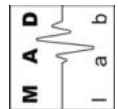


H-BI(M)ON

Heritage - Building Information Modelling/MONitoring

Dalla realtà al modello e ritorno

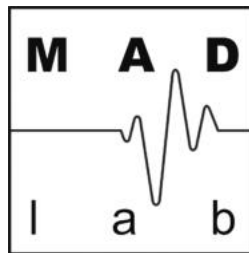


MADlab

Monitoraggio Analisi e Diagnosi del costruito

a cura di
Federica Ottoni e Nazarena Bruno

EDIZIONI
QUASAR



MADlab

Monitoraggio Analisi e Diagnosi del costruito

Direttore

Federica Ottoni
Università di Parma

Comitato scientifico

Gianni Bartoli
Università di Firenze

Carla Bartolomucci
Università dell'Aquila

Patrizia Bernardi
Università di Parma

Michele Betti
Università di Firenze

Carlo Blasi
già Università di Parma

Oronzo Brunetti
Università di Napoli Federico II

Jean-François Cabestan
Université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne

Rosario Ceravolo
Politecnico di Torino

Eva Coïsson
Università di Parma

Adalgisa Donatelli
Sapienza - Università di Roma

Daniele Ferretti
Università di Parma

Francesco Freddi
Università di Parma

Barbara Gherri
Università di Parma

Paolo Giandebiaggi
Università di Parma

Felice Giuliani
Università di Parma

Carlo Mambriani
Università di Parma

Maria Evelina Melley
Università di Parma

Elena Michellini
Università di Parma

Silvia Monchetti
Università di Firenze

Andrea Pane
Università di Napoli Federico II

Marco Pretelli
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Mario Santana-Quintero
Carleton University

Andrea Segalini
Università di Parma

Emanuela Sorbo
Università IUAV Venezia

Andrea Spagnoli
Università di Parma

Cecilia Surace
Politecnico di Torino

Grazia Tucci
Università di Firenze

Chiara Vernizzi
Università di Parma

Andrea Zerbi
Università di Parma

Comitato di redazione

Sofia Celli
Politecnico di Milano

Lia Ferrari
Università di Parma

Sandra Mikolajewska
Università di Parma

Maria Parente
Università di Parma

Elena Zanazzi
Università di Parma



MADlab

Monitoraggio Analisi e Diagnosi del costruito

La collana raccoglie e diffonde i risultati di ricerche ottenuti attraverso metodi d'indagine empirico-sperimentali; metodi che, combinati a un corretto percorso di conoscenza e controllo degli edifici, garantiscono la conservazione del vasto patrimonio storico presente in Italia, in linea con la normativa per i beni culturali (DPCM 2011), allargandosi più in generale al costruito su scala architettonica.

L'approccio empirico-sperimentale per la conoscenza, il controllo e il consolidamento delle strutture storiche è basato sul contatto diretto e approfondito con la realtà fisica dell'oggetto di studio; esso, unito all'esperienza derivante dalla secolare osservazione di edifici storici simili per tecniche costruttive e manifestazioni di danno e dissesto e al moderno monitoraggio strutturale, permette di definire in modo esaustivo l'attuale livello di sicurezza del monumento e di individuare interventi di consolidamento adeguati. A fronte di un vastissimo e ricchissimo patrimonio storico-architettonico, quale è quello italiano, per lo più in precario stato di conservazione, recentemente è stata approvata la normativa sismica che chiarisce l'importanza di una "conservazione consapevole" che trova la sua massima espressione nei "limiti degli interventi di stabilità sui monumenti, in rapporto ai problemi di tutela".

H-BI(M)ON

Heritage - Building Information Modelling/MONitoring

Dalla realtà al modello e ritorno

a cura di

Federica Ottoni e Nazarena Bruno

Il presente volume raccoglie gli esiti delle Giornate di Studio “H-BI(M)ON - Heritage Building Information Modelling / Monitoring. Dalla realtà al modello, e ritorno”, svoltesi il 30 e 31 gennaio 2025 presso l'Università di Parma e organizzate dal MADLab (DIA, UniPr), con il Patrocinio di SIRA, CIPA e UID, e con la partecipazione di ingenio e degli Ordini professionali degli Architetti e degli Ingegneri della Provincia di Parma.

Comitato Scientifico:

Marcello Balzani, Gianni Bartoli, Michele Betti, Nazarena Bruno, Donatella Fiorani, Federica Ottoni, Renata Picone, Fulvio Rinaudo, Riccardo Roncella, Grazia Tucci, Chiara Vernizzi

Comitato Organizzativo:

Federica Ottoni, Nazarena Bruno e Maria Parente (coordinamento)

Rafaela Borsato Belo, Massimo Cotti, Francesca De Cola, Virginia Droghetti, Lia Ferrari, Yuxin Lei, Luca Leoni, Sandra Mikolajewska, Elena Zanazzi

Progetto grafico/editor: Maria Parente

ISBN 978-88-5491-737-8

Roma 2026

Edizioni Quasar di S. Tognon srl

via Ajaccio 41-43, I-00198 Roma

www.edizioniquasar.it

INDICE

PREMESSA

Federica Ottoni, Nazarena Bruno	13
Dalla realtà al modello, e ritorno.	
Una introduzione (e una spiegazione)	

INTRODUZIONE

Fulvio Rinaudo	17
La documentazione del patrimonio culturale	

SEZIONE I | QUESTIONI SEMANTICHE E OPEN BIM

Nazarena Bruno	31
Dalla realtà al modello. Il disegno ragionato della complessità	

CONTRIBUTI

Donatella Fiorani, Silvia Cutarelli, Marta Acierno	37
Dalla modellazione BIM alla formalizzazione del CPM	

Antonella di Luggo, Simona Scandurra, Emanuela Lanzara	55
Open BIM per la documentazione e la valorizzazione del patrimonio culturale	

Filippo Diara	75
HBIM <i>open source</i> e OpenAI: Revisioni e nuove analisi sull'integrazione dei <i>Large Language Models</i> (LLMs)	

SEZIONE II | GESTIONE DELLE INFORMAZIONI PER LA CONSERVAZIONE PROGRAMMATA

Chiara Vernizzi	97
Modellazione informata e conservazione programmata. Nuovi approcci nella gestione integrata del progetto di salvaguardia del costruito	

CONTRIBUTI

Andrea Adami, Barbara Scala	103
L'Arco di Augusto ad Aosta. Dal progetto HBIM al cantiere	

Andrea Adami, Luigi Fregonese, Olga Rosignoli, Daniele Treccani Modellazione e gestione integrata dei dati per la conservazione. Il modello HBIM federato e <i>multilayer</i> per il pavimento della Basilica del Santo Sepolcro	119
Federica Maietti Documentazione integrata e gestione informativa del patrimonio. Scenari di innovazione per un H-BIM adattivo	139
Francesco Fassi, Cristiana Achille Il Duomo di Milano: dal rilievo alla gestione innovativa dei dati e delle informazioni	159
Rita Vecchiattini, Margherita Valentini Sviluppo di un metodo per la stima e la valutazione dei fenomeni di degrado attraverso l'utilizzo dell'HBIM	179
Giovanni Bruschi, Francesco Coschino, Antonio Fornaciari Il modello informativo per la documentazione digitale delle attività di scavo archeologico. Applicazioni sul sito della Pieve di San Cassino in Galliciano	199

SEZIONE III | QUESTIONI STRUTTURALI E MONITORAGGIO

Federica Ottoni	223
L'elefante e la sua proboscide, o anche dei gemelli (diversi) digitali. Sulla modellazione strutturale, l'astrazione e la 'somiglianza' alla realtà	

CONTRIBUTI

Luca Sbrogiò, Maria Rosa Valluzzi	229
Un approccio HBIM basato su IFC per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici storici	

Grazia Tucci, Lidia Fiorini, Alessandro Conti, Michele Betti, Silvia Monchetti	247
Modellazione e gestione integrata dei dati per la conservazione	

Giovanni Castellazzi, Antonio Maria D'Altri, Stefano de Miranda, Francesco Ubertini	261
Dalla nuvola alla struttura: modelli FE e BIM per la conservazione degli edifici storici	

Maria Parente, Nazarena Bruno, Federica Ottoni	273
Della realtà e del suo doppio, attraverso il monitoraggio: per un possibile 'gemello digitale' della cupola di Santa Maria del Fiore	

Luigi Barazzetti, Mattia Previtali, Fabio Roncoroni 301
Visualizzazione ed elaborazione dei dati di monitoraggio strutturale
mediante *space-time cube*

Carlo Biagini 315
Approcci BIM-based per la gestione informativa dei ponti storici

Rosario Ceravolo, Valeria Cavanni, Stefania Coccimiglio, 335
Alessio Crocetti, Gaetano Miraglia
Modelli predittivi per il patrimonio architettonico.
Assimilazione dei dati di monitoraggio e *transfer learning*

CONCLUSIONI

Donatella Fiorani 359
Digitalizzazione e conoscenza per il restauro.
Per una rivoluzione nella continuità

APPROCCI BIM-BASED PER LA GESTIONE INFORMATIVA DEI PONTI STORICI

Carlo Biagini

Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura

Introduzione

Periodicamente, gravi fatti di cronaca riportano all'attenzione dell'opinione pubblica l'importanza sociale di una efficiente gestione del patrimonio costruito sia privato che pubblico. Per questo lo studio di metodologie in grado di classificare, gestire e archiviare l'elevata quantità di dati storici su differenti tipologie di manufatti diviene centrale nella prevenzione e nella programmazione delle attività manutentive delle opere. Anche per gli enti gestori di ponti e infrastrutture, questi al pari di qualsiasi altro manufatto, rappresentano *asset* inevitabilmente soggetti a fenomeni di degrado, riconducibili sia a fattori ambientali esterni, sia al naturale invecchiamento dei materiali costitutivi. Tale processo di deterioramento può tuttavia essere monitorato per consentire interventi tempestivi e mirati, riducendo così il rischio di eventi di natura catastrofica.

A tal fine, l'impiego di un *Asset Management System* (AMS), quale strumento in grado di raccogliere, organizzare e rendere immediatamente disponibili le informazioni attraverso veloci interrogazioni, consente di migliorare la gestione del rischio, supportando processi decisionali più rapidi ed efficaci, anche in tempo reale. A ciò si aggiunga il contributo offerto dagli sviluppi più recenti dell'*Internet of Things* (IoT) e delle tecnologie digitali per il rilievo geospaziale dei manufatti, che hanno dotato i *facility manager* di strumenti sempre più avanzati per la raccolta dei dati e il monitoraggio degli *asset*. Tali innovazioni rafforzano la capacità di analisi dei fenomeni in atto e la conseguente definizione delle procedure operative più idonee a garantire il corretto funzionamento e la manutenzione lungo l'intero ciclo di vita dell'opera.

Negli ultimi anni la problematica ha assunto un tale rilievo da determinare nel campo delle infrastrutture la nascita di una disciplina autonoma, lo *Structural Health Monitoring* (SHM), focalizzata in particolare sul controllo dei ponti. I sistemi di ispezione attualmente in uso si basano prevalentemente su

valutazioni visive condotte da esperti, eventualmente integrate da tecniche di rilievo di base. Nei casi in cui tali riscontri risultino incompleti o ambigui, vengono svolte analisi di maggiore dettaglio, che possono sfociare in interventi manutentivi ordinari o straordinari da parte dell'ente gestore. I dati acquisiti attraverso tali procedure, destinati a costituire input per gli AMS, necessitano tuttavia di complessi processi di elaborazione.

L'introduzione di approcci basati sul *Building Information Modelling* (BIM) offre la possibilità di razionalizzare e rendere più efficiente la gestione informativa, grazie alla strutturazione di dati geometrici, alfanumerici e documentali all'interno di un *Common Data Environment* (CDE) dedicato all'*asset*. In tale contesto, alle tradizionali attività ispettive possono affiancarsi sistemi avanzati di acquisizione mediante sensoristica installata direttamente sull'opera e flussi informativi provenienti da altre reti di sensori eterogenei tipici dell'ecosistema dei *big data*. Ne consegue che il dato, elemento cardine dei processi di monitoraggio infrastrutturale, debba essere accuratamente governato in tutte le fasi – acquisizione, archiviazione, elaborazione e validazione – così da abilitare processi decisionali predittivi e l'attuazione di azioni correttive mirate nella gestione del ciclo di vita dell'opera.

In Italia a seguito del crollo del ponte Morandi nel 2018, si è sviluppato un ampio confronto tecnico-scientifico sullo stato di efficienza e sulle pratiche di manutenzione dei ponti in funzione nelle reti di trasporto italiane. La discussione ha evidenziato la necessità di definire strategie volte a colmare un ritardo culturale – più che tecnologico – presente in numerosi enti gestori, riguardante i metodi e gli strumenti impiegati per la gestione del rischio e per la valutazione della sicurezza delle infrastrutture viarie.

Nel 2020 vengono così emanate dal governo italiano le “Linee guida per la classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti” (Decreto Ministeriale n. 578/2020), riconfermate poi con successivi provvedimenti fino a tutto il 2026. Queste hanno introdotto anche l'utilizzo di tecnologie digitali per una gestione *smart* delle infrastrutture attraverso sensoristica implementata nell'ambito di sistemi SHM e la creazione di modelli BIM dei manufatti sviluppati nell'ottica di una futura costituzione dell'Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche (AINOP).

Il presente lavoro propone due casi studio, che hanno avuto quale obiettivo comune l'ottimizzazione dei processi di gestione informativa di ponti storici attraverso approcci *BIM-based*, sperimentando le potenzialità di integrazione con AMS aziendali già in uso e l'implementazione di sistemi di monitoraggio

con sensoristica IoT su piattaforme *cloud-based*. Si tratterà in particolare del ponte metallico ferroviario sul torrente Osa e del ponte stradale Toppoli sul fiume Arno.

Bridge Management System (BMS) e Building Information Modelling (BIM)

Nell'Unione Europea, la maggior parte dei ponti delle reti stradali nazionali è stata costruita negli ultimi 50 anni¹, anche se un numero significativo di ponti attualmente in uso è molto più antico, se si considerano in particolare i ponti ancora in funzione nelle linee ferroviarie storiche. Non è inoltre infrequente che questi siano soggetti a carichi che superano di gran lunga quelli previsti in fase di progettazione² e ciò può portare ad un loro significativo deterioramento³ con conseguenze, che possono variare dalla limitazione della circolazione dei veicoli a eventi disastrosi, che mettono in pericolo la vita delle persone.

Per questo motivo, i gestori delle infrastrutture stradali e ferroviarie sono alla ricerca di strategie sempre più affidabili per monitorare e prevedere il degrado dei propri *asset*, nonché per supportare processi decisionali che portino alla definizione di priorità in termini di manutenzione o rinnovo⁴. Molti di essi hanno già predisposto strutture organizzative, procedure e personale dedicati all'ispezione e alla valutazione periodica delle condizioni dei ponti e, in particolare, vengono sempre di più adottate piattaforme di *Bridge Management System* (BMS) per il loro monitoraggio.

Nelle attività di ispezione dei ponti, generalmente le principali difficoltà risiedono nell'accessibilità alle sue varie parti, sia per le caratteristiche d'uso, che per cause intrinseche alla costruzione stessa (grandi dimensioni delle pile e delle spalle, elevata altezza dell'impalcato, morfologia del terreno, ostacoli naturali, ecc.). Per questo vengono impiegati metodi e strumenti avanzati quali: piattaforme aeree *by-bridge*, fotogrammetria digitale e lidar da UAV. Grazie alle tecniche di restituzione digitale del manufatto, è infatti possibile colmare il divario informativo sulla geometria del ponte, di cui spesso non è possibile rintracciare i disegni di progetto originali e la documentazione tecnica delle modifiche apportate nel corso del tempo.

Per i rischi che corrono i ponti esistenti, in particolare quelli storici, alcuni BMS propongono metodi stocastici, che consentono di determinare un 'indice di condizione' (CR – *Conditio Ratio*) sulla base di ispezioni regolari dei ponti e dell'individuazione dei difetti degli stessi. Si tratta in generale di sistemi informativi modulari con funzioni specifiche⁵ tra cui la compilazione dell'inventario, la valutazione dello stato di conservazione, la stima dei rischi e

¹ WOODWARD *et al.* 2001.

² SABACK DE FREITAS BELLO *et al.* 2022.

³ SANTARSIERO *et al.* 2021.

⁴ EDIRISINGHE, SETUNGE, ZHANG 2012.

⁵ SABACK DE FREITAS BELLO *et al.* 2021.

dei costi di manutenzione, le previsioni di degrado, la definizione delle priorità di manutenzione, ecc.

Diversi paesi hanno sviluppato propri BMS, tuttavia la maggior parte di essi utilizza un approccio bidimensionale (2D) per registrare e memorizzare le informazioni senza visualizzazione grafica e integrazione dinamica⁶. Un approccio assistito dal BIM ha invece come obiettivo la creazione e la gestione di un modello 3D integrato con dati e informazioni utili alla gestione di uno specifico *asset* durante l'intero ciclo di vita⁷.

Nel campo del SHM è ormai prassi comune posizionare sensori sui ponti che devono essere controllati o monitorati in base a quanto emerso dalle ispezioni sugli stessi. Il tipo di sensori che possono essere installati varia a seconda del fenomeno da monitorare, ma anche in relazione al suo scopo: è possibile installare sensori diversi per il monitoraggio a breve, medio o lungo termine, oppure installare sensori in grado di inviare un allarme al raggiungimento di un determinato valore soglia. Il potenziamento delle analisi con il metodo degli elementi finiti (FEM) con dati continui dei sensori può rafforzare l'affidabilità dello studio del degrado. Più recentemente l'intelligenza artificiale (AI), in particolare il *machine learning* (ML), sta offrendo un significativo potenziale di trasformazione nel monitoraggio dello stato di salute strutturale. Le tecniche di ML automatizzano infatti il riconoscimento di pattern nei dati provenienti da sensori, aiutando il rilevamento dei difetti e la valutazione dei rischi⁸.

Negli ultimi anni l'integrazione tra tecnologie digitali e strumenti per la conservazione del patrimonio culturale ha aperto la strada ad approcci innovativi nell'analisi di strutture storiche. In particolare, l'utilizzo di modelli digitali consente di integrare dati geometrici e prestazionali, facilitando la gestione dell'operatività e manutenzione degli *asset*, ed è in linea con il concetto di *Digital Twin* derivato dalla *Smart Manufacturing*: il concetto di gemello digitale nel settore AECO è legato al *Building Information Modelling*.

Il rilevamento geometrico dei manufatti svolge un ruolo cruciale nella comprensione della loro consistenza strutturale. Le odierne tecniche di acquisizione del dato geospaziale, come la scansione laser e la fotogrammetria digitale sono ampiamente utilizzate, sia con strumenti a terra che con sistemi UAV. Questi metodi generano set di dati sotto forma di nuvole di punti (PC – *point cloud*), che richiedono poi un'ulteriore elaborazione per creare modelli informativi di edifici (*BIModel*). Questo processo è definito *Scan-to-BIM* ed è ormai ben documentato in letteratura⁹. Le nuvole di punti derivate da acquisizioni con laser-scanner e/o fotogrammetria digitale possono essere utili in diverse fasi della modellazione e del ciclo di vita di un ponte (Fig. 1):

⁶ Li et al. 2023.

⁷ KAEWUNRUEN et al. 2022.

⁸ MALEKLOO et al. 2022.

⁹ BANFI 2023.

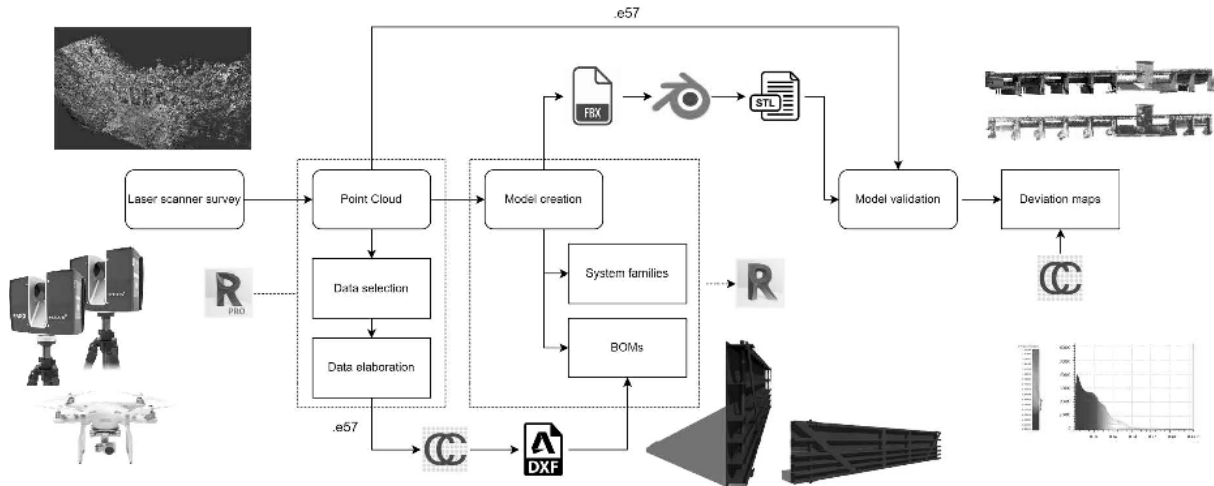


Figura 1
Workflow informativo in un processo di modellazione di un ponte storico.

- possono rappresentare lo stato di una struttura in una specifica sezione temporale;
- possono costituire la base geo-spaziale di dati per la creazione di un modello informativo;
- possono essere utilizzati per confronti con altre nuvole di punti acquisite in tempi diversi e/o con modelli informativi dell'asset esistente.

Quando si sviluppa un modello informativo di un ponte esistente, entrano in gioco diversi fattori, che influenzano fortemente il processo di modellazione. Questi includono le caratteristiche morfologiche del ponte, la facilità di accesso al ponte per la raccolta dei dati e la disponibilità della documentazione originaria di progetto (disegni, relazioni tecniche, ecc.), oltre che delle informazioni sugli interventi successivi. Tutti questi elementi hanno un impatto significativo sul modo, in cui viene creato il modello BIM del ponte e sulla sua accuratezza e completezza finale.

Con la diffusione degli strumenti e delle metodologie BIM è emersa anche la necessità di garantire un efficace ed efficiente scambio di dati tra differenti piattaforme *software*. Il modello informativo si colloca infatti al centro di una costellazione di applicazioni, configurandosi come *repository* di informazioni (geometria, materiali, gerarchie di componenti, sensoristica, ecc.) a supporto di analisi predittive e processi decisionali. In questo contesto, l'interoperabilità

e l'utilizzo di formati open source diventa il principale requisito di regolazione dei flussi informativi. Sfruttando i principi della programmazione orientata a oggetti (OOP), lo schema di dati IFC, *Industry Foundation Classes*, rappresenta oggi il modello di dati aperto e condiviso per gli scambi informativi in tutto il settore AECO. L'organizzazione buildingSMART International è impegnata ad estenderne l'applicazione a nuove aree tematiche. Con il recente rilascio della release IFC 4.3 (Fig. 2), è possibile descrivere oggi in modo coerente anche ponti e infrastrutture¹⁰.

Integrazione BIM-BMS per il ponte metallico storico sul torrente Osa

Questo caso studio¹¹ ha inteso indagare le potenzialità di un approccio *BIM-based* nell'ambito di attività di *asset-management* di un ente gestore di infrastrutture, quale RFI (Rete Ferroviaria Italiana), in relazione al monitoraggio delle condizioni di degrado dei ponti ferroviari esistenti. In particolare, sono state implementate in un ambiente BIM alcune funzionalità della piattaforma *software* di BMS, denominata D.O.M.U.S. (Diagnostica Opere d'arte Manutenzione Unificata Standard), attualmente in

10 BORIN, ZANCHETTA 2020.
11 AGLIETTI, BIAGINI, BONGINI 2024.

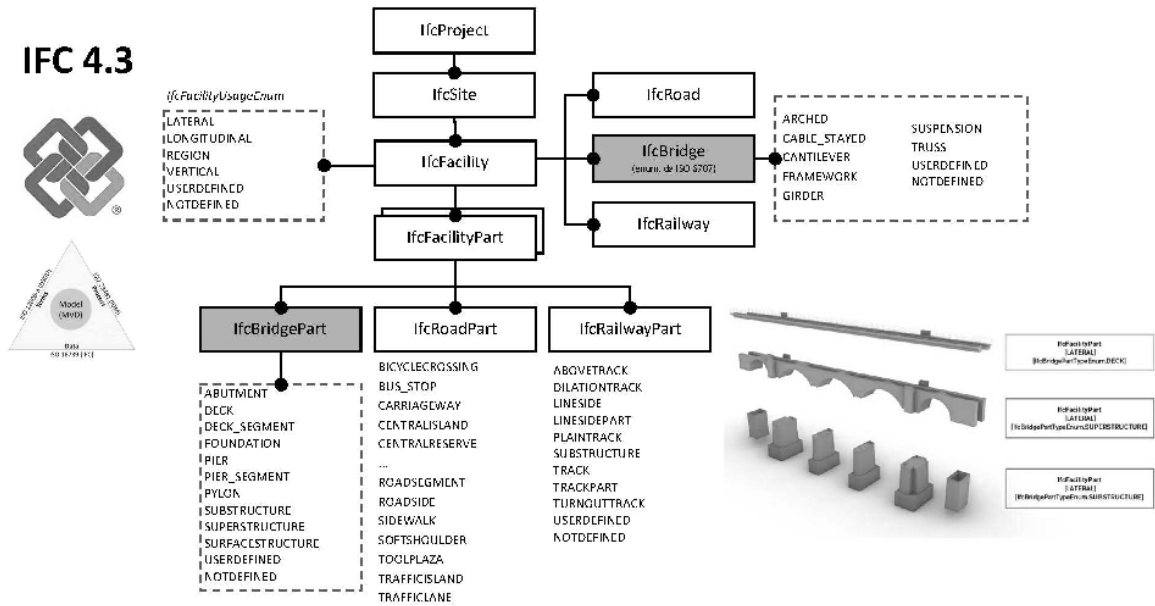
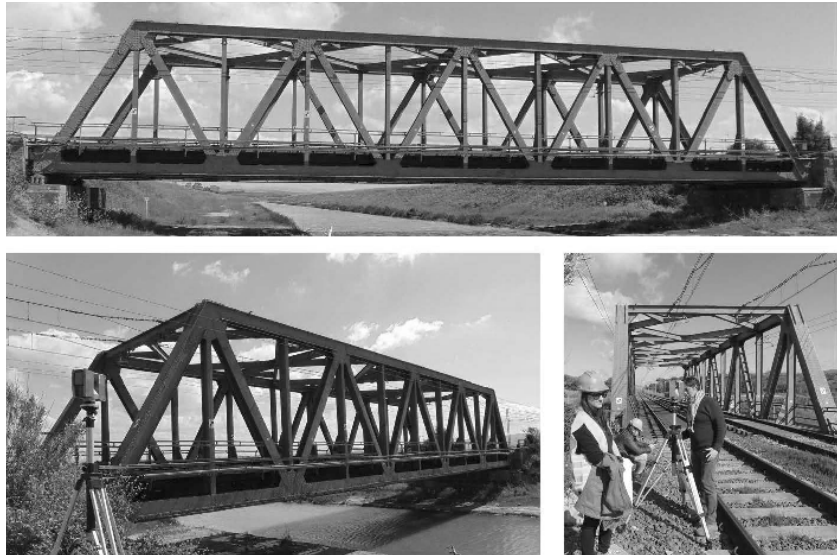


Figura 3

Il ponte ferroviario sul torrente Osa.
 Vista di insieme e della campagna di
 rilievo.



uso presso detta società. Il *software* produce tre indici, che descrivono lo stato di conservazione e le condizioni strutturali del ponte esaminato, seguendo una logica in parte conforme alle “Linee guida” italiane, che prevedono e raccomandano l’uso del BIM.

È stato analizzato un ponte ferroviario a travata metallica reticolare dei primi anni del ‘900, ancora oggi in esercizio sul torrente Osa nella tratta ferroviaria Albinia-Talamone (linea Roma-Grosseto) (Fig. 3). La sua costruzione risale ai lavori di raddoppio della linea ferroviaria per sostituire un precedente ponte ad arco con campata di 10 m. La travata ha una campata di 42 m ed è appoggiata su spalle realizzate con materiale misto di muratura e calcestruzzo. Si può osservare un’ampia varietà di componenti non riconducibili a profili metallici commerciali. Gli elementi sono costituiti dall’assemblaggio di profili ‘piatti’ secondo differenti soluzioni e presentano piastre di rinforzo aggiuntive nelle parti più sollecitate. Le unioni tra i diversi componenti sono state realizzate con piastre e chiodi rivettati a caldo. Le rotaie sono sostenute da traverse in legno.

Nella prima fase dello studio è stata condotta un’approfondita ricerca d’archivio, che ha permesso di ritrovare il progetto originale del ponte metallico, illustrato in sette tavole grafiche, che includono disegni, lavorazioni metalliche e dettagli costruttivi. Altri documenti recuperati si riferiscono alle

fasi successive di funzionamento del ponte risalenti agli anni '30 e '40, quali prove statiche, prove di carico, lavori di rinforzo delle strutture metalliche, ecc.

La campagna di rilievo è stata effettuata mediante l'utilizzo del *laser scanner* Faro Focus 3Dx330 e si è svolta esclusivamente durante intervalli di tempo, in cui non circolavano treni. Le nuvole di punti sono state acquisite in formato .fls e successivamente importate nel *software* Autodesk Recap per le procedure di allineamento delle varie scansioni.

Il processo di modellazione parametrica di un ponte ferroviario è influenzato da diversi fattori che, a seconda dei casi, possono rendere molto complessa la creazione del modello informativo. Nel caso in esame si è dovuto prestare particolare attenzione a:

- caratteristiche dell'opera: la travata metallica è composta da un assemblaggio molto articolato di numerosi singoli elementi di dimensioni assai diverse e ciò ha richiesto la definizione di specifiche procedure di modellazione rispetto ai *workflow* tipici dei processi *Scan-to-BIM*;
- disponibilità di disegni progettuali originali: la presenza di tavole grafiche con particolari esecutivi molto dettagliati ha consentito una verifica accurata e puntuale delle geometrie dei differenti elementi costruttivi;
- accessibilità del manufatto: la morfologia del ponte e i livelli di servizio dell'infrastruttura hanno condizionato in modo significativo non solo la scelta

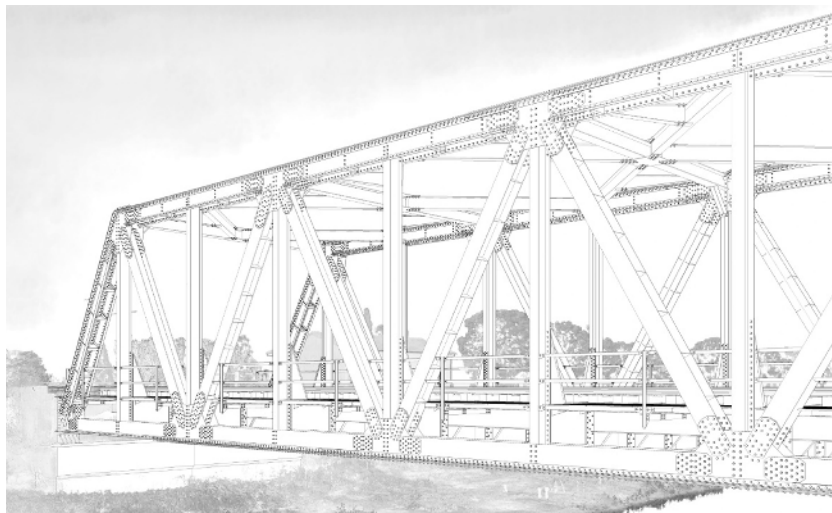


Figura 4

Modello informativo del ponte ferroviario sul torrente Osa.

delle tecniche di rilievo, ma soprattutto le procedure di acquisizione dei dati geospaziali da parte degli operatori (Fig. 4).

Il flusso di lavoro della modellazione ha tenuto conto inoltre dei criteri di segmentazione del ponte imposti dal *software* di gestione D.O.M.U.S. Pertanto il processo di creazione del modello è stato suddiviso nelle seguenti fasi:

- suddivisione logica della struttura in “elementi”, corrispondenti a quelli gestiti dal *software* D.O.M.U.S., le cui funzioni sono state successivamente implementate in ambiente BIM;
- importazione dei dati geospaziali nel *software* CloudCompare per consentire una migliore gestione e segmentazione delle nuvole di punti;
- segmentazione della nuvola di punti per ‘elemento’;
- modellazione degli elementi del ponte sulla base dei progetti originali rinvenuti (grazie al loro elevato livello di dettaglio) con parallele verifiche di misura sulla nuvola di punti per evitare errori grossolani o per completare il set di dati informativi;
- verifica e convalida del modello creato sia con la nuova nuvola di punti segmentata che con quella complessiva.

Il *software* di BIM *authoring* utilizzato è stato Autodesk Revit. Data l’unicità dei componenti del ponte, è stata creata una famiglia per ogni tipo di elemento e per ciascuno di essi è stato prodotto un report per descrivere e tracciare sinteticamente le specifiche procedure operative seguite. La travata è stata concettualmente suddivisa negli “elementi” forniti dai dati anagrafici del *software* gestionale, che in realtà non sempre sono coerenti con la logica costruttiva del manufatto. A ciascun elemento modellato sono stati assegnati i seguenti gruppi di parametri condivisi:

- (a) gruppo dati anagrafici;
- (b) gruppo dati di stato - non valorizzati in fase di modellazione ma pronti ad accogliere una valutazione delle condizioni del ponte, a seguito dell’avvio dell’algoritmo;
- (c) gruppo dati difetti - non valorizzati in fase di modellazione ma pronti ad accogliere un miglioramento in occasione di una visita ispettiva al ponte, ovvero nel momento in cui un operatore censisce un difetto riscontrato durante una visita ispettiva al manufatto.

Inoltre è stata eseguita la mappatura dei componenti del modello informativo del ponte con le seguenti classi IFC:

- tutti i componenti simili a travi sono stati convertiti in istanze *IfcBeam*;
- i profili metallici piatti sono stati tradotti in istanze *IfcPlate*;
- i bulloni sono stati classificati come istanze *IfcMechanicalFastener*;

- le spalle in muratura sono state classificate come istanze *lfcBuildingElementProxy*;

- gli appoggi sono stati trasformati in istanze *lfcBuildingElementProxy*.

Il *software* di gestione D.O.M.U.S., dispone di uno specifico *master data*, che viene utilizzato per catalogare sia le opere che i loro difetti rilevabili. Per ogni ponte oggetto di ispezione e sulla base dei difetti registrati dall'operatore sul campo, l'algoritmo del *software* calcola alcuni indici, a cui viene associata una determinata classe di difettosità del manufatto (Fig. 5).

In particolare la valutazione sullo stato di conservazione del ponte viene effettuata sulla base dei seguenti parametri:

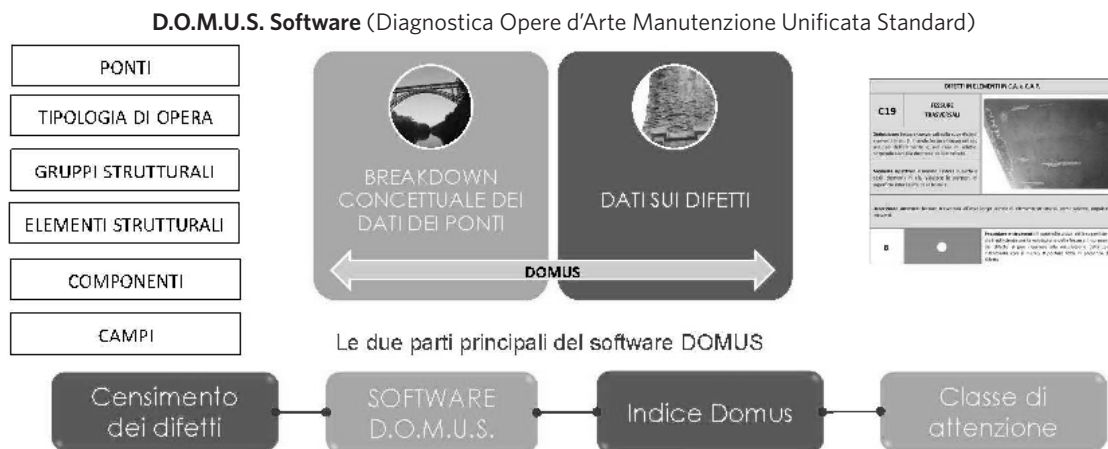
- tipo di difetto e sua importanza;
- importanza del componente strutturale danneggiato rispetto all'intera struttura;
- intensità assunta dal tipo di difetto in esame;
- estensione del tipo di difetto sul componente esaminato.

In generale, la funzione V_D per la valutazione del K_{esimo} componente è la somma dei valori dei difetti in esso riscontrati:

$$V_{Dk} = \sum_{i=1}^{N_d} B_i \times K_{1k} \times K_{2i} \times K_{3i}$$

Figura 5

Procedura per la determinazione della classe di attenzione nel software D.O.M.U.S.



dove:

V_{DK} : valore della difettosità del componente strutturale 'K'.

B_i : valore base associato a un dato difetto, che esprime i potenziali effetti del tipo di difetto 'i' sulla sicurezza e/o sulla durabilità della struttura.

K_{ik} : fattore di importanza del singolo componente sulla struttura nel suo complesso: il fattore tiene conto dell'importanza del componente su cui è stato rilevato il difetto di tipo 'i', in termini di sicurezza e influenza sulla struttura nel suo complesso.

K_{2i} : fattore di intensità della difettosità di tipo 'i': i valori specifici e i criteri descrittivi sono forniti nel catalogo dei difetti.

K_{3i} : fattore di estensione del difetto: il coefficiente rappresenta l'estensione del difetto di tipo 'i' sul componente strutturale osservato.

I valori specifici e i criteri descrittivi sono riportati nel catalogo dei difetti.

Il *software* di gestione restituisce quindi tre indici distinti:

- a) indice relativo alle condizioni generali di manutenzione;
- b) indice specifico dell'aspetto strutturale;
- c) indice predittivo.

Con questi indici il *software* è in grado di esprimere la classe di difettosità del ponte, che il gestore dell'infrastruttura poi assume per esprimere un giudizio, valutare le priorità di intervento e decidere eventuali azioni volte alla mitigazione del rischio.

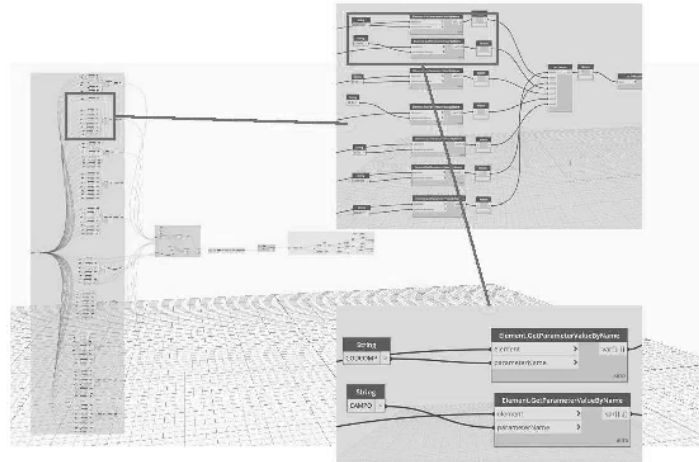
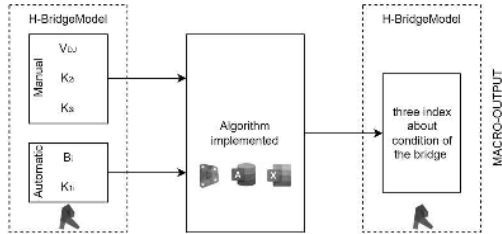
Occorre tuttavia osservare che l'approccio di D.O.M.U.S., quale BMS, presenta notevoli limitazioni nell'integrazione con i dati provenienti da altre applicazioni *software*. Non è ad esempio possibile scambiare dati provenienti da monitoraggio strumentale o da sensoristica, né da eventuali simulazioni strutturali di tipo FEM. Non vengono inoltre restituiti risultati in termini di capacità portante residua del ponte in esame. L'implementazione in ambiente BIM delle funzionalità del software D.O.M.U.S. è stata ottenuta combinando script di codice Python, sviluppati nel software di programmazione visiva (VPL) Dynamo, in collegamento con fogli di calcolo Excel e un *database* in Microsoft Access, composto da varie tabelle e numerose *query*, queste ultime scritte direttamente in linguaggio SQL.

L'algoritmo sviluppato in Dynamo identifica gruppi concatenati di nodi che abilitano funzioni specifiche (Fig. 6):

- gruppo I, interroga il modello BIM estraendone il *macro-input*;
- gruppo II, esporta il *dataset* in Excel;
- gruppo III, chiama automaticamente e fa funzionare Excel e Access;
- gruppo IV, legge e importa i dati elaborati esternamente;

Flusso dei dati per il calcolo di CR (conditio ratio)

- *Indice di condizione generale manutenzione*
- *Indice specifico dell'aspetto strutturale*
- *Indice predittivo*



- gruppo V, riporta i risultati ottenuti, ovvero i *macro-output*, nei campi appropriati dei vari elementi.

Gli input dell'algoritmo implementato sono i parametri descrittivi dei difetti riscontrati durante l'ispezione del ponte: $V_{D1'}$, $K_{21'}$, $K_{31'}$.

I macro-risultati del caso di studio sono i tre indici di giudizio precedentemente espressi dal *software* D.O.M.U.S. Con le nuove funzionalità gestionali sviluppate nell'ambiente BIM, il *facility manager*, che ha effettuato un sopralluogo di ispezione su un ponte, potrà eseguire le seguenti procedure: 1) rilevare tutti i difetti riscontrati sui vari elementi direttamente nell'ambiente BIM. Questa operazione può essere effettuata sia in ufficio al ritorno dalla visita, sia in loco se si dispone dell'apposito *device*;

- 2) eseguire l'algoritmo con Dynamo;
- 3) leggere i tre indici calcolati direttamente nell'ambiente BIM.

Verso il *Digital Twin* del ponte stradale Toppoli sul fiume Arno

Questo caso studio¹² ha sperimentato un *workflow* operativo e replicabile per la creazione di un modello informativo di un ponte esistente in grado di interagire con i dati provenienti dal mondo reale tramite sensori IoT con l'obiettivo di un sostanziale miglioramento della gestione informativa di tale *asset* durante tutto il suo ciclo di vita in una prospettiva di *Digital Twin* (Fig. 7). La ricerca ha preso avvio nel periodo di sperimentazione della metodologia

Figura 6

Implementazione di funzionalità D.O.M.U.S. in ambiente BIM. Flusso dei dati per la determinazione della 'classe di attenzione' attraverso il calcolo di CR (conditio ratio) con algoritmo sviluppato in VPL con il software Dynamo integrato nella piattaforma Autodesk Revit.

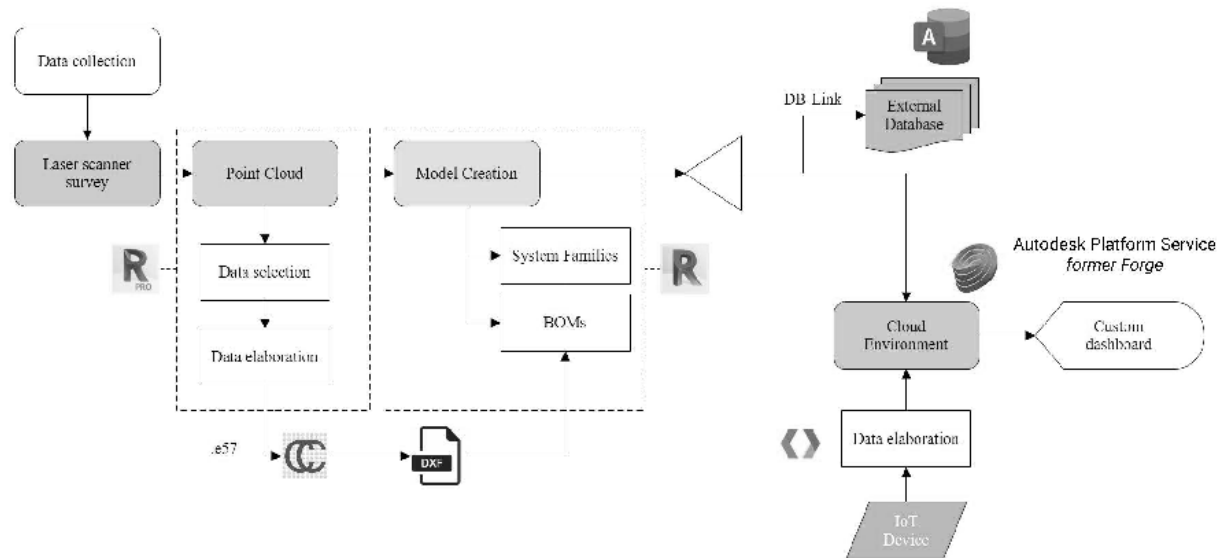
13 La sperimentazione della metodologia multilivello si è svolta nel 2019 nell'ambito di un Accordo di Collaborazione tra Regione Toscana e Federazione Regionale degli Ordini degli Ingegneri della Toscana avente per titolo "Analisi speditiva ed esame visivo dei ponti prioritari", con la collaborazione del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze e il Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Pisa.

Figura 7

Mappatura del processo di implementazione di gestione informativa di un asset esistente e flusso dei dati in ambiente BIM-based orientato al Digital Twin.

multilivello per l'analisi speditiva dei ponti¹³, adottata poi nelle Linee Guida, ed ha avuto come esempio applicativo il ponte stradale Toppoli sul fiume Arno lungo la Strada Provinciale 64 di Arezzo presso Bibbiena. Il ponte risale agli inizi del '900 e fu costruito con l'impiego di tecniche costruttive tradizionali. La struttura è costituita da una solida apparecchiatura muraria con una doppia campata ad arco. Ciascun arco ha una lunghezza di 19,60 m, un'altezza di 3,00 m e una larghezza di 5,00 m. I pilastri e le spalle sono realizzati in muratura di pietra squadrata, mentre gli archi sono in muratura di mattoni. Intorno agli anni '60, venne realizzato un ampliamento della piattaforma stradale, che fu portata a circa 7,50 m di larghezza mediante due solette a sbalzo dal corpo centrale in muratura del ponte (Fig. 8).

In una prima fase è stata condotta una accurata ispezione visiva del ponte, che è stata registrata in una scheda di rilievo dei difetti riscontrati nel manufatto per ciascun elemento costituente (spalle, pile, impalcato, ecc.), seguendo le procedure previste dell'analisi multilivello. È stato quindi seguito un processo *Scan-to-BIM* per la generazione del modello informativo del ponte. La campagna di acquisizione dei dati geospaziali è stata effettuata con scanner laser, producendo nuvole di punti da utilizzare in fase di modellazione. Non sono stati rinvenuti documenti d'archivio relativi al progetto originale.



**Figura 8**

Il ponte stradale Toppoli sul fiume Arno. Vista di insieme e di dettaglio.

Il modello BIM è stato realizzato, utilizzando ove possibile ‘famiglie di sistema’ e creando ‘famiglie caricabili’ personalizzate per rappresentare specifici componenti. Un aspetto rilevante del processo di modellazione è stato infatti quello di aderire alla struttura di classificazione introdotta dal documento tecnico CNR-DT 213/2015¹⁴ per i componenti dei ponti in muratura. Per modellare gli oggetti, la nuvola di punti è stata segmentata in varie porzioni mediante il *software* open source CloudCompare, importate poi in formato .dxf nell’editor di famiglie, per poter poi procedere alla creazione dei singoli componenti.

Sono stati quindi aggiunti al modello informativo una serie di parametri condivisi associati alle singole famiglie, corrispondenti a quelli riportati nelle schede dei difetti utilizzate nell’analisi speditiva sui ‘ponti prioritari’ organizzata dalla Regione Toscana. La componente geometrica del modello è stata quindi validata rispetto ai dati geospaziali acquisiti nel rilievo con scanner laser, utilizzando ancora il *software* CloudCompare. Ciò ha permesso di ‘certificare’ il modello geometrico, dichiarando il livello di accuratezza (LOA)¹⁵ raggiunto da ciascun oggetto componente il ponte stradale Toppoli (Fig. 9).

Conclusa la fase di modellazione, è stata condotta una sperimentazione di gestione dei dati e delle informazioni raccolte nel modello BIM attraverso

14 CNR-DT 213/2015: “Istruzioni per la Valutazione della Sicurezza Strutturale di Ponti Stradali in Muratura”.

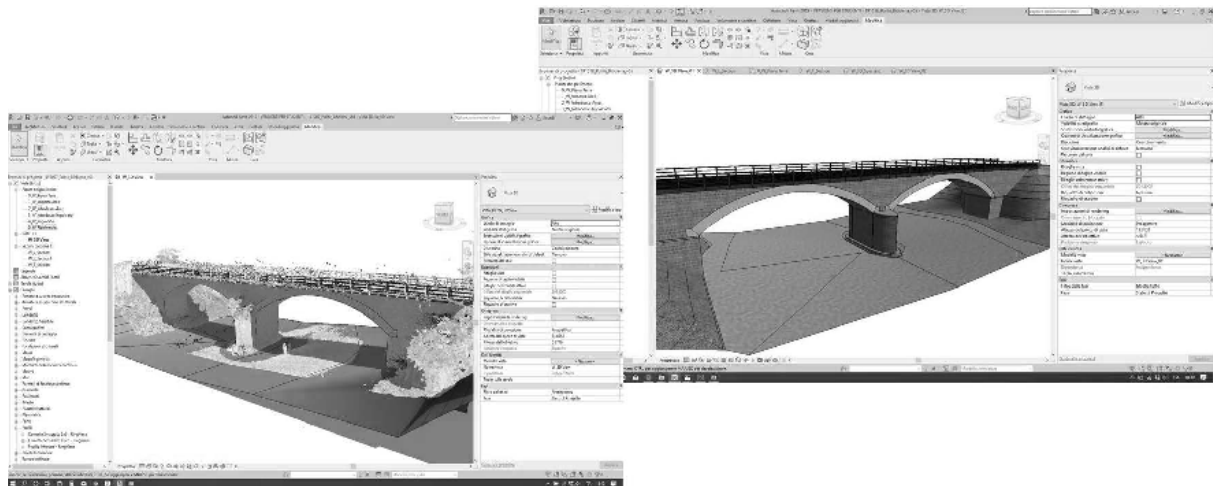
15 USBID 2019: U.S. Institute of Building Documentation: “USBID Level of Accuracy (LOA) Specification Guide”. 2019.

due differenti approcci di *data management*: nel primo caso è stata prevista l'esportazione dei contenuti informativi del modello all'interno di un *software* specifico per la gestione di *database*; nel secondo caso si è utilizzato una piattaforma *cloud-based* per la gestione di modelli BIM da interconnettere e alimentare con dati eterogenei provenienti in tempo reale da diverse tipologie di sensori dislocati nell'ambiente fisico.

1) In questo approccio è stata proposta una gestione di dati e informazioni attraverso la creazione di uno RDBMS (*Relational Database Management System*) esterno. I contenuti informativi presenti del modello BIM del ponte vengono esportati verso il *software* Microsoft Access tramite l'applicativo DB-Link di Autodesk Revit, creando un *link* diretto fra il modello .rvt e il *database* Microsoft Access. La procedura permette di esportare dall'interno del modello sia i parametri di *default*, che quelli condivisi eventualmente creati. Per una migliore gestione del file sono state realizzate alcune maschere di consultazione per interrogare il *database* attraverso opportune *query*. Il collegamento tra i due *database* è di tipo bidirezionale, ovvero le modifiche effettuate in uno dei due *software* si ripercuotono anche nell'altro. Il modello HBIM così generato viene poi esportato assieme al proprio *database* in un ambiente *cloud* nel quale gli operatori, a seconda delle mansioni e dei permessi di accesso, possono interagire e modificare la valorizzazione dei parametri all'interno dello stesso *database*.

Figura 9

Fasi del processo di modellazione informativa del ponte stradale Toppoli sul fiume Arno.



2) Questa applicazione è stata più chiaramente orientata alla gestione di dati provenienti da sensoristica installata in un *asset* fisico. Il processo di implementazione del sistema di *data management* prevede la creazione di oggetti sensore all'interno del modello BIM e l'utilizzo di una piattaforma *hardware* semplice e facilmente controllabile, che sfrutta microprocessori Arduino. Per quanto riguarda la sensoristica di tipo IoT, sono stati individuati accelerometri di costo contenuto, che utilizzano tecnologia *bluetooth* per la trasmissione di dati. Infine per l'implementazione dei dati provenienti dai sensori all'interno del modello BIM è stata scelta la piattaforma *cloud-based* facilmente integrabile con il *software* di BIM *authoring* utilizzato, Autodesk Forge¹⁶ (al momento della sperimentazione), oggi denominata Autodesk Platform Services¹⁷ (Fig. 10).

Nel caso di studio del ponte Toppoli è stato utilizzato un sensore accelerometrico ADXL3xx tipo WIT in grado di rilevare angolo, accelerazione, velocità angolare e campo magnetico lungo i 3 assi XYZ. I dati registrati vengono esportati in formato .txt e caricati in fogli di calcolo per generare grafici, che descrivono le accelerazioni lungo i tre assi principali.

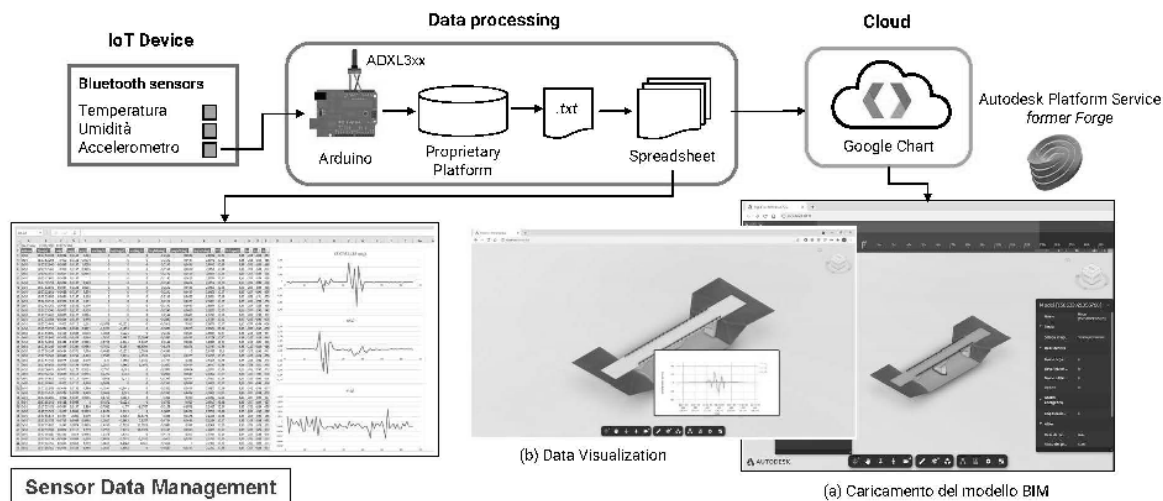
La procedura di implementazione dei dati provenienti dal sensore nella piattaforma-cloud è piuttosto articolata, ma può essere riassunta in due step principali:

16 Forge IoT Reference App, <https://github.com/Autodesk-Forge/forge-dataviz-iot-reference-app>, last accessed 12/04/2023

17 Autodesk Platform Services, <https://aps.autodesk.com/>, last accessed 12/04/2023.

Figura 10

Sensor data management. Workflow nella gestione dei dati provenienti in continuo dalla sensoristica IoT con l'utilizzo della piattaforma Autodesk Forge.



- a) caricamento del modello informativo BIM del ponte per la sua corretta visualizzazione sul *browser*;
- b) implementazione delle modalità di visualizzazione dei dati provenienti dalla sensoristica.

Una volta caricato il modello la piattaforma fornisce tutti gli strumenti essenziali per la sua interrogazione e modifica, offrendo inoltre una visione completa sia del modello digitale nel suo insieme, che dei singoli elementi. Al suo interno vengono poi creati degli *sprite* di riferimento, ovvero icone, che simulano la posizione del sensore nel manufatto reale. L'impostazione di uno *sprite* all'interno del modello permette la visualizzazione dei dati ottenuti dal sensore sotto forma di grafici o tabelle, che si attivano direttamente sullo schermo al passaggio del cursore.

Sebbene la gestione *BIM-based* dei dati provenienti dal monitoraggio dei ponti, sia raccolti periodicamente da personale esperto, che in *real time* da sensori applicati sul manufatto, apra interessanti scenari di sviluppo, il workflow sperimentato presenta ancora carenze in termini di interoperabilità nello scambio dati tra applicazioni *software*, a cui di volta in volta si è riusciti a fornire parziali risposte. Non sono state inoltre approfondite le modalità di gestione tecnica e operativa dei sensori IoT allocati in situ sul ponte, avendo limitato l'interesse dello studio all'implementazione e all'ottimizzazione dei flussi di scambio dei dati tra i vari *software*.

Conclusioni

Il presente studio ha inteso offrire un contributo allo sviluppo di sistemi di monitoraggio strutturale nel contesto delle infrastrutture di trasporto e dei ponti, utilizzando approcci *BIM-based*, in linea con i recenti orientamenti della comunità tecnico-scientifica sia a livello nazionale, che europeo, in materia di gestione e valutazione dei rischi.

L'adozione degli strumenti e delle metodologie di *Building Information Modelling* ha rappresentato il primo passo per una più efficiente gestione informativa dei ponti. In particolare i modelli BIM ottenuti nei casi studio affrontati hanno dimostrato l'affidabilità e la replicabilità anche alle opere infrastrutturali dei processi *Scan-to-BIM* già utilizzati per gli edifici.

Riguardo ai metodi di gestione di dati e informazioni provenienti dal monitoraggio dei ponti, questi possono variare notevolmente a seconda dei criteri stabiliti dall'ente gestore, che in base ai propri obiettivi strategici e alla struttura organizzativa interna può definire approcci diversi in termini

di sistema di gestione delle risorse e relativa infrastruttura tecnologica di supporto. In tale direzione la ricerca ha condotto una doppia sperimentazione con l'obiettivo di individuare livelli di maggior efficienza attraverso approcci supportati dal BIM. Nel caso del ponte ferroviario sul torrente Osa, si è dimostrato come sia possibile trasferire efficacemente le funzionalità del *software* diagnostico D.O.M.U.S. per la manutenzione dei ponti ferroviari attualmente in uso in RFI in un ambiente BIM. Permangono tuttavia alcune criticità in quanto le suddivisioni di anagrafica fornite dal *software* D.O.M.U.S. per l'identificazione delle varie parti del ponte non seguono un preciso criterio di comportamento strutturale e ciò impone la creazione di tipologie di oggetti parametrici estranei alla semantica dell'organismo strutturale, ostacolando un eventuale trasferimento del modello BIM così creato in un ambiente di analisi FEM.

Nel caso del ponte stradale sul fiume Arno, è stato invece delineato un *workflow* di acquisizione dei dati in continuo provenienti da sensori installati sul manufatto, come primo passo per una gestione *smart* della valutazione del rischio dei ponti, utilizzando la piattaforma *cloud-based* Autodesk Forge pienamente compatibile con il *software* di BIM *authoring* Revit. Tuttavia, in una prospettiva di *Digital Twin* l'integrazione di dati dinamici e statici appare ancora molto complessa, in quanto la necessità di gestire rilevanti flussi informativi variamente concatenati, tra modelli parametrici, ambienti di condivisione e piattaforme di gestione dei dati, anche in cloud, si scontra frequentemente con carenze di interoperabilità non ancora del tutto risolte.

Ringraziamenti

Il presente contributo è parte degli esiti di un progetto di ricerca dell'Università di Firenze dal titolo: *"Modellazione H-BIM per il patrimonio storico infrastrutturale: applicazioni alla fase di gestione informativa nel ciclo di vita dell'asset"* (2020-21). Responsabile scientifico: Carlo Biagini; gruppo di lavoro: Alberto Aglietti, Andrea Bongini, Vincenzo Donato, Paolo Ottobri. In particolare, Alberto Aglietti è autore del modello informativo del ponte ferroviario sul torrente Osa, mentre Vincenzo Donato e Paolo Ottobri sono autori del modello informativo del ponte stradale sul fiume Arno.

Riferimenti bibliografici

AGLIETTI *et al.* 2023: A. Aglietti, C. Biagini, A. Bongini, P. Ottobri, *Historic bridges monitoring through sensor data management with BIM methodologies*, in «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLVIII-M-2, pp. 33-41.

AGLIETTI, BIAGINI, BONGINI 2024: A. Aglietti, C. Biagini, A. Bongini, *Bridge Management System for Historic Infrastructural Heritage*, in C. Manchado del Val *et al.* (a cura di), *Advances in Design Engineering IV*. INGEGRAF 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 78-89.

BANFI 2023: F. Banfi, *Virtual heritage. Dalla modellazione 3D all'HBIM e realtà estesa*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (RN), 2023.

BORIN, ZANCHETTA 2020: P. Borin, C. Zanchetta, *IFC. processi e modelli digitali openBIM per l'ambiente costruito*. Maggioli, Santarcangelo di Romagna, 2020.

EDIRISINGHE, SETUNGE, ZHANG 2012: R. Edirisinghe, S. Setunge, K. Zhang, *Reliability based deterioration and replacement decision model for community building*, in *ICOMS 2012 Asset Management Conference Proceedings*, 2012, <https://www.researchgate.net/>, last access 2023/05/26.

KAEWUNRUEN *et al.* 2022: S. Kaewunruen, M. AbdelHadi, M. Kongpuang, W. Pansuk, A.M. Remennikov, *Digital Twins for Managing Railway Bridge Maintenance, Resilience, and Climate Change Adaptation*, in «Sensors», 23 (1), 252, 2022.

LI *et al.* 2023: S. Li, Z. Zhang, D. Lin, T. Zhang, L. Han, *Development of a BIM-based bridge maintenance system (BMS) for managing defect data*, in «Scientific Reports», 13 (1), 846, 2023.

MALEKLOO *et al.* 2022: A. Malekloo, E. Ozer, M. Al Hamaydeh, M. Girolami, *Machine Learning and Structural Health Monitoring Overview with Emerging Technology and High-Dimensional Data Source Highlights*, in «Structural Health Monitoring», 21 (4), 2022, pp. 1906-55.

SABACK DE FREITAS BELLO *et al.* 2021: V. Saback de Freitas Bello, C. Popescu, T. Blanksvärd, B. Täljsten, *Bridge management systems: Overview and framework for smart management*, in IABSE Congress Ghent 2021, pp. 1014-1022.

SABACK DE FREITAS BELLO *et al.* 2022: V. Saback de Freitas Bello, C. Popescu, T. Blanksvärd, B. Täljsten, *Asset Management of Existing Concrete Bridges Using*

Digital Twins and BIM: a State-of-the-Art Literature Review, in «Nordic Concrete Research», 66 (1), 2022, pp. 91-111.

SANTARSIERO *et al.* 2021: G. Santarsiero, A. Masi, V. Picciano, A. Digrisolo, *The Italian Guidelines on Risk Classification and Management of Bridges: Applications and Remarks on Large Scale Risk Assessments*, in «Infrastructure», 6 (8), 111, 2021.

WOODWARD *et al.* 2001: R.J. Woodward, D.W. Cullington, A.F. Daly, P.R. Vassie, P. Haardt, R. Kashner, R. Astudillo, C. Velando, B. Godart, C. Cremona, *Bridge Management in Europe (BRIME)-Deliverable D14*, Final Report, 2001, <https://trimis.ec.europa.eu/>, last access 2023/05/26.

CNR-DT 213/2015: Istruzioni per la Valutazione della Sicurezza Strutturale di Ponti Stradali in Muratura.

USBID 2019: U.S. Institute of Building Documentation: *USBID Level of Accuracy (LOA) Specification Guide*. 2019.