questa metodologia è stata applicata al caso di studio dell' Ex Monastero degli Agostiniani. Il modello BIM viene importato nel software di coordinamento Navisworks Autodesk® per la **gestione del database** e la **simulazione multi-temporale.**

All'interno di questo software, il modello viene suddiviso in **gruppi** che rappresentano le **epoche costruttive**, gli **interventi subiti** e l'**attuale stato di fatto.**

Ciascun gruppo viene caratterizzato da categorie di **proprietà specifiche che possono essere interrogate** al fine di analizzare la conoscenza, supportare la diagnosi delle cause legate ad interventi antropici e, dunque, l'individuazione dell'intervento.



Gestione informativa 4D HBIM attraverso l'interrogazione dei database collegati ai gruppi che rappresentano le epoche costruttive, gli interventi pregressi e lo stato di fatto.



Simulazione multi-temporale delle epoche costruttive e degli interventi subiti nel tempo

Fase 6 - Condivisione e gestione informativa

Un software di modellazione BIM è sia un modellatore digitale di elementi tridimensionali aggiornabili, sia un database per la gestione e condivisione delle informazioni.

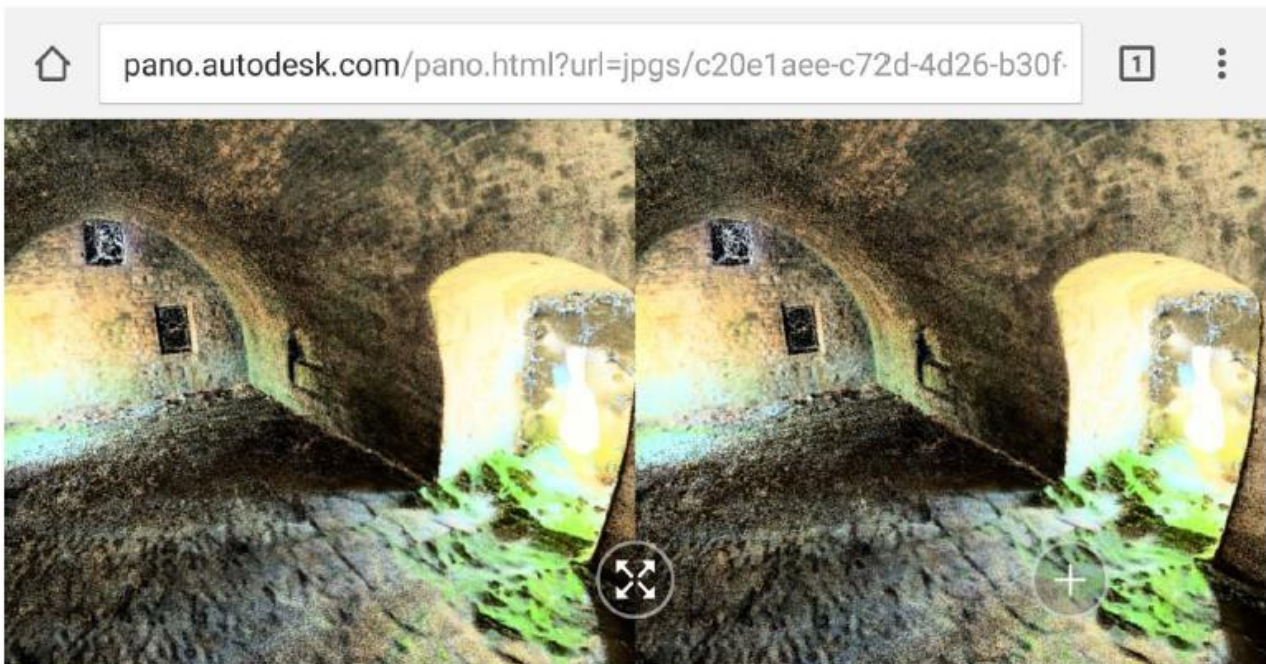
Tuttavia, le informazioni e i dati inseriti nel modello possono essere gestiti attraverso differenti metodi, in base al livello di maturità BIM del gruppo di lavoro. Ad esempio, il **livello 2 BIM** è contraddistinto dalla **condivisione basata su file e documentazioni** e i modelli sono chiaramente condivisi come collegamenti ipertestuali o nell'Ambiente di Condivisione Dati (o Common Data Environment CDE); la proiezione è lo sviluppo di un **livello 3 BIM** che miri alla **trasformazione dei processi basati sullo scambio dei dati** per una maggiore interoperabilità.

La gestione informativa degli attributi semantici può avvenire attraverso metodi differenti:

- Navigazione proprietà degli oggetti parametrici selezionati
- Attributi organizzati in abachi
- Database collegati al modello BIM (archivio strutturato di dati per la gestione delle informazioni attraverso interrogazioni)
- Piattaforme web-based (Cloud)
- Piattaforme web-based (Cloud) connesse a reti di sensori per il monitoraggio ambientale

Inoltre, possono essere utilizzati software di Realtà Virtuale per la visualizzazione e navigazione di modelli BIM e modelli 3D foto-ricostruiti, questi ultimi adibiti allo studio dello stato dei luoghi in remoto. L'utilizzo di una estensione presente nel software BIM Revit Autodesk® permette di generare una immagine stereo-panoramica. Alla fine dell'elaborazione in cloud, il servizio produce il link condivisibile per la navigazione virtuale ed, inoltre, genera un QR code, scansionabile con qualsiasi dispositivo, ad esempio smartphone, che permette di essere reindirizzati

all'URL contenete il rendering virtuale e permettendo un'immersione totale se si dispone di un visore VR.



Mentre, il plug-in Revit Live viene adoperato per visualizzare il modello e consultare i parametri attraverso un tour virtuale del bene.



Il comando “info” permette di leggere in tempo reale, in un menu a tendina, tutti i parametri impostati durante la fase di modellazione, sia degli elementi costruttivi sia

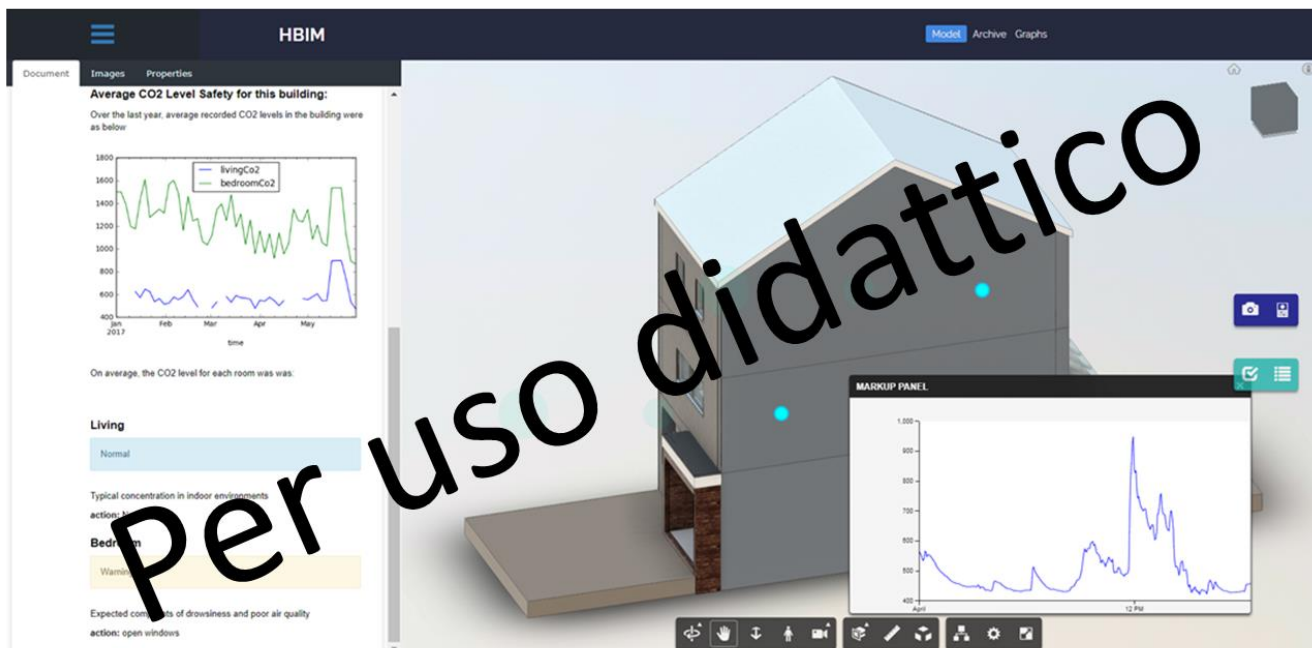
degli elementi creati per lo studio diagnostico delle patologie presenti per la comprensione del modello “as damaged”.



Informazioni parametriche della famiglia derivante dalla nurbs importata come patologia “deposito superficiale” (tesi di laurea di Giacomo Sorino, metodologia BIM e rilievo a servizio di architetture tradizionali, 2018)

La necessità di avere una replica digitale dell’ambiente costruito che segue i cambiamenti dello stesso nel tempo, non solo dal punto di vista geometrico ed informativo, ma anche di acquisizione dei dati ambientali, apre un nuovo scenario di implementazione e fruizione del modello digitale attraverso il concetto di Digital Twin (DT). L’evoluzione del concetto di BIM in Digital Twin, ovvero sia gemello digitale, offre il vantaggio di ottimizzare l’ambiente in cui tutti viviamo. Tuttavia, l’approccio richiede ulteriori sviluppi. Avere una completa conoscenza e comprensione del ciclo di vita delle nostre risorse, compreso il loro impatto sull’ambiente naturale, ed essere in grado di visualizzarle con il contesto spaziale in relazione tra ambiente virtuale e reale potrà favorire quel processo di efficientamento delle risorse, verso un ambiente costruito sostenibile e intelligente. Il DT è definito come la rappresentazione virtuale di un’entità fisica, unisce alla modellazione parametrica della realtà (geometrica e

informativa in approcci come BIM e 3D GIS) la possibilità di connettere il modello alla stessa realtà di contesto attraverso reti di sensori sincronizzati che consentono di acquisire e analizzare dati ambientali e di segnalare rischi potenziali. Il concetto di DT inteso come un modello data-driven per la gestione ed il controllo dei sistemi fisici è emerso nell'ultima decade nei settori manifatturiero, produttivo e operativo. Nei contesti edilizio e infrastrutturale, questo concetto non è ancora ben definito e non trova completo consenso tra i ricercatori e i professionisti, in particolare sulle modalità con cui i processi gestiti con il DT possano essere integrati con le tecnologie data-centric per supportare il progetto e l'esecuzione. I sistemi informativi basati sul DT includono componenti per la raccolta delle informazioni, le funzioni di elaborazione delle informazioni, e le tecnologie di monitoraggio. Alcuni progetti di ricerca sono stati condotti con le finalità dinanzi esplicitate, pur non essendo state inquadrare come DT. Ad esempio, il progetto "The-HBIM portal" ha portato alla implementazione di una piattaforma online che consente di caricare modelli BIM visualizzabili via web ed interrogabili, a cui sono state addizionate funzionalità di visualizzazione di nuvole di punti, risultati diagnostici e di monitoraggio e analisi di dati ambientali per fornire early warnings. I DT sono generalmente intesi come rappresentazioni digitali aggiornate delle proprietà fisiche e funzionali di un sistema, e considerati da alcuni come un passo nell'evoluzione della manifattura, in grado di facilitare l'implementazione dei principi di Industria 4.0. Alcuni studiosi hanno introdotto il concetto di edificio cognitivo che ben si configura all'interno del DT pur avendo una differente connotazione. Tali tecnologie ben si prestano sia alla rappresentazione che all'analisi dell'ambiente costruito indoor e outdoor in quanto consentono di raccogliere l'informazione in maniera strutturata e di computare i dati al fine di valutare le prestazioni residue e suggerire l'attivazione di misure di intervento tempestivamente, oltreché connettere chiunque ovunque.



The Cloud HBIM portal, tesi di Dottorato Ing. PhD Silvana Bruno, in collaborazione con Prof. Prof. Lamine Mahdjoubi – University of West England (UWE), Bristol: analisi in tempo reale dei livelli di CO2 all'interno degli ambienti e suggerimento di misure mitigative

Fase 7 - Gestione del processo costruttivo di interventi di recupero

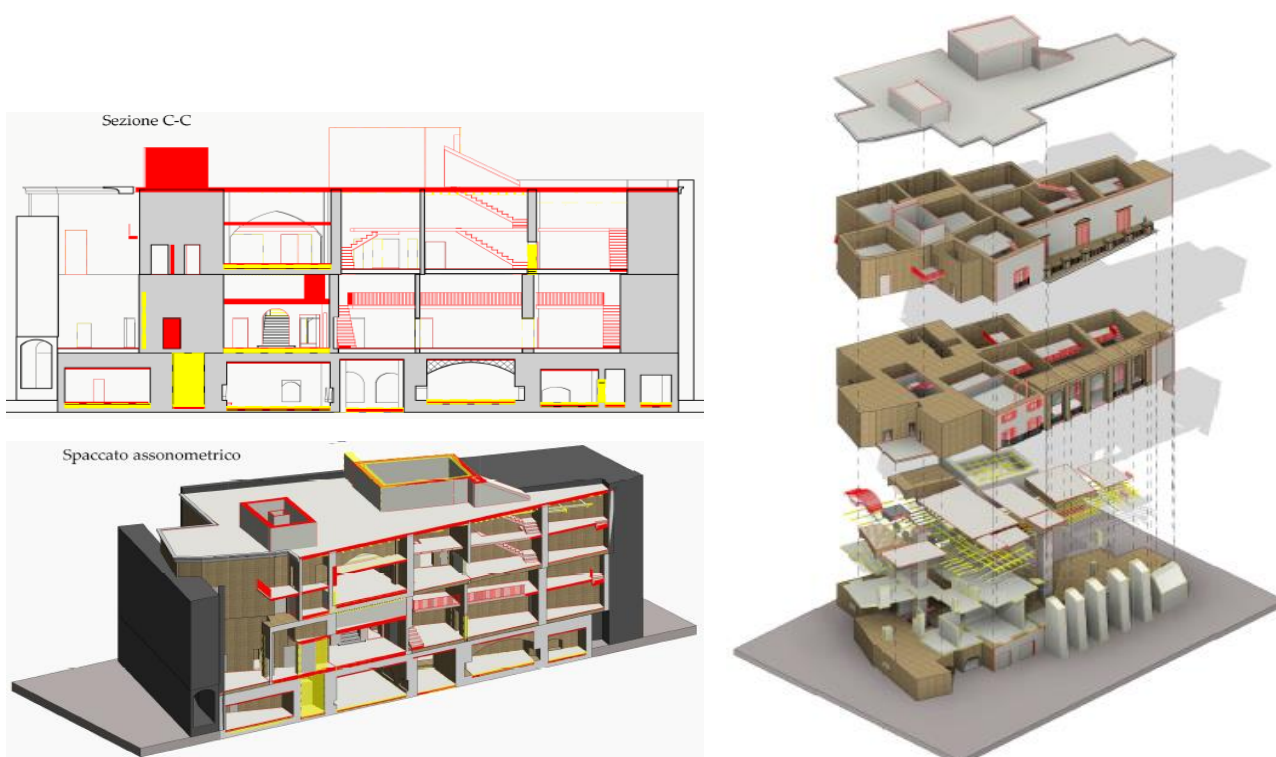
Il valore aggiunto dell'approccio BIM nel recupero e restauro degli edifici esistenti risiede ancora nella **efficace gestione della fase esecutiva** e delle **varianti in corso d'opera** attraverso il confronto agevole delle **alternative progettuali** in termini prestazionali, qualitativo/estetici, economici e di riduzione dei tempi di esecuzione.

Per la **gestione della fase esecutiva**, la realizzazione del modello circa lo stato di progetto prevede la duplicazione delle viste di ciascun livello di pianta, prospetto, sezione e 3D.

Le viste vengono denominate “**stato di fatto**” quando rappresentano lo stato “as damaged”, e le viste duplicate diventano “**stato di progetto**”.

Successivamente, viene generata la “**comparativa**”. La vista comparativa è la vista in cui è possibile visualizzare tutti gli elementi appartenenti alle fasi stato di fatto e di progetto, con un'unica distinzione cromatica, in giallo le porzioni demolite e in rosso quelle ricostruite. La duplicazione di tali viste è passaggio fondamentale per specificare le fasi temporali di ciascun componente edilizio.

Infatti, all'interno del browser proprietà di ciascuna vista vengono definiti il "filtro delle fasi" e la "fase". Di conseguenza, a tutti gli elementi presenti all'interno del modello è associata una fase di appartenenza: fase di creazione, che rappresenta il momento in cui il componente viene costruito, e fase di demolizione che rappresenta il momento in cui l'elemento viene demolito. L'intervento di demolizione di una porzione di muratura, ad esempio, viene riportato come creato nello stato di fatto e demolito nello stato di progetto, l'intervento di nuova realizzazione di un pavimento viene riportato come creato nello stato di progetto.



Sezione e spaccato assometrico della comparativa (tesi di laurea di Noemi Pepe, Potenzialità dell'approccio BIM in progetti di recupero di edifici storici - il caso di palazzo Calò Carducci, 2016)

La **gestione delle varianti in corso d'opera** segue la medesima procedura del caso di studio precedente, ovvero la creazione di fasi di progetto, aggiungendo le fasi riguardanti le alternative progettuali. Tale condizione è stata oggetto dell'intervento di restauro dell'ex Mercato del pesce di Bari, durante il quale si è resa necessaria la variazione dell'intervento architettonico-strutturale della copertura. La prima alternativa progettuale prevede, come soluzione per la copertura, un torrino vetrato e una passerella, la seconda alternativa consiste in una galleria vetrata e due torrini scala.



Prospetto Ovest con ombre



Prospetto Ovest a colori

Prospetto dell'Ex Mercato del Pesce, Bari (tesi di laurea di Patrizia Imbrici, HBIM per la gestione della fase progettuale.

Il caso di studio dell'edificio dell'ex Mercato del pesce a Bari, 2018)

Le modifiche del progetto durante l'esecuzione dei lavori comportano un rallentamento con un dispendio di tempo e risorse ma anche costi aggiuntivi non stimati in fase progettuale. La gestione delle varianti consiste nel valutare tutti i parametri e le informazioni ad esse associate che interessano differenti settori del processo edilizio. L'utilizzo dell'approccio BIM offre il vantaggio di racchiudere tutte le caratteristiche in un unico oggetto parametrico e visibili nel browser proprietà ad esso associato, risultando di facile reperibilità da parte delle figure specializzate. Questo consente una conoscenza approfondita e istantanea, agevolando l'immediato confronto e la scelta della soluzione ottimale. Ad esempio, i parametri utili al confronto tra le due varianti possono essere l'ombreggiamento e l'illuminazione, tramite l'impostazione del percorso solare, ma anche l'integrazione nel contesto urbano, il rispetto della configurazione storica, il bilancio economico ed altro ancora.

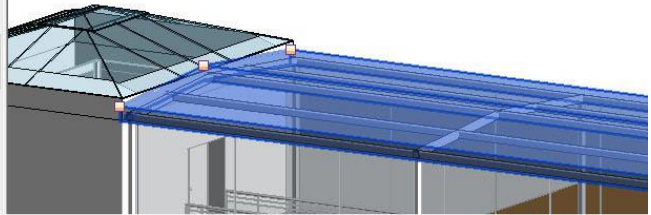
Proprietà

Tetto di base
solaio copertura galleria vetrata

Tetti (1) Modifica tipo

Testo

costo	147.194 euro
posa in opera	assemblamento elementi per bullonatu...
resistenza termica	R = 8,31 (m2K)/W
strato di finitura	pannelli solari in silicio amorfo
tipologia	solaio di copertura assemblato
trasmissione termica	U = 0,12 W/(m2K)
massa termica	39,35 kJ/K
spessore	0,32 m
proprietà finitura	s = 50 mm e potenza di 12,5 kW posa in...



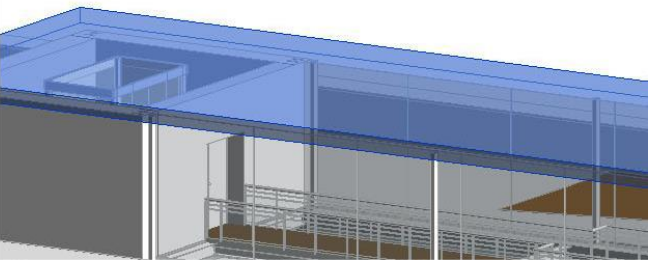
Proprietà

Tetto di base
copertura piana galleria vetrata

Tetti (1) Modifica tipo

Testo

costo	67.481 euro
posa in opera	cls gettato in opera, lamiera grecata bu...
resistenza termica	R = 3,10 (m2K)/W
strato di finitura	membrana impermeabilizzante bitumi...
tipologia	solaio gettato in opera
trasmissione termica	U = 0,32 W/m2K
massa termica	39,20 kJ/K
spessore	0,344 m
proprietà finitura	s = 4 mm e flessibilità al freddo di -25 °C

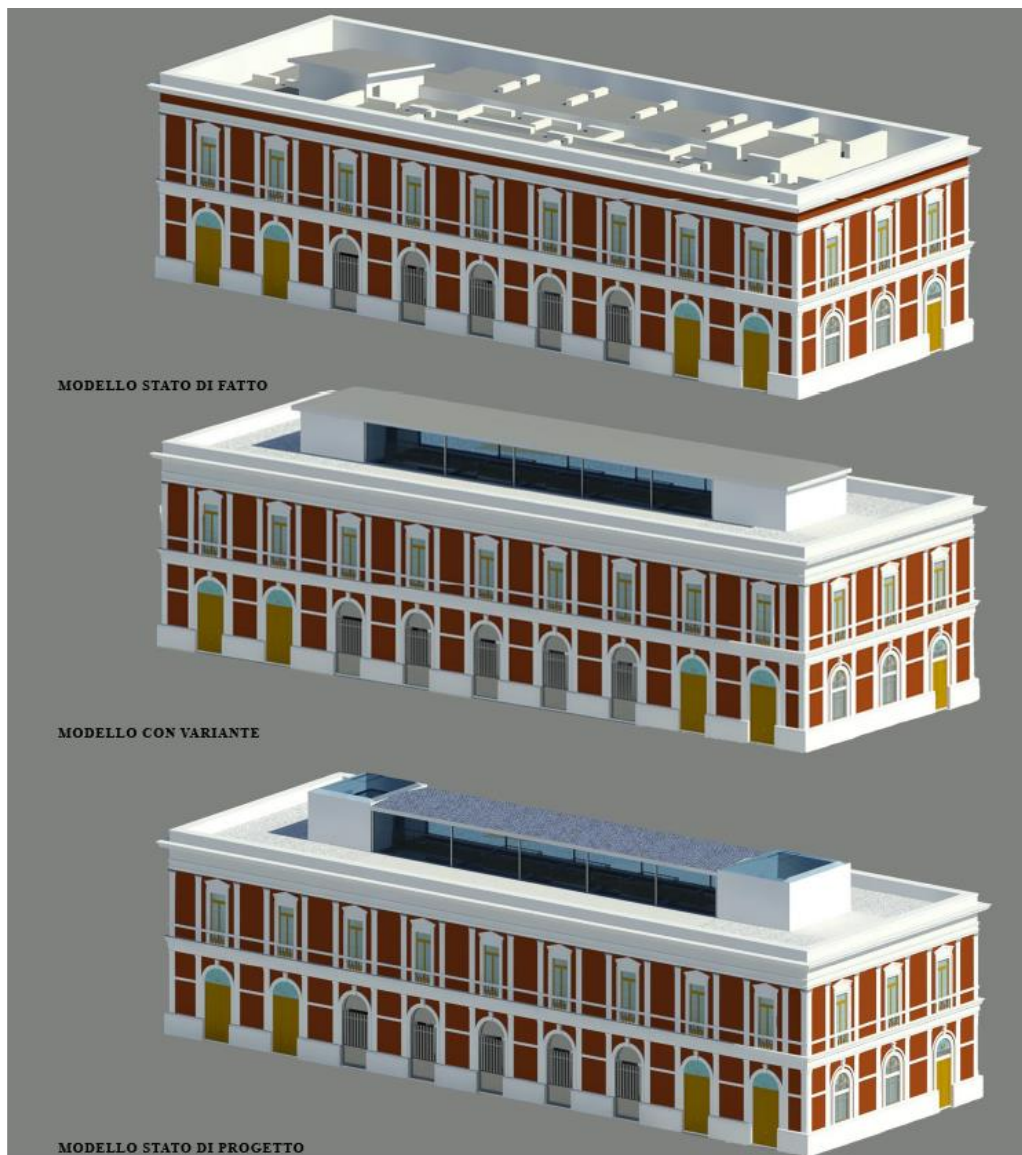


Confronto delle proprietà delle due varianti progettuali (tesi di Patrizia Imbrici, HBIM per la gestione della fase progettuale. Il caso di studio dell'edificio dell'ex Mercato del pesce a Bari, 2018)

abaco mercato del pesce modifica - Excel

	Area	Volume	Fase di creazione	Fase di demolizione	Costo	calcolo demolizione	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
						costo totale demolizione	135792,43
						costo totale nuova costruzione	1371206,641
						totale	1506999,071
						costo totale con solaio piano	1574480,771
						costo totale con torrino vetrato	1654193,375
						differenza	79712,604

Apertura in Excel dell'abaco, esportato da Revit, per la stima economica delle due varianti (tesi di Patrizia Imbrici, HBIM per la gestione della fase progettuale. Il caso di studio dell'edificio dell'ex Mercato del pesce a Bari, 2018)



Vista 3D dello stato di fatto e delle due varianti (tesi di Patrizia Imbrici, HBIM per la gestione della fase progettuale. Il caso di studio dell'edificio dell'ex Mercato del pesce a Bari, 2018)