

RILIEVO PER LA MODELLAZIONE E LA GESTIONE INFORMATIVA HBIM. APPROCCIO MULTICOMPONENTE PER L'ANALISI STRUTTURALE E IL RESTAURO DI EDIFICI STORICI

1. INTRODUZIONE

Per progettare il restauro, il consolidamento o la ricostruzione di parti di un edificio storico con problemi di assetto statico è fondamentale realizzare un modello costruttivo intelligente, che migliori la qualità e l'affidabilità del progetto, soprattutto nell'evidenziare le criticità strutturali, le stratigrafie murarie con le relazioni tecnologiche dei componenti edilizi e la loro distribuzione spaziale. Un complesso interrelato di informazioni che trova oggi una sistematizzazione nella modellazione basata sulla creazione di librerie di oggetti HBIM parametrici, concepiti e sviluppati attraverso il linguaggio descrittivo geometrico (GDL – Geometric Descriptive Language) che si affida alle proporzioni classiche degli elementi selezionati e sul loro utilizzo come ponte tra il modello BIM vero e proprio e i dati raccolti dal rilievo (MURPHY *et al.* 2009).

In questo settore, con l'avvento di strumentazioni digitali fotogrammetriche, laser, UAV, il mezzo attraverso il quale comprendere e comunicare il manufatto ha subito una profonda trasformazione, tanto da divenire un contenitore virtualmente illimitato di informazioni da cui estrarre differenti forme di rappresentazione (HERMAN *et al.* 2020). L'elevata precisione millimetrica raggiunta con l'ausilio delle nuvole di punti consente non solo il rilievo accurato di profili 2D orizzontali e verticali, situazioni di fuori piombo, scostamenti negli allineamenti, ma genera modelli parametrici interoperabili specifici con elevati livelli di accuratezza, complessità e informazione (BRUMANA *et al.* 2019).

Ma i dati raccolti con le tecniche geomatiche non sono sufficienti a fornire le informazioni necessarie per creare un modello strutturale rappresentativo dell'assetto statico e dei comportamenti dinamici di un edificio. Un'operazione che richiede una profonda competenza capace di interpretare le fasi del processo edilizio storico da un punto di vista costruttivo (TUCCI *et al.* 2004). Il rilievo diretto del manufatto, registrando notazioni critiche e grafiche approfondite, favorite dalla consuetudine con il monumento, consente di valutare dissesti, quadro fessurativo, confronti ed effetti dei carichi (CARBONARA 1996, 416).

Rilevare e modellare con grande accuratezza geometrico-dimensionale testimonianze dell'architettura storica non garantisce automaticamente di ricostruire gli elementi costruttivi quali le murature, gli orizzontamenti, le coperture che, con tutte le loro morfologie irregolari, con situazioni di dissesto

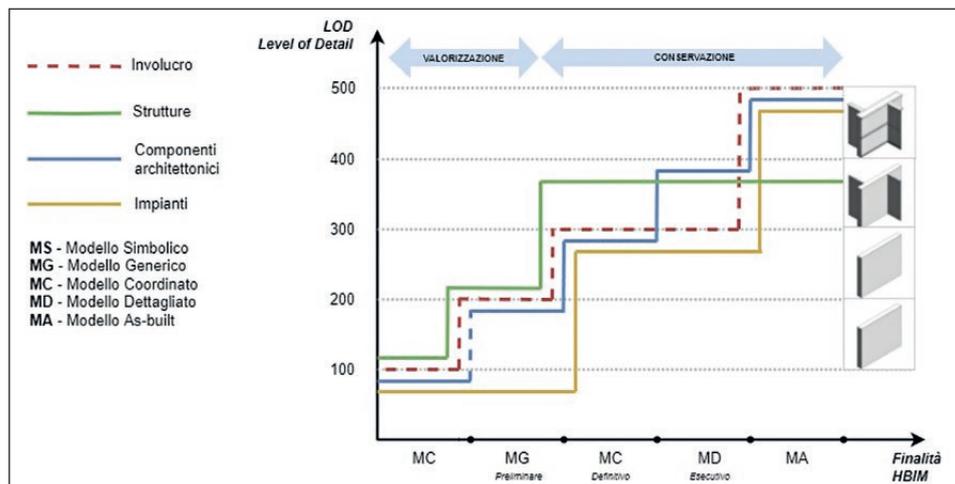


Fig. 1 – Processo HBIM e LOD per differenti finalità (BHiLAB - CNR ISPC).

strutturale, di degrado materico, di vulnerabilità sismica, condizioneranno e indirizzeranno progetti di conservazione non solo di edifici relativamente integri, ma spesso interventi di ricostruzione di fabbricati abbandonati e diruti o crollati per eventi sismici.

Se utilizziamo il sistema di valutazione BIM per decidere il Livello Di Dettaglio (LOD Level Of Details) del modello da realizzare in rapporto alle finalità di progetti esecutivi di conservazione, si chiarisce la differenza tra l’obiettivo della valorizzazione e quello della conservazione (Fig. 1). Partendo dall’assunto di una indispensabile integrazione tra analisi critica delle strutture e rilievo e modellazione 3D, il documento è organizzato come segue:

- approccio metodologico impostato sulla selezione di classi di dati che si combinano nel rappresentare lo stato dell’edificio,
- protocollo per un rilievo integrato guidato da un piano strategico di raccolta dati,
- approccio sistematico con rilievo diretto dei casi studio,
- procedure per un processo di decostruzione virtuale del manufatto e per la creazione di modelli parametrici strutturati con informazioni semantiche.

E.G., G.C.

2. APPROCCIO METODOLOGICO PER L’HBIM COSTRUTTIVO

La proposizione «ciò che è specifico dell’architettura è il modo di porre in relazione le varie strutture che confluiscono in essa» (TAFURI 1968)

rappresenta un assioma che con immediata evidenza e in maniera sostanziale esprime la logica su cui si fonda la metodologia proposta. Si parte dall'assunto che l'architettura classica è caratterizzata da un sistema di rapporti dotati di intrinseca logica relazionale tra le parti e il tutto, la quale determina non solo gli aspetti formali, ma anche l'assetto costruttivo. È utile recuperare una riflessione filosofica che rileva come le relazioni posseggano una propria modalità e dunque una forma strutturante che apre ad un'architettura delle relazioni, proiettivamente intesa quale matrice generativa, per affermare che la struttura fondamentale della realtà si definisce come processo e relazione, per cui nessuna forma è isolata e tutte sono interagenti (PACI 1966, 184-185).

La metodologia che viene presentata in questo articolo riguarda un approccio integrato basato sull'identificazione delle relazioni in chiave ontologica che legano quei componenti architettonici che con i loro specifici caratteri e con la loro interdipendenza hanno contribuito a determinare lo stato conservativo di un edificio storico. Questa visione strategica ha indirizzato la documentazione e i rilievi di alcuni complessi monastici rappresentativi di una rete di architettura religiosa di grande valore, situata sulle aree collinari della valle del Drinos nel Sud dell'Albania. A causa di fenomeni di abbandono e crollo di porzioni significative, il processo per il loro restauro, ma soprattutto per la ricostruzione reintegrativa dell'immagine originaria, è partito dall'analisi di grafici e testi di archivio, per poi utilizzare in maniera integrata tecnologie di rilievo strumentale e processi di analisi e ricostruzione virtuale degli edifici originari, così da raccogliere in un unico sistema condiviso, una piattaforma HBIM, dati di diversa natura: storico-evolutivi, geometrico-dimensionali e costruttivi.

La metodologia che è stata sperimentata nel sito di S. Maria in Goranxi, ha previsto l'osservazione sul campo del monumento (fasi di conoscenza), l'individuazione delle parti che lo costituiscono (fase di scomposizione in elementi spaziali, tipologici e componenti strutturali), l'individuazione delle relazioni esistenti tra le parti (semantizzazione e organizzazione delle ontologie). I componenti sono stati classificati in cinque classi di dati, le cui reciproche relazioni contribuiscono a creare l'identità architettonico-strutturale dell'edificio a supporto di un modello costruttivo intelligente.

2.1 Classi di dati per l'HBIM

Se vogliamo analizzare e approfondire le specifiche esigenze di modellazione HBIM per il progetto di restauro alla scala architettonica, è possibile distinguere diversi filoni di ricerca e analizzare lo stato dell'arte. Considerando in generale l'approccio alle componenti architettoniche il lavoro condotto da Dore (DORE *et al.* 2015) integra la modellazione dell'edificio creata da dati storici con la modellazione procedurale sviluppata dal rilievo laser scanner sia per l'analisi strutturale che per quella conservativa. Altri lavori definiscono

librerie di componenti HBIM utilizzando le risorse messe a disposizione da software commerciali per creare librerie dedicate di oggetti parametrici (ORENI *et al.* 2014; GARAGNANI *et al.* 2016; LÓPEZ *et al.* 2017). Sempre collocabile in questo filone ma con il fine di superare i limiti di rappresentazione dell'HBIM possiamo citare i lavori di Garagnani (GARAGNANI 2013; GARAGNANI *et al.* 2021) nel quale la geometria degli elementi viene importata nell'ambiente BIM associandola manualmente ad una macro-categoria di famiglie. Altri lavori sono quelli focalizzati sul tema dell'arricchimento semantico e della gestione della conoscenza (QUATTRINI *et al.* 2017; BRUNO *et al.* 2018; SIMEONE *et al.* 2019).

Un altro tema importante, usualmente collocato sotto il termine di Analisi stratigrafica, riguarda le relazioni esistenti tra parti materiali dell'edificio costruite in epoche diverse. A tal fine, Beltramo (BELTRAMO *et al.* 2019), sulla scorta dei lavori condotti da Chiabrando (CHIABRANDO *et al.* 2017) per la mappatura del decadimento murario in ambiente BIM e da Diara (DIARA, RINAUDO 2018), opera per l'estrazione e gestione dei dati IFC tramite Database Management System (DBMS). Anche il lavoro condotto da Trizio (TRIZIO *et al.* 2019) si concentra sull'analisi stratigrafica, effettuata sia su fotopiani dei fronti, generati dal modello fotogrammetrico, sia sul modello digitale mediante software per la visualizzazione e modifica delle mesh. Borin (BORIN *et al.* 2020) definisce un flusso di lavoro che per la rappresentazione dei diagrammi di Harris ricorre a sistemi ontologici integrati con l'ambiente BIM. Più di recente Banfi (BANFI *et al.* 2022) conduce un lavoro che ha l'obiettivo di individuare in ambiente BIM superfici e volumi stratigrafici mappati con descrizioni e materiali.

Ricerche più direttamente dedicate a comprendere, valutare e rappresentare situazioni di edifici fortemente dissestati, propongono metodi di analisi delle *Strutture Costruttive* come nello studio eseguito da PEPE *et al.* (2020) che propone un flusso di lavoro che integra modelli HBIM, FEM, rilievo geomatico e modellazione. Con un approccio simile il lavoro di Rolin (ROLIN *et al.* 2019) è incentrato sulla stima della deformazione della struttura e sulla distribuzione delle sollecitazioni di compressione e trazione in tutti i componenti della struttura complessa; mentre quello di CURRÀ *et al.* (2021) propone un flusso di lavoro in cui il modello HBIM consente lo scambio strutturato delle conoscenze acquisite sull'edificio esistente e permette l'analisi dei meccanismi locali per verificare le prestazioni dell'edificio.

Sulla creazione e gestione in ambiente HBIM di Abachi delle Murature, Adami (ADAMI *et al.* 2020) propone un nuovo metodo di classificazione, cercando di superare i limiti del tradizionale sistema 2D e di sfruttare appieno il potenziale delle soluzioni offerte dai BIM authoring tools; mentre Diara (DIARA, RINAUDO 2020) propone una classificazione nel formato standard IFC implementata all'interno di un software BIM open source.

Parallele ma distinte da quelle precedenti sono le ricerche riguardanti la classificazione dei Dissesti Strutturali. In quest'ambito ZUCCARO *et al.* 2011

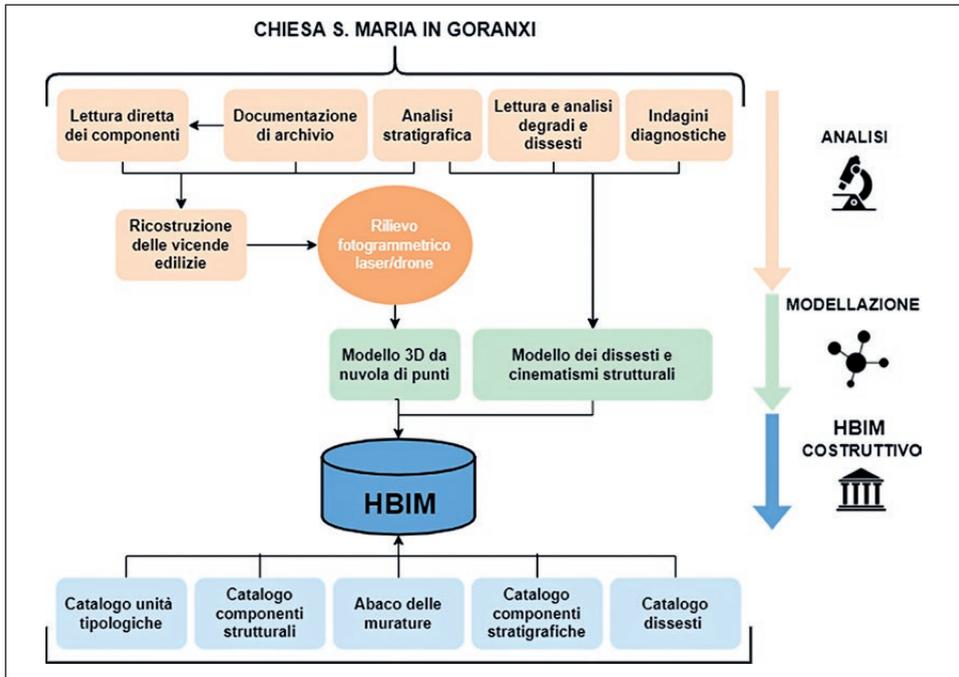


Fig. 2 – Framework proposto, basato sull’integrazione tra un ambiente HBIM e modelli di rappresentazione ontologici per la documentazione completa dell’edificio (BHiLAB - CNR ISPC).

propongono uno strumento multimediale di autoformazione per la valutazione dei danni provocati dagli eventi sismici. I lavori di Dore (DORE *et al.* 2015) e di Valero (VALERO *et al.* 2018) presentano un sistema per il monitoraggio delle murature integrando strumenti di reality capture, data processing (compreso il machine learning) e modelli HBIM. Il lavoro di Bernardello (BERNARDELLO *et al.* 2020), invece, suggerisce due alternative per creare oggetti semantici tridimensionali in un ambiente BIM nei quali integrare le informazioni solitamente incorporate nei disegni bidimensionali.

Il flusso di lavoro HBIM procedurale che si intende sviluppare è mostrato nella Fig. 2. In una prima fase, dopo la raccolta di documentazione archivistica, si effettuano le analisi per ricostruire le vicende edilizie del monumento. Viene stabilito un protocollo, non solo per la costruzione del database relativo a questi dati, ma per procedere all’incrocio semiautomatico di informazioni relative all’assetto statico. Il protocollo prevede che in maniera semiautomatica si definisca il programma di rilievi integrati, finalizzati a produrre nuvole di punti da importare nel software HBIM e trasformare in un modello 3D, orientato alla modellazione delle informazioni.

A questo scopo il presente contributo introduce il concetto di decostruzione dell'edificio storico articolando i dati in cinque classi distinte in Unità tipologiche, Componenti strutturali, Componenti di discontinuità temporale, Abachi delle murature e degli orizzontamenti, Abachi dei dissesti, dotate delle loro proprietà morfologiche, materiche e costruttive, applicando le potenzialità dell'utilizzo dei modelli semantici e le relazioni tra i vari componenti:

– *Unità tipologiche*. Rappresentano insiemi architettonici che spazialmente e funzionalmente hanno una identità architettonica. Nel caso della chiesa di S. Maria Goranxi, sono unità il naos, il narcece, l'esonarcece, i quali con la loro conformazione spaziale, la disposizione planimetrica e l'aggregazione compositiva, possono influire sull'assetto statico.

– *Componenti strutturali*. Il processo analitico decostruisce il manufatto, distinguendo i vari componenti strutturali (murature in elevazione, pilastri, volte, cupole, etc.) e le relazioni che in termini di posizione, carichi, connessioni costruttive concorrono a provocare i dissesti. Rientrano in questa classe le informazioni geomorfologiche del sito.

– *Componenti di discontinuità temporale*. In un percorso fondato sulla gestione informativa tridimensionale del manufatto, gli elementi architettonici realizzati in epoche diverse, vengono individuati secondo un approccio e modalità operative che si collegano ad una posizione critica (BONELLI 1986) nella quale si afferma che la stratigrafia archeologica (nata per strati orizzontali compatti e registrata con sezioni 2D) mal si adatta alla complessità degli organismi edilizi con spazi vuoti, parti costruttive discontinue, masse murarie spesso trasversali a tutto il complesso architettonico.

– *Abaco delle murature e degli orizzontamenti*. Assimilabile alle famiglie del BIM, cataloga sia le strutture verticali costituenti l'involucro opaco dal punto di vista della composizione materica, delle modalità costruttive e della qualità muraria (tessitura, posa in opera, sezione trasversale, presenza intonaco, collegamenti tra pareti murarie, interventi recenti e stato di consistenza) sia le strutture orizzontali (solai, volte, cupole, coperture). L'Abaco fa riferimento ad un catalogo in progress da costruire utilizzando le monografie di settore, i manuali, gli abachi territoriali.

– *Abaco dei dissesti*. La metodologia considera i 28 meccanismi di danno associati ai diversi macroelementi che possono essere presenti in una chiesa, così come indicato nella Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri sulla Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale (DPCM 2008). Attraverso un opportuno modello è possibile valutare un indice di vulnerabilità e quindi l'indice di sicurezza sismica dell'edificio (GIGLIARELLI *et al.* 2020). La procedura, nata per tipologie di chiese nazionali, è stata adattata alle chiese in esame.

E.G., L.C.

3. RILIEVO INTEGRATO PER L'HBIM

Questa fase del progetto è partita dalla consapevolezza che l'acquisizione oggi avviene attraverso processi che si avvalgono di strumenti avanzati per il rilievo sul campo; parliamo di tecnologie GPS, Lidar, Slam e fotogrammetriche, utilizzabili singolarmente in relazione al dato, oppure abbinando una o più tecnologie affidandosi ad un protocollo procedurale finalizzato ad un processo integrato, in grado di definire dei percorsi di rilievo 3D ottimizzati in funzione delle caratteristiche del modello fisico da rilevare, cercando di risolvere le problematiche di multi-risoluzione e conservazione dell'affidabilità del dato particolarmente critici nel costruito storico.

Il protocollo ha quindi l'obiettivo di selezionare gli strumenti in relazione alle finalità del rilievo e a fattori contestuali al progetto di rilievo (disponibilità di fondi, personale esperto, reperibilità di strumentazione, etc.). Lo stesso protocollo preserva il modello dalla ridondanza di informazioni che è uno dei principali problemi di questo tempo e che ha cambiato l'approccio operativo del rilevatore, un tempo attento selezionatore dei dati utili ad una rappresentazione efficiente, ma oggi accumulatore massivo di informazioni, supportato sempre più da dispositivi capaci di agevolare e democratizzare soprattutto le operazioni di ripresa del dato numerico (nuvole di punti) (BIANCHINI *et al.* 2019; GIGLIARELLI *et al.* 2020).

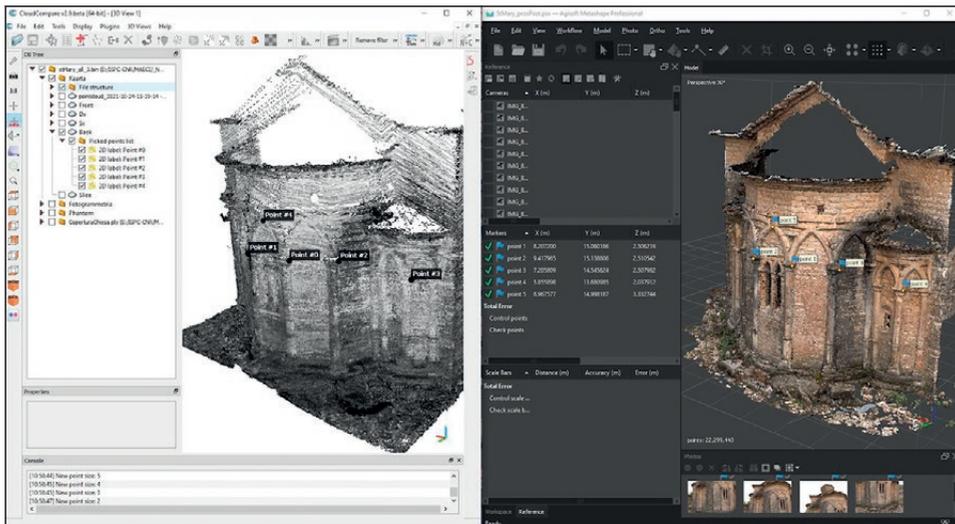


Fig. 3 – Individuazione di punti omologhi nella nuvola rada da laser scanner e nella nuvola dettagliata da fotogrammetria terrestre per trasformare il secondo dato rispetto al primo. Operazione effettuata per l'orientamento del prospetto posteriore della chiesa (BHiLAB - CNR ISPC).

Nei siti studiati sono inoltre emersi altri temi verso cui convergere le successive operazioni di rilievo: la conoscenza dell'orografia del terreno e l'indagine dei resti dei monasteri che circondano le chiese. In base agli obiettivi di indagine e ai fattori contestuali il gruppo di lavoro formato da esperti dell'ISPC CNR, dell'Univpm e dell'IKTK ha ritenuto utile optare per le seguenti tecnologie di rilievo: la fotogrammetria aerea per la mappatura del terreno, la restituzione dell'impianto planimetrico del monastero e delle coperture della chiesa; la fotogrammetria terrestre per la restituzione dei prospetti esterni e dell'intradosso delle volte e infine la scansione laser con tecnologia SLAM per la descrizione spaziale e per la registrazione relativa dei prodotti di rilievo. A supporto di un orientamento globale del dato discreto, si è proceduto con una battuta di punti utilizzando stazioni GPS (Fig. 3).

Attraverso il passaggio Scan-to-Bim si è passati dal modello digitale reality-based al “modello interpretativo/ricostruttivo” in HBIM, considerato ormai da anni come una possibile soluzione in grado di migliorare la rappresentazione del patrimonio costruito e la conoscenza ad esso correlata (LOGOTHETIS *et al.* 2015; POCOBELLI *et al.* 2018), soprattutto grazie alla sua capacità di andare oltre la mera restituzione geometrica per rappresentare informazioni relative ad aspetti del manufatto diversi dalla geometria, nonché di consentire alcune operazioni logiche e di ragionamento su di essi attraverso l'integrazione dei dati in un unico repository coerente e accessibile (VOLK *et al.* 2014). La finalità del modello HBIM sviluppato è stato quello di essere uno strumento di sintesi interpretativa e condivisa per la conoscenza del bene (BANFI *et al.* 2019; CLINI *et al.* 2020) ed una base per il riconoscimento delle unità, dei componenti e degli abachi.

E.G.

4. CASI DI STUDIO. MONASTERI E CHIESE POST BIZANTINE IN ALBANIA MERIDIONALE

L'occasione di sperimentare questa metodologia è nata durante la prima missione del 2019 del progetto “Tecnologie multidisciplinari per lo studio e la conservazione dei Monasteri Post Bizantini in Albania meridionale”, coordinato dall'ISPC CNR e sostenuto finanziariamente dal Ministero degli Affari Esteri della Repubblica Italiana. Il progetto intende contribuire allo studio, alla salvaguardia e alla valorizzazione di tre di questi straordinari monumenti situati nel Sud dell'Albania, nella provincia di Gjirokastra, applicando un programma integrato che parte dalla ricerca storico-architettonica e si sviluppa con tecnologie innovative di rilevamento e di documentazione dati tramite sistemi 3D-HBIM.

I monasteri di S. Maria in Goranxi (Fig. 4), del Profeta Ilia e dei Santi Ciriaco e Giuditta, sono situati sulle colline che sovrastano la valle del Drinos

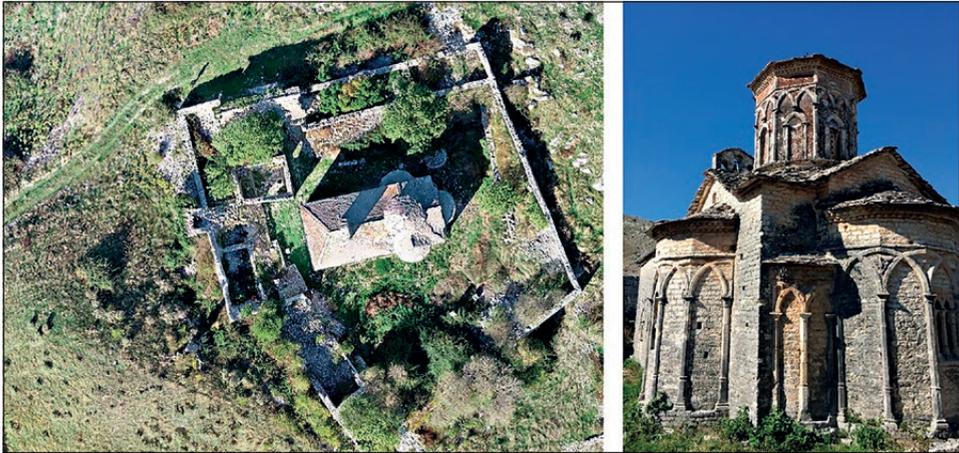


Fig. 4 – Il complesso monastico di S. Maria in Goranxi. Ortofoto da drone orientata WGS 84 (foto G. Fangi BHiLAB - CNR) e vista lato orientale della chiesa con le absidi centrale e laterali (foto E. Gigliarelli BHiLAB - CNR ISPC).

e fanno parte di un patrimonio consolidatosi a partire dalla metà del XVI secolo, quando grazie al pragmatismo ottomano, vennero costruiti in Albania meridionale numerosissimi monumenti ecclesiastici, con diverse varianti tipologiche e molte caratteristiche comuni, ereditando molti principi formali e costruttivi della ricca tradizione bizantina. Questi edifici videro una grande fioritura nel periodo in cui l'Albania, benché fosse prevalentemente uno stato musulmano, manifestava un atteggiamento tollerante verso le altre religioni, incluso il cristianesimo, consentendone la pratica in alcune regioni (GIAKOUMIS 2002). Questi complessi sono costituiti da corpi di edifici adibiti alla vita monastica. Al centro sorge l'edificio più antico, il *katholikon*, la chiesa con uno schema a pianta centrale tipico della tradizione greco-ortodossa.

Vennero eretti in posizioni dominanti, in punti ben protetti e scenografici, che presentano un carattere difensivo, circondati da alte mura, in alcuni casi dotate di torri di difesa. Alla fine del XVIII secolo la comunità cristiana fu minacciata e la maggior parte delle chiese e dei monasteri vennero abbandonati e furono saccheggiate e distrutte. Da allora i terremoti e i conseguenti danni bellici nelle due guerre mondiali hanno portato alla distruzione della maggior parte dei monasteri e alle pessime condizioni di quelli rimasti.

4.1 Caratteri costruttivi e strutturali dei complessi

In questo capitolo e nel successivo vengono sintetizzate le principali osservazioni preliminari e dirette effettuate sullo stato conservativo dei complessi che nella gestione del metodo proposto rappresentano strumenti critici

per orientare il processo di rilievo e modellazione dei disegni. Sono molti gli elementi comuni che caratterizzano i complessi monastici presi in esame, riconducibili anche ad altre strutture presenti nel territorio, che costituiscono una tipologia che si caratterizza sotto vari aspetti: l'orientamento planimetrico della chiesa, con l'asse orientato secondo un'antica tradizione religiosa sopravvissuta per il forte valore simbolico; la posizione dell'edificio di culto, inserito al centro di un cortile delimitato dai fabbricati di servizio, un insieme di condizioni che hanno riflessi sull'assetto strutturale del complesso edilizio e sulla risposta sismica delle singole parti che lo compongono in un territorio, quello dell'Albania meridionale, segnato dai terremoti.

Pertanto, mentre i corpi perimetrali del monastero trovano nell'assetto distributivo-funzionale le condizioni ottimali per creare efficaci connessioni d'angolo e interazioni che influiscono positivamente sulla risposta sismica, la chiesa si presenta isolata, o collegata tramite corpi accessori successivi alla costruzione originaria, pertanto maggiormente esposta al rischio sismico.

Gli edifici di culto sono concepiti con un assetto che risponde sia alle esigenze funzionali, sia a requisiti di sicurezza, attraverso una migliore qualità della struttura muraria rispetto agli altri edifici e grazie alla configurazione geometrica delle maglie murarie. L'impianto a croce greca, esempio di *Unità tipologica*, oltre ad assumere un significato simbolico, ha anche una sua valenza strutturale, grazie all'articolazione dei muri ortogonali che si prestano ad assorbire le spinte multidirezionali delle volte e delle cupole che ricoprono lo spazio interno.

La condizione di stabilità è accentuata anche dalla conformazione della struttura d'elevazione con i suoi *Componenti strutturali*: a) le absidi disposte ai lati del transetto e dietro il presbiterio operano come robusti contrafforti che stringono la scatola muraria e b) il sistema di volte a botte, vele e cupole, si contrappongono all'interno, e al tempo stesso scaricano le spinte sugli elementi perimetrali e sui muri di controvento. Ad alterare i caratteri costruttivi originari di questi edifici hanno contribuito nel tempo le numerose modifiche apportate per esigenze distributive, prodotte generalmente dall'aggiunta o dalla trasformazione di corpi addossati, veri *Componenti di discontinuità temporale* (Fig. 10).

4.2 La chiesa di S. Maria in Goranxi

L'architettura della chiesa appare alquanto modificata rispetto alla probabile configurazione originaria, con le tre unità tipologiche rappresentate dal naos-corpo a pianta centrale, dal nartece e da un esonartece originariamente porticato, addossato alla facciata, successivamente sopraelevato per unirsi con la struttura preesistente. In base alle ricognizioni effettuate in occasione di diversi sopralluoghi è stato possibile effettuare una ricognizione generale del complesso e della chiesa in particolare, unica struttura che si conserva con un assetto stabile (Fig. 5).

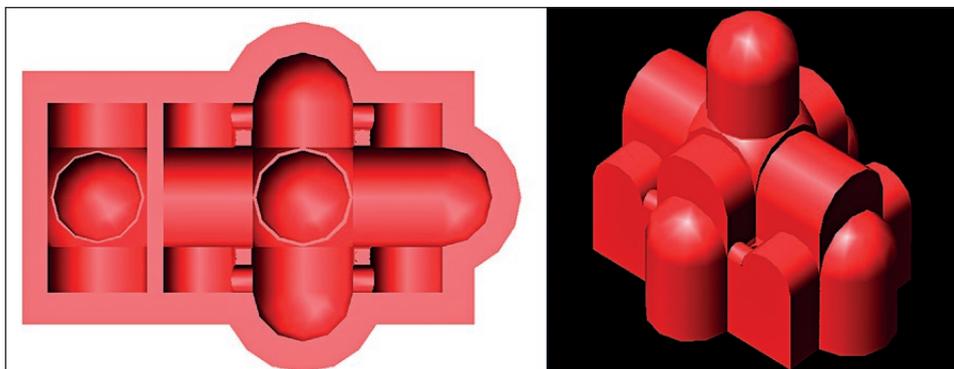


Fig. 5 – A sinistra, impianto a croce greca con schema a trifoglio e avancorpo di epoca successiva, visto dal basso. A destra, volumetria d'insieme dello spazio interno con rappresentazione dei vuoti (BHiLAB - CNR ISPC).

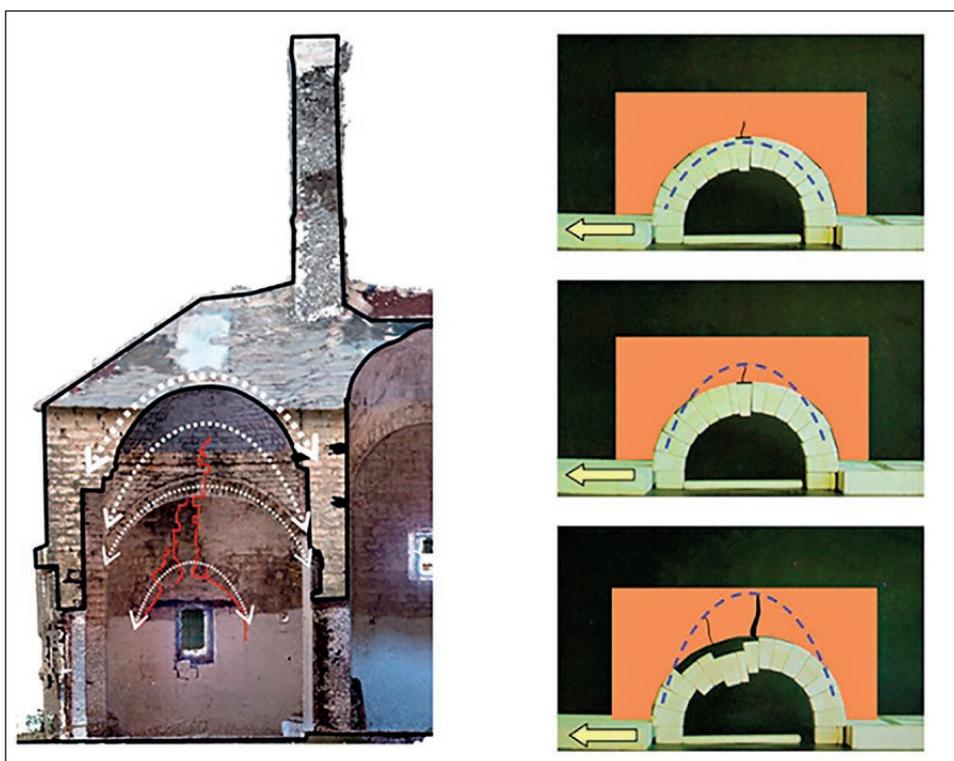


Fig. 6 – La migrazione della curva delle pressioni, dal basso verso l'alto: mentre si riduce la spinta, l'arco si allenta e i conci scorrono pericolosamente. Nel caso in esame la tamponatura dell'arco contrasta il fenomeno (BHiLAB - CNR ISPC).

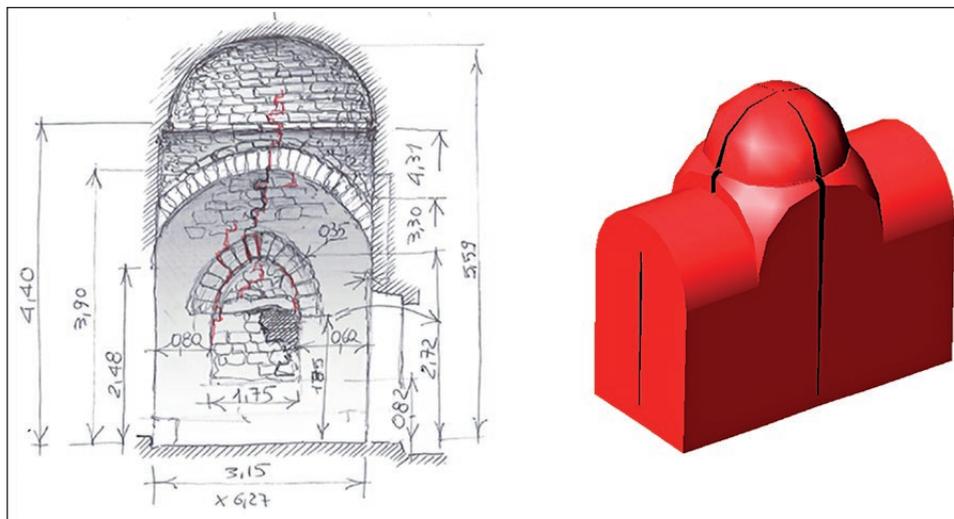


Fig. 7 – Esonartece della chiesa con cupola su pennacchi di vela e volte a botte laterali. Quadro fessurativo e cinematico di danno con formazione di lesioni lungo le mediane associate alla rotazione dei muri esterni (BHiLAB - CNR ISPC).

Le note che seguono riguardano i maggiori dissesti che si riscontrano nella struttura dell'esonartece d'ingresso, tamponato e sopraelevato; il corpo che ha subito le maggiori trasformazioni, ma anche la struttura originaria mostra un evidente stato di danno (Fig. 6). La restituzione del quadro fessurativo indica l'esistenza di modesti, ma significativi cedimenti fondali della parete laterale destra, di cui sarà necessario ricercare le cause. Altri cedimenti si rilevano sul fronte originario, dove sul lato destro è stata individuata un'ampia cripta voltata a botte su cui si imposta in falso il muro. L'assestamento della struttura ha evidentemente trascinato il muro sovrastante con la manifestazione di un fenomeno fisiologico. Questi indizi, sinteticamente descritti, costituiscono in realtà punti cardine dell'analisi strutturale, assieme al quadro fessurativo dell'avancorpo, con le lesioni che si concentrano lungo le mediane in corrispondenza delle chiavi degli archi di scarico. Il meccanismo di danno è quello tipico delle strutture a doppia simmetria, riconducibile a modalità note legate agli effetti delle spinte. La fessurazione mediana delle volte a vela e delle cupole è fisiologica, pertanto non sorprende. Le lesioni corrispondono alle chiavi degli archi di scarico, che non si percepiscono materialmente, ma di cui si intuisce il funzionamento meccanico (Fig. 7).

I muri esterni mostrano un quadro fessurativo compatibile con i cinematicismi osservati all'interno ed evidenziano le tipiche lesioni di strappo dei cantonali, scorrimento e ribaltamenti fuori del piano, classificabili nella

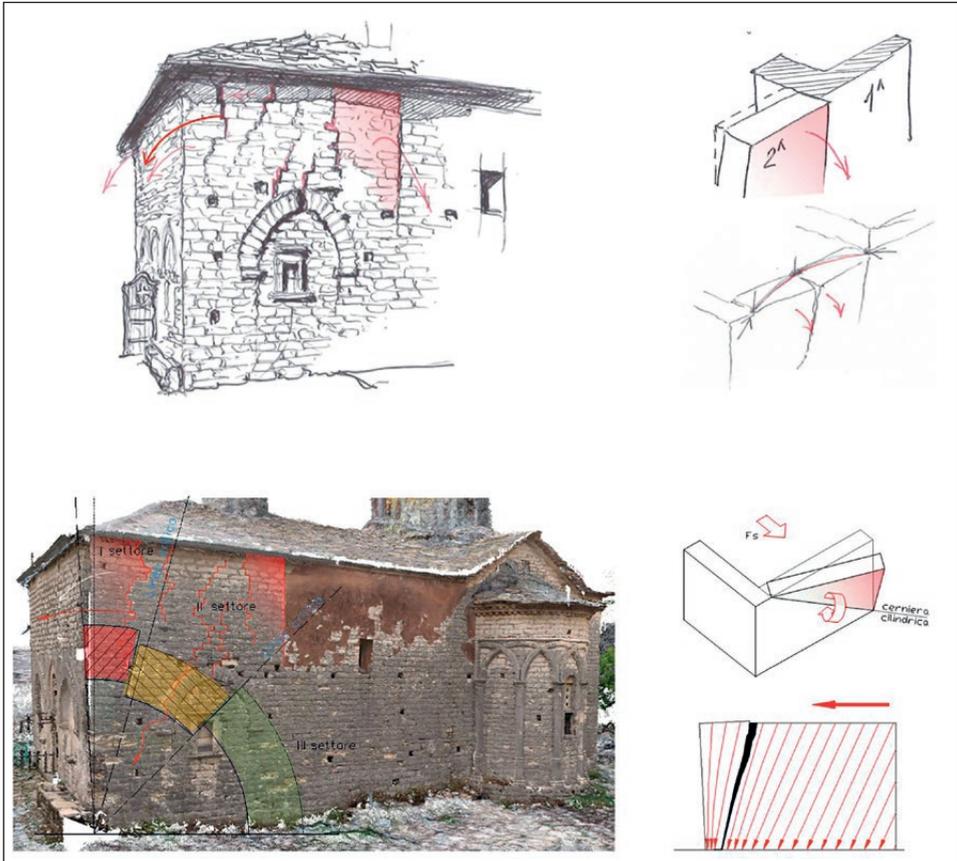


Fig. 8 – Corpo d'ingresso costituito dall'esonartece tamponato e sopraelevato, interessato da meccanismi di dissesto imputabili ad azioni sismiche e alle spinte delle volte e archi contro le pareti esterne (BHiLAB – CNR ISPC).

categoria dei cinatismi di danno di primo modo e secondo modo, imputabili in gran parte agli effetti del sisma. Sulle pareti laterali si riconoscono dei cinatismi composti che tuttavia si possono scomporre in meccanismi elementari da analizzare separatamente.

In particolare, si distinguono due meccanismi nel piano che corrispondono ad un cinatismo di rotazione del cuneo di testata e uno di scorrimento, evidenziato dalle lesioni distese, mentre fuori del piano la parete subisce un ribaltamento dell'estremità priva di connessioni con la struttura originaria. L'evoluzione di questo secondo fenomeno comporta l'innesco di un meccanismo a flessione orizzontale nel momento in cui l'attrito con il cantonale

originario esplica una modesta azione di trattenuta, in grado di modificare il cinematismo originario. La presenza dell'arco tamponato favorisce l'evoluzione al collasso del fenomeno di dissesto (Fig. 8).

G.C., E.G.

5. MODELLI ONTOLOGICI

L'approccio proposto si basa sull'integrazione di un ambiente BIM con una base di conoscenza specifica dell'artefatto che mira a fornire una soluzione in grado di coprire completamente la conoscenza elaborata in un processo del patrimonio e necessaria per la sua documentazione e per decisioni consapevoli relative alla sua conservazione. In questa fase, l'integrazione proposta è stata applicata alla rappresentazione di alcuni domini di conoscenza chiave del patrimonio ovvero le unità tipologiche, le componenti strutturali, le componenti di discontinuità temporale, l'abaco delle murature e quello dei dissesti strutturali. La formalizzazione della conoscenza relativa a queste discipline è stata integrata con una rappresentazione basata sui componenti fornita dall'ambiente BIM e necessaria per controllare le caratteristiche geometriche e tecnologiche del manufatto architettonico. In questo processo di integrazione di un modello BIM con una struttura ontologica, un aspetto delicato considerato ha riguardato la definizione della giusta posizione in cui formalizzare le informazioni, così come quali informazioni utilizzare per collegare l'area BIM con la base di conoscenza così da garantire l'interoperabilità tra i due sistemi e limitare la duplicazione dei dati.

Come mostrato in Fig. 9, il dialogo tra questi due ambienti è assicurato dalla trasposizione, nel modello basato su ontologie, dell'insieme delle istanze che compongono il modello dell'edificio, garantita da un identificatore univoco che assicura la corrispondenza uno-a-uno e che può essere utilizzato come riferimento per lo sviluppo di soluzioni ad hoc per trasferire dati da un ambiente all'altro. La replica delle entità HBIM all'interno della base di conoscenza, formalizzata in termini di nodi, incorpora il manufatto e i suoi componenti nella struttura ontologica, permettendo agli specialisti di dominio di collegarli con altri concetti, entità (astratte e concrete), per rappresentare le informazioni necessarie alla sua documentazione e, allo stesso tempo, fornire ad ogni informazione il suo necessario contesto interpretativo.

Integrando ontologie e Building Information Modeling, è stato possibile arricchire la semantica della rappresentazione, includendo per esempio le relazioni tra i diversi componenti strutturali del manufatto nelle sue configurazioni in evoluzione (Fig. 10). Questo è un miglioramento rilevante nella rappresentazione poiché permette la possibilità di includere relazioni come adjacency, assembly-of, part-of, made-by che non possono essere formalizzate

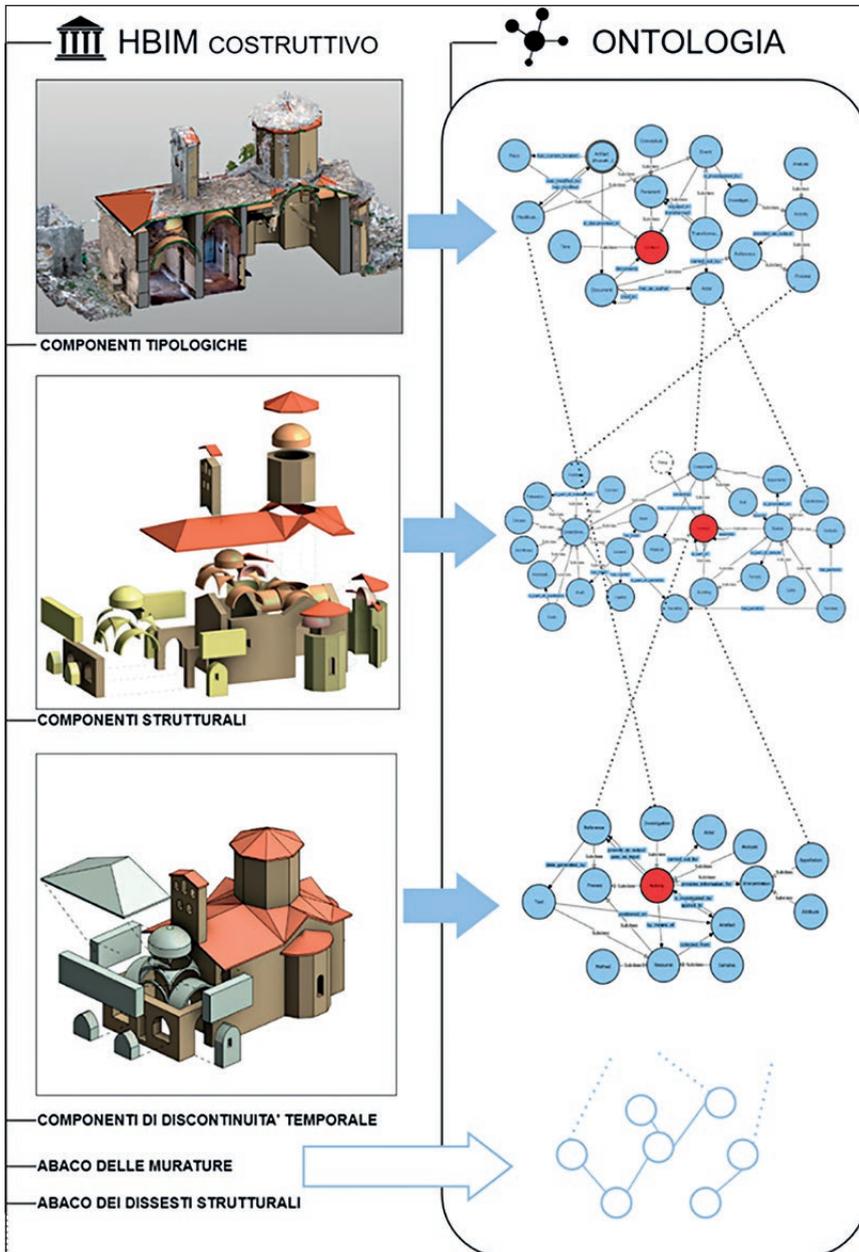


Fig. 9 – Il framework proposto, basato sull'integrazione tra un ambiente HBIM e modelli di rappresentazione ontologici per la documentazione completa dell'edificio (BHiLAB - CNR ISPC).

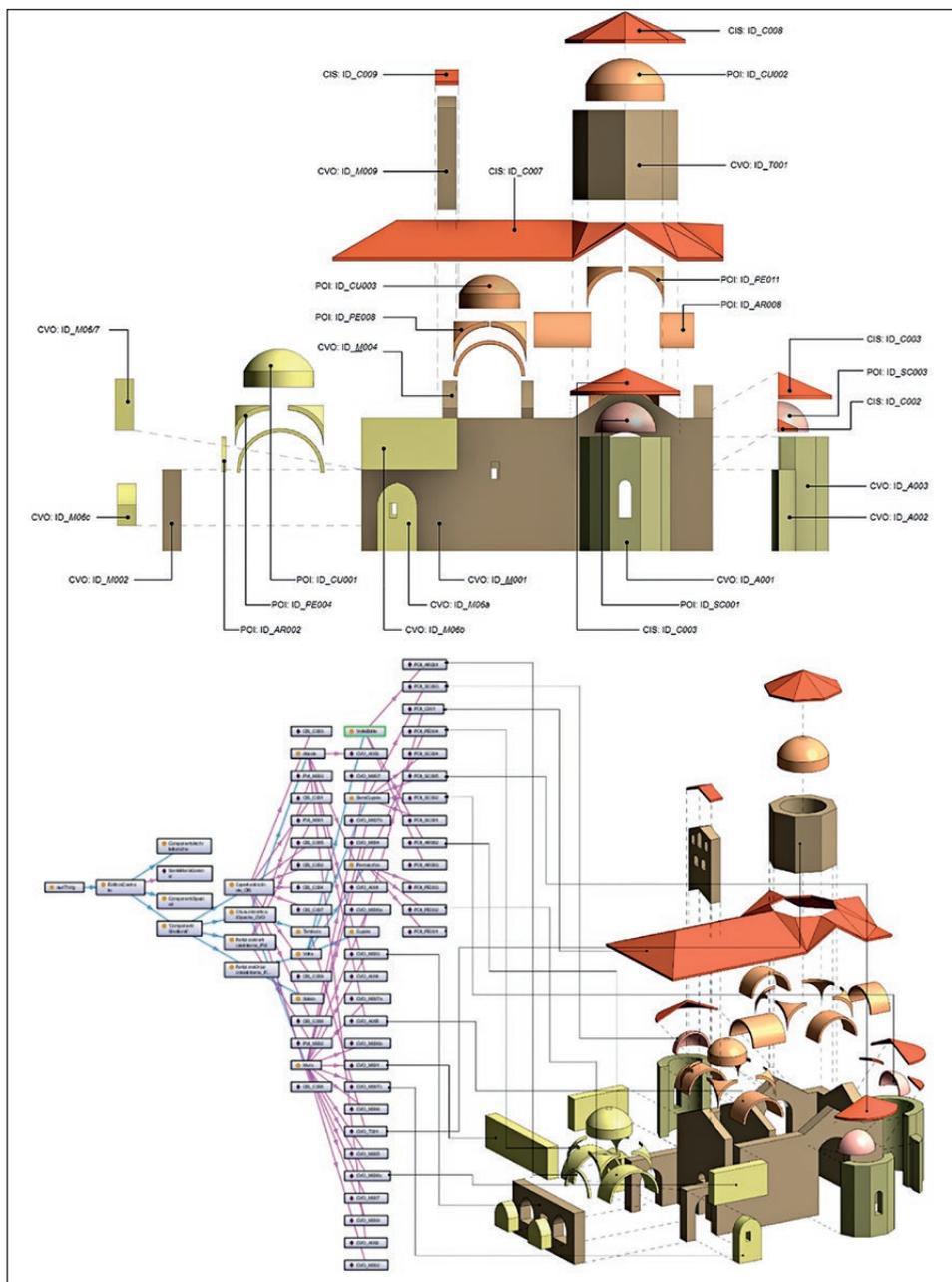


Fig. 10 – L'adozione delle ontologie per arricchire la semantica BIM formalizza la conoscenza relativa alle componenti strutturali dell'edificio (BHiLAB - CNR ISPC).

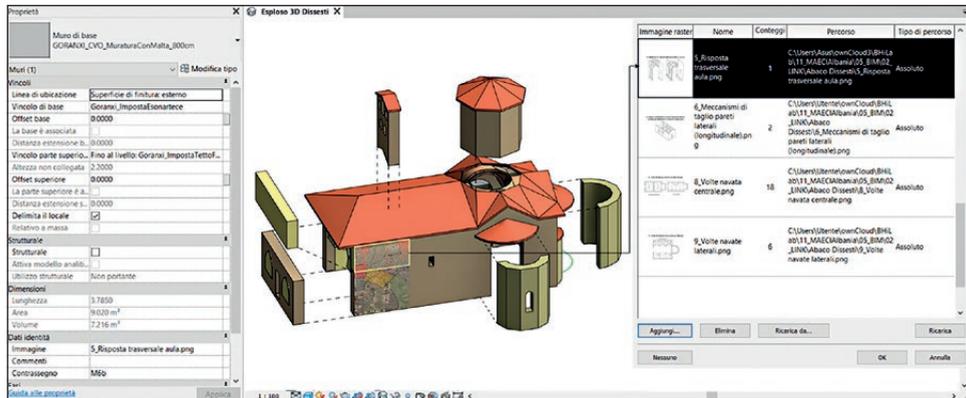


Fig. 11 – Rappresentazione dei dissesti strutturali: modello HBIM e mappatura delle componenti soggette a meccanismi di dissesto (BHiLAB - CNR ISPC).

attraverso lo schema di rappresentazione BIM, essenzialmente basato sulle relazioni *is-a* tra famiglie e istanze.

Alla luce di queste definizioni, la modellazione della chiesa di S. Maria in Goranxi ha mirato a sviluppare un modello HBIM geometrico e informativo (utilizzando il software BIM proprietario Autodesk Revit) coerente con la ricostruzione tecnico-costruttiva derivata dall'analisi dell'edificio e formalizzata nei grafi di conoscenza. La complessità delle geometrie della maggior parte degli elementi costruttivi e tecnici dell'edificio ha necessariamente implicato un compromesso tra la semplificazione della rappresentazione geometrica, adeguando il grado di aderenza alla realtà ad un livello sufficiente per questo livello della ricerca e il valore informativo e parametrico degli oggetti utilizzati.

Ad esempio, nel caso studio in esame, gli studi e le indagini sulle fasi storiche dell'edificio hanno permesso la più accurata individuazione del sistema murario principale e delle trasformazioni subite nel tempo, nonché delle tecniche costruttive e delle tipologie murarie. Pertanto, considerando il tradizionale flusso di lavoro dell'analisi costruttiva, sono state effettuate prima l'analisi dei componenti di discontinuità temporale e lo studio murario, fornendo informazioni relative a tutte le azioni che hanno contribuito all'attuale configurazione del muro; a seguire l'individuazione dei dissesti strutturali. Come mostrato nella Fig. 11, l'approccio proposto permette di formalizzare in modo completo la conoscenza relativa agli abachi dei dissesti fornendo sia la rappresentazione geometrica che le informazioni non geometriche in modo integrato e calcolabile.

E.G., L.C., G.C.

6. CONCLUSIONI

Questo documento riporta una procedura efficace per ottenere modelli costruttivi intelligenti 3D per la documentazione completa degli edifici storici, capaci di evidenziarne le criticità strutturali, le stratigrafie murarie con le relazioni costruttive degli oggetti edilizi e la loro distribuzione spaziale. Il framework proposto, basato sull'integrazione tra un ambiente HBIM e modelli di rappresentazione ontologici, viene applicato alla rappresentazione di alcuni domini di conoscenza del patrimonio ritenuti determinanti, ovvero le unità tipologiche, le componenti strutturali, le componenti di discontinuità temporale, l'abaco delle murature e quello dei dissesti strutturali. A questo scopo il framework operativo del metodo che è stato messo a punto si è sviluppato preliminarmente con una campagna di rilievi diretti per raccogliere in maniera sistematica ed esperta notazioni critiche e grafiche approfondite, su dissesti, quadro fessurativo, confronti ed effetti dei carichi, un insieme di strumenti critici formalizzati nei grafi di conoscenza.

Successivamente, per costruire i modelli 3D, il protocollo ha previsto il rilievo geomatico con sistemi integrati di fotogrammetria aerea, fotogrammetria terrestre e scansione laser con tecnologia SLAM, e orientamento globale realizzato con stazioni GPS. Attraverso il passaggio Scan-to-Bim si è passati dal modello digitale reality-based al "modello interpretativo/ricostruttivo" in HBIM, semplificato per rappresentare il comportamento reale delle strutture. Bisogna considerare che data la complessità delle geometrie degli elementi costruttivi, delle loro deformazioni e dei cinematismi presenti, la modellazione parametrica con il software BIM Autodesk Revit, pur nella semplificazione della rappresentazione geometrica, ha mantenuto una adeguata aderenza alla realtà e al valore informativo e parametrico degli oggetti utilizzati. Nel modello basato su ontologie, la formalizzazione delle informazioni è stata effettuata con la trasposizione dell'insieme delle istanze che compongono il modello dell'edificio.

ELENA GIGLIARELLI*, GIOVANNI CANGI, LUCIANO CESSARI

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale - CNR

elena.gigliarelli@cnr.it, giovanni.cangi@ispc.cnr.it, luciano.cessari@ispc.cnr.it

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'Istituto dei Monumenti Culturali di Tirana (IKTK), in particolare Joli Mitrojorgij e Marsela Pliku, per avere messo a disposizione la documentazione e la loro conoscenza dei siti e dei luoghi, oltre all'appoggio logistico, e Romir Mazari per il contributo al rilievo da drone. Un ringraziamento a Michele Calvano dell'ISPC per il lavoro di acquisizione e processamento dei dati per quanto attiene alla fotogrammetria e per rilievi SLAM e da drone ad Alban Gorreja e Awal Rahali del GAP di Univpm, coordinato dalla Prof.ssa Malinverni. Grazie anche a Stefano Corsi dell'ISPC per il contributo alla integrazione del modello BIM con una struttura ontologica.

* Corresponding Author.

BIBLIOGRAFIA

- ADAMI A., BRUNO N., ROSIGNOLI O., SCALA B. 2020, *HBIM for planned conservation: A new approach to information management*, in *Proceedings of the 23rd International Conference on Cultural Heritage and New Technologies (Vienna 2018)* (https://archiv.chnt.at/ebook_chnt23_adami/).
- BANFI F., BRUMANA R., LANDI A.G., PREVITALI M., RONCORONI F., STANGA C. 2022, *Building archaeology informative modelling turned into 3D volume stratigraphy and extended reality time-lapse communication*, «Virtual Archaeology Review», 13, 26, 1-21 (<https://doi.org/10.4995/var.2022.15313>).
- BANFI F., BRUMANA R., STANGA C. 2019, *Extended reality and informative models for the architectural heritage: from scan-to-BIM process to virtual and augmented reality*, «Virtual Archaeology Review», 10, 21, 14-30 (<https://doi.org/10.4995/var.2019.11923>).
- BELTRAMO S., DIARA F., RINAUDO F. 2019, *Evaluation of an integrative approach between HBIM and architecture history*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W11, 225-229 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-225-2019>).
- BERNARDELLO R.A., BORIN P., PANAROTTO F., GIORDANO A., VALLUZZI M.R. 2020, *BIM representation and classification of masonry pathologies using semi-automatic procedure*, in *Brick and Block Masonry - From Historical to Sustainable Masonry*, London, CRC Press, 771-778.
- BIANCHINI C., SENATORE L.J., CATENA L. 2019, *The democratization of processes and the use of remotely guided acquisition tools for Survey 2.0*, «disegno», 67-78 (<https://doi.org/10.26375/diseigno.4.2019.08>).
- BONELLI R. 1986, *Archeologia stratigrafica e Storia dell'Architettura*, «Architettura: Storia e Documenti», 2, 5-10.
- BORIN P., BERNARDELLO R.A., GRIGOLETTO A. 2020, *Connecting historical information with BIM ontologies. HBIM methods for the visualization of Harris Matrix for the Torrione in Carpi*, in L. AGUSTÍN-HERNÁNDEZ, A. VALLESPÍN MUNIESA, A. FERNÁNDEZ-MORALES (eds.), *Graphical Heritage. EGA 2020*, Graphical Heritage, 5, Cham, Springer International Publishing, 757-770 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-47979-4_65).
- BRUMANA R., BANFI F., CANTINI L., PREVITALI M., DELLA TORRE S. 2019, *HBIM level of detail-geomety-accuracy and survey analysis for architectural preservation*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W11, 293-299 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-293-2019>).
- BRUNO S., DE FINO M., FATIGUSO F. 2018, *Historic Building Information Modelling: Performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management*, «Automation in Construction», 86, 256-276 (<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.009>).
- CARBONARA G. 1996, *Trattato di restauro architettonico*, 2, Torino, UTET.
- CHIABRANDO F., LO TURCO M., RINAUDO F. 2017, *Modeling the decay in an HBIM starting from 3D point clouds. A followed approach for cultural heritage knowledge*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W5, 605-612 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-605-2017>).
- CLINI P., QUATTRINI R., NESPECA R., ANGELONI R., MAMMOLI R. 2020, *Digital facsimiles of architectural heritage: New forms of fruition, management and enhancement. The exemplary case of the Ducal Palace at Urbino*, in L. AGUSTÍN-HERNÁNDEZ, A. VALLESPÍN MUNIESA, A. FERNÁNDEZ-MORALES (eds.), *Graphical Heritage. EGA 2020*, Graphical Heritage 1, Cham, Springer International Publishing, 571-582.
- CURRÀ E., D'AMICO A., ANGELOSANTI M. 2021, *Representation and knowledge of historic construction: HBIM for structural use in the case of Villa Palma-Guazzaroni in Terni*, «TEMA, Technologies Engineering Materials Architecture», 7, 8-20 (<https://doi.org/10.30682/tema0701b>).

- DIARA F., RINAUDO F. 2018, *Open source HBIM for cultural heritage: A project proposal*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2, 303-309 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-303-2018>).
- DIARA F., RINAUDO F. 2020, *IFC classification for FOSS HBIM: Open Issues and a schema proposal for Cultural Heritage assets*, «Applied Sciences», 10, 23, 8320 (<https://doi.org/10.3390/app10238320>).
- DORÉ C., MURPHY M., MCCARTHY S., BRECHIN F., CASIDY C., DIRIX E. 2015, *Structural simulations and conservation analysis -Historic Building Information Model (HBIM)*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XL-5/W4, 351-357 (<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-351-2015>).
- DPCM 2008, *DPCM Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri. Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008*, Pubblicata sul supplemento ordinario n. 54 alla Gazzetta Ufficiale Serie generale-n. 47 del 26.2.2011.
- GARAGNANI S. 2013, *Building Information Modeling and real world knowledge: A methodological approach to accurate semantic documentation for the built environment*, in *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 1, 489-496 (<https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743788>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., GRUŠKA B. 2016, *ArchaeoBIM: AN innovative method for archaeological analysis of an Etruscan temple in Marzabotto*, in *Arqueológica 2.0. 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation*, València, Editorial Universitat Politècnica de València, 314-317 (<https://doi.org/10.4995/arqueologica8.2016.4479>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., MOSCATI P., GAIANI M. 2021, *ArchaeoBIM. Theory, Processes and Digital Methodologies for the Lost Heritage*, Bologna, Bononia University Press.
- GIAKOURIS K. 2002, *The Monasteries of Jorgucat and Vanishte in Dropull and of Spelaio in Lunxheri as Monuments and Institutions during the Ottoman Period in Albania (16th-19th centuries)*, PhD Thesis, Birmingham, University of Birmingham.
- GIGLIARELLI E., CESSARI L., CALCERANO F., MARTINELLI L. 2020, *Valutazione della vulnerabilità Sismica attraverso l'integrazione di tecniche tradizionali e sistemi BIM*, in L. CARAVAGGI (ed.), *Progetto SISMI-DTC Lazio conoscenze e innovazioni per la ricostruzione e il miglioramento sismico dei centri storici del Lazio*, Studio. Città e paesaggio. Album, Macerata, Quodlibet, 186-192.
- HERMAN G.V., CACIORA T., ILIES D.C., ILIES A., DEAC A., STURZA A., SONKO S.M., SUBA N.S., NISTOR S. 2020, *3D Modeling of the cultural heritage: between opportunity and necessity*, «Journal of Applied Engineering Sciences», 10, 27-30 (<https://doi.org/10.2478/jaes-2020-0005>).
- LOGOTHETIS S., DELINASIΟΥ A., STYLIANIDIS E. 2015, *Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review*, «ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W3, 177-183 (<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015>).
- LÓPEZ F.J., LERONES P.M., LLAMAS J., GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO J., ZALAMA E. 2017, *A framework for using Point Cloud Data of heritage buildings toward geometry modeling in a BIM Context: A case study on Santa Maria La Real De Mave Church*, «International Journal of Architectural Heritage», 11, 965-986 (<https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1325541>).
- MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S. 2009, *Historic Building Information Modelling (HBIM)*, «Structural Survey», 27, 311-327 (<https://doi.org/10.1108/02630800910985108>).
- ORENI D., BRUMANA R., GEORGOPOULOS A., CUCA B. 2014, *HBIM library objects for conservation and management of built heritage*, «International Journal of Heritage in the Digital Era», 3, 321-334 (<https://doi.org/10.1260/2047-4970.3.2.321>).
- PACI E. 1966, *Fenomenologia e architettura contemporanea*, in *Relazioni e Significati*, 3, Milano, Lampugnani Nigri, 172-202.

- PEPE M., COSTANTINO D., RESTUCCIA GAROFALO A. 2020, *An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds*, «Applied Sciences», 10 (<https://doi.org/10.3390/app10041235>).
- POCOBELLI D.P., BOEHM J., BRYAN P., STILL J., GRAU-BOVÉ J. 2018, *BIM for heritage science: A review*, «Heritage Science», 6, 30 (<https://doi.org/10.1186/s40494-018-0191-4>).
- QUATRINI R., PIERDICCA R., MORBIDONI C. 2017, *Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web*, «Journal of Cultural Heritage», 28, 129-139 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.004>).
- ROLIN R., ANTALUCA E., BATOZ J.-L., LAMARQUE F., LEJEUNE M. 2019, *From point cloud data to structural analysis through a geometrical HBIM-oriented model*, «Journal on Computing and Cultural Heritage», 12, 2, 26 (<https://doi.org/10.1145/3242901>).
- SIMEONE D., CURSI S., ACIERNO M. 2019, *BIM semantic-enrichment for built heritage representation*, «Automation in Construction», 97, 122-137 (<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.004>).
- TAFURI M. 1968, *Teorie e storia dell'architettura*, Torino, Einaudi.
- TRIZIO I., SAVINI F., GIANNANGELI A., BOCCABELLA R., PETRUCCI G. 2019, *The archaeological analysis of masonry for the restoration project in HBIM*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W9, 715-722 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-715-2019>).
- TUCCI G., BONORA V., COSTANTINO F., OSTUNI D. 2004, *Metodi di rilievo tridimensionale a confronto: affidabilità metrica e capacità descrittiva*, in E.S. MALINVERNI (ed.), *E-Arcom - Tecnologie per Comunicare l'architettura. Atti Del Convegno (Ancona 2004)*, Ancona, CLUA, 553-558.
- VALERO E., FORSTER A., BOSCHÉ F., RENIER C., HYSLOP E., WILSON L. 2018, *High level-of-detail BIM and machine learning for automated masonry wall defect surveying*, in J. TEIZER (ed.), *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Taipei, Taiwan, International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 740-747 (<https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0101>).
- VOLK R., STENDEL J., SCHULTMANN F. 2014, *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs*, «Automation in Construction», 38, 109-127 (<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>).
- ZUCCARO G., CACACE F., RAUCI M. 2011, *MEDEA: A multimedia and didactic handbook for structural damage and vulnerability assessment- L'Aquila case study*, in L. BRAGANÇA, H. KOUKARI, R. LANDOLFO, V. UNGUREANU, E. VESIKARI, O. HECHLER (eds.), *Integrated Approach to Life-Time Structural Engineering - Summary Report of the Cooperative Activities of COST Action C25*, 2, Malta, University of Malta, 201-213.

ABSTRACT

The architectural survey for the restoration of a monument is closely linked to the conservation objectives, the research methodology, and the application of multiple direct and indirect investigation techniques for the construction of adequate geometric and informative models. In particular, the paper aims to understand and evaluate a building from its structural characteristics, developing a methodology that, from the geometric survey, deconstructs the building itself into elements and articulates them in a HBIM platform, which integrates a set of five semantic models representing the architectural components and construction abaci. The approach applies this survey method and modelling workflow to the study of some post-Byzantine monasteries in Albania with a focus on the structural conditions of the church of S. Maria in Goranxi that presents problems of instability due to phases of expansion and over construction.

