

Application of BIM methodology for structural inspection and maintenance

Eco-systems: semi-automated monitoring procedures to implement different kinds of data into Enriched COoperative Systems

English Abstract

The main objective of the present thesis work is to develop an efficient methodology for setting up and managing up-to-date and updatable *Monitoring ECO-Systems*, intended as *Enriched COoperative Systems*. It is thus organised into twelve chapters clustered in three main parts. The first part covers an introduction to *Building Information Modelling* [BIM], *Structural Health Monitoring* [SHM], and the overall standardised Scan-To-BIM methodology proposed hereto. Subsequently, the second part presents a procedural and semi-automated methodology within the framework of the macro Scan-to-BIM approach for the digitisation of the Italian Infrastructure Heritage, particularly focusing on bridges, viaducts, and overpasses. The pilot case study for the developed procedure is the Olivieri Viaduct (Salerno, Italy). On the other hand, the third part deals with automated procedures for the integration of data from sensors in a BIM environment, developed on the Temple of Neptune (Paestum, Italy). It was chosen for the extensive existing database and for the possibility of integrating data from the innovative system of seismometers recently arranged for monitoring micro-displacements. Therefore, this application allows to implement pieces of information from both active sensors – i.e., *Terrestrial Laser Scanners* [TLS] and *Seismometers* – and passive sensors – i.e., cameras mounted on *Unmanned Aerial Vehicles* [UAV].

As explained in the first part, in a more distinctively figurative way, we could exhaustively describe the *Building Information Modelling* [BIM] methodology as the ideal combination of symbolic representation – starting from the cavemen's drawing and fast-forwarding to the 3D digital twins of the physical world – and numerical modelling – that indeed dates back to the Greeks, i.e., Pythagoras. However, much like the prisoners of the cave of the well-known Plato's allegory, we are every day more convinced that the digital reproduction of the phenomenal world can become itself the reality. If not, at the very least, it can flawlessly mirror it. On the contrary, it is not to forget that the whole experience of the world is just not equal to the objective reality, may this even exist, but a version of it mediated by our observation, thus a discretisation of it, no matter how faithful it may come to be, should never propose as the absolute truth.

The concept of *Structural Health Monitoring* [SHM] is relatively recent too. Starting from the early years of the 21st century, the problem of monitoring the physical-chemical-mechanical conditions of structures and infrastructures for civil use began to be thought of in a significantly different way than in the last century. Indeed, over the previous twenty years, it has been realised that novel construction materials, such as reinforced concrete and pre-stressed steel may have a long life but not an indefinitely long one. More has also been understood regarding materials of the past, i.e., wood. Thus, it has become clear that carrying out correct and methodical maintenance is essential and can significantly extend the useful life of a structure or infrastructure. All these arguments have then led to the definition of the modern concept of structural health and the need for its monitoring, similarly to what happens to human health.

Furthermore, specifically for the highly historicised Italian territory, SHM constitutes a good tool for the historical and architectural heritage to enhance the management of the assets. Particularly, the ***Guidelines for risk classification and management, safety assessment and monitoring of existing bridges*** underline the importance of predictive models. It then appears clear how current experimentation focuses always more on conjugating the SHM numerical modelling with the BIM modelling technology, often employing advanced

programming tools – such as *Visual Programming Language* [VPL] script – so as to add visualisation to asset management systems, to provide a highly beneficial cognitive aid for processing overwhelming amounts of information.

As a result of the presented considerations, it arises the main objective of the present thesis project, i.e., the development of a methodology for long-term management in a BIM environment of structural *monitoring Enriched COoperative Systems* [ECO-Systems], which falls within the topics of the *ninth sustainable goal – Industry, innovation, and infrastructure*.

The *monitoring ECO-system* is designed as an open environment that needs continuous input to maintain its order; the inputs will be represented by up-to-date and updatable information, in order for the ECO-system to function properly. It is therefore imperative when organising a facility management BIM system to clearly establish implementation and data management procedures, i.e., to define the so-called *Common Data Environment* [CDE, in italian *Ambiente di Condivisione Dati – ACDat*]. The proposed methodology moves towards a standardisation of the modelling procedures of the existing built environment, while also being easily adaptable *ex-novo* modelling, by simply leaving out the initial integrated survey.

Monitoring ECO-systems are thus configured as systems whose input data come from monitoring operations, whether these are carried out in a predominantly *analogue* fashion rather than in an almost entirely *digital* way. The secondary objective of the present work is then the generation, by the end of each modelling stage, of properly mapped thus easily accessible *Open BIM* models for efficient information exchange, which falls within the topics of the *seventeenth sustainable goal – Partnership for the Goal*.

A consolidated Scan-to-BIM approach usually involves first surveying the structure and the surrounding landscape on which to develop a BIM model. For said reason, it is hereby proposed a framework for the standardisation of some well and lesser-known practices implemented in this process to be able to trace data sources and the quality of their reproduction along the whole modelling process.

The reported tested Scan-to-BIM methodology, which employs the Autodesk software package, is meant as a *good operational practice* and can be organised into six sequential steps as follows: (1) *Three-dimensional survey* [3DS]; (2) *Georeferencing* [GEO]; (3) *Federate modelling and Shared Coordinates setting* [FSC]; (4) *Structural modelling* [STR]; (5) *Level of Information enhancement* [LOI]; (6) *Open BIM Models Exportation* [IFC].

Each step of the proposed workflow is necessary to the subsequent, but it stays updatable thanks to the BIM environment. The modelling of the existing heritage is rarely a straightforward process and may, in some cases, be iterative, thus the necessity of repeating some steps or, at least, exchanging some of them. Remarkably, the LOI phase is present at different levels, a constant throughout the process, whether performed manually or via VPL scripts, by populating *ad-hoc* parameters with varying types of information.

As previously mentioned, the second part of the thesis work deals with the digitisation of the Italian Infrastructure Heritage, that, to date seems to have been forgotten, generally lacking maintenance planning or even completely neglected. Infrastructural artworks are sporadically recalled, sadly on the occasion of catastrophic events, which unfortunately seem to provide the only catalyst for the initiation of legislative changes, leading to the current imperative to introduce a digital system for the management of Italian bridges, viaducts and overpasses. Therefore, the case study of the Olivieri Viaduct presented in the following chapters, will concern the setting up of an optimised *Bridge Management System* [BMS], intended as a framework for the *Structural Health Monitoring* [SHM] of the Italian Bridge Infrastructure.

Information is key to effective bridge management; therefore, an essential module of a management system is the information model. Databases are at the heart of the module and ultimately form the basis and quality of all decisions and actions considered by the BMS. The addition of visualisation to asset management provides a beneficial cognitive aid for processing overwhelming amounts of information. This can be achieved via *Bridge Information Modelling* [BrIM], which is not just a geometrical representation of bridges but is an

intelligent virtual 3D model of the bridge as it contains all data about every component for its whole life cycle. It improves the quality and accuracy of drawings, as well as constructability, and enhances collaborations.

An in-depth analysis of the national and international regulatory aspects concerning the protocols for inspection and identification of structural criticalities for bridges and elevated infrastructures was therefore due. In particular, the analysis focuses on what was reported internationally in a selection of countries chosen either because they constituted a regulatory benchmark or because they were part of the course of study pursued by the PhD Candidate. Indeed, the United States proposes a regulatory structure articulated between documents that offer an overview of the different professional figures that take part in the analysis and development of a maintenance plan, thus constituting a cultural reference for many countries.

Spain and Argentina, on the other hand, while incorporating certain concepts typical of *Latin* normative frameworks, present substantial differences, whose analysis highlights how the tools of representation and information modelling must adapt to operational peculiarities that can vary widely even among culturally close environments.

Subsequently, an extensive literature review was conducted on the state of the art concerning the application of the BIM methodology to the digitisation of infrastructure assets – in particular bridges, viaducts and flyovers – and data regarding inspection practices aimed at the definition of monitoring and maintenance procedures, followed by an analysis of the evolution of the relevant Italian regulatory system, starting from the 1960s up to the more recent application of the ***Guidelines for the Risk Classification and Management, Safety Assessment and Monitoring of Existing Bridges*** issued in 2020.

The first experimental phase involving the updating of the Olivieri Viaduct information database began with a survey campaign of the bridge and the underlying valley in order to produce initial modelling of the infrastructure within its urbanised context, to extrapolate updated technical drawings of the complex system. The survey campaign was undertaken in the framework of the Project: ***CUR_CIS2020 Methodologies for the punctual assessment of hydrogeological risk in heavily populated areas and tools for regional development strategies*** – Application to the case study Strategic Infrastructure Corridor [CIS] at regional level; Salerno-Cava de' Tirreni – A3 Naples-Salerno motorway section and other downstream road infrastructures. The project objective concerns procedures to process and integrate various types of 2D and 3D data in a GIS environment. The survey was carried out by the *geomatics* and *surveying & representation* groups of the *Laboratorio Modelli – Surveying and Geo-Mapping for Environment and Cultural Heritage*, Department of Civil Engineering [DICIV], University of Salerno.

Given its relevance, the Olivieri Viaduct and the surrounding urban context appeared to be the perfect case study to develop an operational methodology for the massive digitisation of both the structural geometry and the relative state of conservation of the infrastructural structures belonging to the category of 'bridges viaducts and overpasses' located along the A3 motorway, within the framework of the C.U.G.R.I. [*Consorzio inter-Universitario per la previsione e prevenzione dei Grandi Rischi – Inter-University Consortium for the Forecasting and Prevention of Major Risks*] agreement with the *Autostrade Meridionali* [SAM] company concerning the commissioning of the ***Service for the surveillance of the major infrastructures of the A3 Naples-Pompei-Salerno motorway – in accordance with the circulars of the Ministry of Public Works No. 6736/61 of 19.7.67 and No. 34233 of 25.02.1991 – and related support activities, such as non-destructive technical tests, laboratory tests, etc.***

Afterwards the validated and optimised procedures for the information exchange concerning both the register and the cataloguing data on the infrastructure, as well as the models in an open format as a basis for further enhancing the level of knowledge concerning the very structure are presented. The bulk of the data thus produced is then organised to be fed into the BMS developed by C.U.G.R.I.'s IT technicians, where it is archived according to regulatory requirements.

For the purpose, the shared parameters *Form Link* [*Link Scheda*] and *GlobalStructureCode* [*CodiceOperaGlobale*] were introduced. They would respectively contain a working link to the directory of the BMS hosting the inspection form filled in for each component, and a unique identifier for each component, necessary to organise the error-free data feed concerning each component named according to the nomenclature, numbering and cataloguing carried out within the BIM environment.

A subsequent phase is then envisaged for the re-importation of the data resulting from the detailed inspections – summarised by the *Relative Defectiveness Indicator* [Dr] plotted by the BMS – to the editable BIM environment, Autodesk Revit [LOI enhancement phase]. The BrIM model thus becomes a fully updated repository containing the health status of the infrastructure models through which it is also possible to provide an advanced graphic visualisation of the synthetic data grouped, e.g., into the *Attention Classes* [CdA] imposed by the regulations.

As further explained in the third part, many researchers have already pointed out the necessity to integrate the current *Structural Health Monitoring* [SHM] procedures, including but not limited to *Bridges Management Systems* [BMS], with data coming from sensors, both in terms of measuring instruments connected to a *Digital Twin* of the physical asset via the so-called *Internet of Things* [IoT] and three-dimensional survey data. Indeed, for preventive and systematic maintenance of structures, periodic visual inspections are essential to detect structural defects at an early stage and to initiate necessary interventions. Modern technologies such as *unmanned aircraft systems* [UAS] equipped with high-resolution cameras increasingly support the inspection process and the associated documentation. In addition, processing methods and linked data models allow for effective data management.

Besides the historical relevance of the case study proposed below, the Temple of Neptune at Paestum – one of the best-preserved artefacts of Greek origin in Italy – has been chosen for the possibility of carrying out experimental applications starting from the rich already existing database built up over more than a decade. Furthermore, additional information coming from the innovative seismometric monitoring system – whose measuring points are placed on the cornice of the external colonnade of the Temple of Neptune and data collection manholes near the stylobate – has been subsequently implemented. The first laser scanner survey crucial herein for scan-to-BIM modelling dates back to 2011. The knowledge of the site was updated several times mainly with photogrammetric surveys oriented to the acquisition of material data. The most up-to-date of which, designed to acquire both the temple and the surrounding context with a good level of detail, was carried out in 2017. The subsequent photogrammetric survey carried out in 2020 was, in turn, focused on the survey of the area surrounding the temple of Neptune, having been requested due to the new excavations made upon the placement of the seismometric monitoring system.

The monitoring system network consists, among other specific equipment, of experimental measurement instruments – *UNISA Folded Pendulum*, seismometers developed and patented by the *Research Group in Applied Physics* of the University of Salerno engaged in the study of gravitational waves – set in place under the supervision of the scientific coordinators: professor Luigi Petti (Department of Civil Engineering – University of Salerno) and the director of the *Archaeological Park of Paestum and Velia*, i.e., the archaeologist Gabriel Zuchtriegel.

Due to BIM working with a cartesian reference system, upon linking a georeferenced RCP point cloud to a Revit project, the point cloud will be automatically moved closer to the new internal origin, obliterating the previous coordinate values. On the other hand, when the generation of the BIM instances is forced in place using VPL scripts, in order to keep the geographical coordinates, approximation failures occur in the reprojected objects, above all in the case of meshes and visualisation and modelling issues will arise afterwards. Therefore, given the issues connected with employing a topographic coordinates system within a BIM environment, in order to set up the shared environment [FSC] for the Monitoring ECO-System of the Temple of Neptune, it was necessary to perform a translation from the global to local reference system on both the

photogrammetric point clouds – directly within the Agisoft Metashape environment by subtracting a fixed quantity to the x , y , and z values of the GCPs – and on the integrated point cloud used as a reference for the subsequent Scan-to-BIM application. Fully parametric structural families were then modelled from scratch and placed in the BIM project using the integrated point cloud as a baseline.

Although the long-term purpose of a BIM modelling is to standardise as many elements as possible, when the object to model is unique, as in the case of the urban context, which is typically different and distinctive from any asset, the aim should focus on standardising the process to reproduce it most authentically, for further in-depth study. Hence, the methodological applications proposed in the third part involves two workflows developed to reproduce texturised photogrammetric meshes of the urban context, and some detailed areas of interest within a BIM environment, by parametrising the very components of the mesh model, its triangular faces. Particularly the first procedure can be further enhanced by means of *Physically Based Rendering* [PBR] materials, generating the advanced maps as a result of the photogrammetric process; while the second one may come in handy when the objective of the application is an accurate reproduction of selected areas for future qualitative and quantitative assessments. The aim is indeed to bridge the gap between the type of detail a survey can reach, precisely a photogrammetric one, when speaking about the colorimetric data, and what is possible to reproduce in a BIM environment when talking about distinctive if not unique elements such as the urban context or detailed relevant elements, such as frieze/decorations or damaged areas.

The two procedural workflows presented – defined *Workflow A and B* for the sake of simplicity – are to all intents and purposes Mesh-to-BIM approaches. Therefore, for their effective implementation, some preliminary actions on the mesh surveyed model must be undertaken. Mesh simplification is a common practice for minimising model size by reducing the number of faces while preserving the shape, volume, and boundaries. Criteria for mesh decimation are generally user-defined, selecting the reduction method (working on the number of vertices, edges, or faces) and the reduction target, indeed, several commercial and open-source editing and modelling software include a mesh simplification module for handling this post-processing task efficiently. Therefore, for an average notebook (Core i7 16GB of RAM, 2GB GPU) to be able to process the developed scripts and manage the results, it is advisable to keep the mesh faces count under 600'000 units, for the first method proposed, and under 20'000 units, for the second one, simplifying and splitting in more than one project the original photogrammetric mesh model (via Agisoft Metashape and ISTI-CNR MeshLab). Eventually, the monitoring network consisting of seismometric sensors placed between the end of 2020 and the beginning of 2021 was also modelled using *ad-hoc* developed MEP families with a lower level of geometric detail – LOG 200 (purely volumetric). Subsequently, the information database related to the measurement instruments and real-time monitoring data available to date were linked to the MEP model via a VPL script [Script 10] customised onto this specific seismometer network. The full comprehension and utilisation of the seismometer signals are still under evaluation, as the network is still in the run-in phase, so the BIM interface had to be designed to be sufficiently flexible and upgradeable. To this end, the script was explicitly designed for possible future upgrades of the monitoring system by choosing Microsoft Excel as the source database and further automating the implementation of possible additionally required system descriptors defined as *shared parameters* [Script 9]. Furthermore, the linked pictures useful to better understand the system have been made available online via an openly shared Google Drive folder.

With regard to the first proposed case study, the greatest challenge was to simplify and optimise the procedure for the effective implementation of BIM-type models in the processes of cataloguing and inspecting existing bridges, viaducts and overpasses, so that it would become a valid support tool rather than a barrier for the C.U.G.R.I. technicians, who are not experts in the field of three-dimensional information modelling. On the other hand, the direct confrontation with experts specialised in structural design and monitoring allowed the undersigned to fill in some technical gaps, while also receiving valuable feedback in real-time.

On the other hand, the second application showed how the management of the existing heritage cannot be separated from an accurate investigation of the state of conservation of the materials and a detailed 3D reconstruction. The morphological and colourimetric reconstruction of complex structures, elements and specific damaged areas in the BIM environment is essential for the development of databases to store data and facilitate the planning of refurbishments and, in general, any intervention activity on the asset under study. Alternatively, should the integration of sensor-based data become a common practice for monitoring procedures, this praxis will certainly optimise conservation assessments, accurately highlighting changes in the geometry and texture of the asset, by merely comparing updated survey data with the modelled asset at regular intervals.

Abstract Italiano

L'obiettivo principale del presente lavoro di tesi è quello di sviluppare una metodologia efficiente per la creazione e la gestione di *ECO-sistemi di monitoraggio* aggiornati e aggiornabili, intesi come *Sistemi COoperativi Integrati* [Enriched COoperative Systems]. Il corpus è dunque organizzato in dodici capitoli raggruppati in tre parti principali. La prima parte tratta un'introduzione al *Building Information Modelling* [BIM], allo *Structural Health Monitoring* [SHM] e alla metodologia per un approccio standardizzato di tipo Scan-To-BIM proposto in questa sede. La successiva seconda parte presenta una metodologia procedurale e semi-automatizzata, sviluppata all'interno del macro-approccio Scan-to-BIM, per la digitalizzazione del patrimonio infrastrutturale italiano, con particolare attenzione a ponti, viadotti e cavalcavia. Il caso di studio pilota per la procedura sviluppata è il Viadotto Olivieri (Salerno, Italia). La terza parte si occupa, invece, di procedure automatizzate per l'integrazione di dati provenienti da sensori in ambiente BIM, sviluppate sul Tempio di Nettuno (Paestum, Italia) scelto sia per la ricca banca dati storicizzata già disponibile, sia per la possibilità di integrare ulteriormente dati provenienti dall'innovativo sistema di sismometri di recente disposti per il monitoraggio dei micro-spostamenti. Questa applicazione permette dunque di implementare tanto informazioni provenienti da sensori attivi – cioè *Laser Scanner Terrestri* [TLS] e *Sismometri* – quanto da quelli passivi – cioè fotocamere montate su *Aereomobili a Pilotaggio Remoto* [APR].

Come spiegato nella prima parte, in modo più distintamente figurativo, potremmo descrivere esaustivamente la metodologia del *Building Information Modelling* [BIM] come la combinazione ideale di rappresentazione simbolica – a partire dal disegno degli uomini delle caverne per arrivare ai gemelli digitali tridimensionali che raffigurano il mondo fisico – e di modellazione numerica – che risale ai Greci stessi e in particolare a Pitagora. Tuttavia, proprio come i prigionieri della caverna della nota allegoria di Platone, siamo ogni giorno più convinti che la riproduzione digitale del mondo fenomenico possa diventare essa stessa la realtà. Oppure possa quantomeno rispecchiarla in modo impeccabile. Al contrario, non bisogna dimenticare che l'intera esperienza del mondo non è uguale alla realtà oggettiva, se mai questa esistesse, ma piuttosto ne è una sua versione mediata dalla nostra osservazione, quindi una sua discretizzazione che, per quanto fedele possa risultare, non dovrebbe mai proporsi come verità assoluta. Anche il concetto di *Structural Health Monitoring* [SHM] è relativamente recente. A partire dai primi anni del XXI secolo, il problema del monitoraggio delle condizioni fisico-chimiche-meccaniche di strutture e infrastrutture ad uso civile ha iniziato a essere pensato in modo significativamente diverso rispetto al secolo scorso. Negli ultimi vent'anni, infatti, ci si è resi conto che i nuovi materiali da costruzione, come il cemento armato e l'acciaio precompresso, possono avere una vita lunga ma non indefinita. Sono state inoltre acquisite maggiori conoscenze sui materiali del passato, come il legno. È così emerso chiaramente che una corretta e metodica manutenzione è essenziale al fine di prolungare in modo significativo la vita utile di una struttura o di un'infrastruttura. Tali argomentazioni hanno quindi determinato la definizione del moderno concetto di salute strutturale e la necessità di un suo monitoraggio, analogamente a quanto avviene per la salute umana.

Inoltre, proprio per il territorio italiano altamente storicizzato, la SHM costituisce un valido strumento nell'ottica di una migliore gestione del patrimonio storico e architettonico. In particolare, le *Linee Guida per la classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti* sottolineano l'importanza dei modelli predittivi. Appare quindi chiaro come la sperimentazione attuale si concentri sempre più sulla coniugazione della modellazione numerica SHM con la tecnologia di modellazione BIM, spesso impiegando strumenti di programmazione avanzati – come gli script del *Visual Programming Language* [VPL] – in modo da aggiungere la visualizzazione ai sistemi di gestione dei beni, per fornire così un aiuto cognitivo altamente vantaggioso nell'elaborazione di quantità ingenti di informazioni. Da queste considerazioni scaturisce l'obiettivo principale del presente progetto di tesi, ovvero lo sviluppo di una metodologia per la gestione a lungo termine in ambiente BIM di *Sistemi COoperativi Integrati* per il

monitoraggio strutturale [*ECO-Systems*], che rientra a pieno titolo nelle tematiche del *nono obiettivo sostenibile – Industria, innovazione e infrastrutture*.

L'*ECO-sistema di monitoraggio* è concepito come un ambiente aperto che necessita di input continui per mantenere il suo ordine; gli input saranno perciò rappresentati da informazioni aggiornate e aggiornabili, affinché l'*ECO-sistema* funzioni correttamente. Nell'organizzare un sistema BIM di facility management è quindi indispensabile stabilire chiaramente le procedure di implementazione e di gestione dei dati, ovvero definire il cosiddetto *Common Data Environment* [CDE, in italiano *Ambiente di Condivisione Dati – ACDat*]. La metodologia proposta mira per tanto a una standardizzazione delle procedure di modellazione dell'ambiente costruito esistente, pur essendo facilmente adattabile alla modellazione *ex-novo*, semplicemente tralasciando la fase iniziale di rilievo integrato.

Gli ECO-sistemi di monitoraggio si configurano quindi come sistemi i cui dati di input provengono da operazioni di monitoraggio, siano esse svolte in modo prevalentemente analogico piuttosto che in maniera quasi interamente digitale. L'obiettivo secondario del presente lavoro è poi la generazione, al termine di ogni fase di modellazione, di modelli Open BIM correttamente mappati e quindi facilmente fruibili per un efficiente scambio di informazioni; obiettivo questo che rientra anch'esso pienamente nelle tematiche del *diciassettesimo obiettivo sostenibile – Partnership for the Goal*.

Un approccio consolidato di tipo Scan-to-BIM prevede solitamente il rilievo della struttura e del paesaggio circostante a partire dal quale sviluppare un modello BIM. Per questo motivo, in questa sede si propone un sistema di standardizzazione di alcune procedure, note e meno note, messe comunemente in atto in questo tipo di processi finalizzate al tracciamento delle fonti dei dati e della qualità di riproduzione degli stessi durante l'intero iter di modellazione. La metodologia Scan-to-BIM sperimentata, che si avvale del pacchetto di software Autodesk, è intesa come una buona pratica operativa e può essere organizzata in sei fasi sequenziali, elencate di seguito: (1) *Rilievo tridimensionale* [3DS]; (2) *Georeferenziazione* [GEO]; (3) *Modellazione federata e impostazione delle coordinate condivise* [FSC]; (4) *Modellazione strutturale* [STR]; (5) *Miglioramento del livello di informazione* [LOI]; (6) *Esportazione di modelli BIM aperti* [IFC].

Ogni fase del flusso di lavoro proposto è necessaria alla successiva, ma rimane aggiornabile in ambiente BIM. La modellazione del patrimonio esistente è raramente un procedimento semplice e, in alcuni casi, può essere iterativa, con la conseguente necessità di ripetere alcune fasi o, almeno, di alternarne alcune. È interessante notare che la fase LOI è in realtà presente a diversi livelli e rappresenta una costante di tutto il processo, sia che venga eseguita manualmente o tramite script VPL, popolando parametri predisposti *ad hoc* con vari tipi di informazioni.

Come già accennato, la seconda parte del lavoro di tesi si concentra sulla digitalizzazione del patrimonio infrastrutturale italiano, che ad oggi sembra essere stato dimenticato, il più delle volte privo di una pianificazione della manutenzione o addirittura del tutto abbandonato. Le opere d'arte infrastrutturali vengono sporadicamente ricordate, generalmente in occasione di eventi catastrofici, che purtroppo sembrano essere l'unico catalizzatore per l'avvio di modifiche legislative, sfociate nell'attuale imperativo di introdurre un sistema digitale per la gestione di ponti, viadotti e cavalcavia italiani. Pertanto, il caso di studio del Viadotto Olivieri, presentato nei capitoli successivi, riguarda la messa a punto di un *sistema di gestione dei ponti* [BMS] ottimizzato, inteso come quadro di riferimento per il *monitoraggio dello stato di salute strutturale* [SHM] delle infrastrutture soprelevate italiane.

L'informazione è un elemento chiave per una gestione efficace dei ponti; pertanto, un modulo essenziale di un sistema di gestione consiste nella messa a punto di modello informativo. I database sono il cuore di questo modulo e, in ultima analisi, rappresentano la base e il livello qualitativo di tutte le decisioni e le azioni previste dal BMS. L'aggiunta della visualizzazione alla gestione degli asset fornisce un utile aiuto cognitivo per l'elaborazione di quantità eccessive di informazioni. Questo risultato si può ottenere attraverso il cosiddetto *Bridge Information Modelling* [BrIM], che non si limita a una rappresentazione geometrica dei ponti, ma è

piuttosto un modello virtuale intelligente tridimensionale del ponte, che contiene le informazioni riguardanti ogni suo componente per l'intero ciclo di vita. Il BrIM è in grado quindi di migliorare la qualità e l'accuratezza dei disegni, nonché la realizzabilità, e di potenziare le attività di collaborazione.

Era quindi doverosa un'analisi approfondita degli aspetti normativi nazionali e internazionali relativi ai protocolli di ispezione e identificazione delle criticità strutturali per ponti e infrastrutture sopraelevate. In particolare, l'analisi si concentra su quanto riportato a livello internazionale in una selezione di paesi scelti o perché costituivano un riferimento normativo o perché facenti parte del corso di studi perseguito dalla dottoranda. Gli Stati Uniti, infatti, propongono una struttura normativa articolata in documenti che offrono una panoramica delle diverse figure professionali che partecipano all'analisi e allo sviluppo di un piano di manutenzione, costituendo così un riferimento culturale per molti Paesi. Spagna e Argentina, invece, pur incorporando alcuni concetti tipici dei quadri normativi *latini*, presentano differenze sostanziali, la cui analisi evidenzia come gli strumenti di rappresentazione e modellazione delle informazioni debbano adattarsi a peculiarità operative che possono variare molto anche tra ambienti culturalmente vicini.

Successivamente, è stata condotta un'ampia revisione della letteratura sullo stato dell'arte relativo all'applicazione della metodologia BIM alla digitalizzazione dei beni infrastrutturali – in particolare ponti, viadotti e cavalcavia – e dei dati relativi alle pratiche ispettive finalizzate alla definizione delle procedure di monitoraggio e manutenzione, seguita da un'analisi dell'evoluzione del sistema normativo italiano in materia, a partire dagli anni Sessanta fino alla più recente applicazione delle *Linee Guida per la classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti* emanate nel 2020.

La prima fase sperimentale relativa all'aggiornamento del database informativo sul Viadotto Olivieri è iniziata con una campagna di rilievo del ponte e della valle sottostante, al fine di produrre una prima modellazione dell'infrastruttura nel suo contesto urbanizzato, dalla quale estrapolare elaborati tecnici aggiornati del sistema complesso.

La campagna di rilievi è stata intrapresa nell'ambito del Progetto: *CUR_CIS2020 Metodologie per la valutazione puntuale del rischio idrogeologico in aree fortemente popolate e strumenti per le strategie di sviluppo regionale – Applicazione a livello regionale del caso studio Corridoio Infrastrutturale Strategico [CIS]; Salerno-Cava de' Tirreni – tratta autostradale A3 Napoli-Salerno e altre infrastrutture stradali a valle*. L'obiettivo del progetto riguarda lo sviluppo di procedure volte all'elaborazione e all'integrazione di vari tipi di dati 2D e 3D in un ambiente GIS. In particolare, il rilievo è stato effettuato dai gruppi di *geomatica* e di *rilievo e rappresentazione* del Laboratorio Modelli – *Surveying and Geo-Mapping for Environment and Cultural Heritage*, afferente al Dipartimento di Ingegneria Civile [DICIV] dell'Università degli Studi di Salerno.

Data la rilevanza del Viadotto Olivieri e del contesto urbano circostante, questo si è rivelato essere il caso di studio ideale per sviluppare una metodologia operativa per la digitalizzazione massiva tanto della geometria strutturale quanto del relativo stato di conservazione delle opere infrastrutturali appartenenti alla categoria "ponti, viadotti e cavalcavia" situate lungo l'autostrada A3, nell'ambito dell'accordo tra il C.U.G.R.I. [Consorzio interuniversitario per la previsione e prevenzione dei Grandi Rischi] e la Società *Autostrade Meridionali* [SAM] per l'affidamento del Servizio di sorveglianza delle grandi infrastrutture dell'autostrada *A3 Napoli-Pompei-Salerno – ai sensi della circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 6736/61 del 19.7.2011. 6736/61 del 19.7.67 e n. 34233 del 25.02.1991 – e delle relative attività di supporto, quali prove tecniche non distruttive, prove di laboratorio, ecc.* Vengono quindi presentate a seguire le procedure validate e ottimizzate per lo scambio di informazioni relative sia all'anagrafica che ai dati di catalogazione dell'infrastruttura, nonché la produzione di modelli in formato aperto come base per migliorare ulteriormente il livello di conoscenza della struttura stessa. La mole di dati così prodotta viene quindi predisposta per essere immessa nel BMS sviluppato dai tecnici informatici del C.U.G.R.I., dove viene archiviata in conformità con le disposizioni normative.

In particolare, sono stati introdotti i parametri condivisi *Link Scheda* e *CodiceOperaGlobale* che conterranno, rispettivamente, un link funzionante alla directory del BMS che ospita la scheda di ispezione compilata per ogni componente, e un identificativo univoco per detti componenti, necessario al fine di organizzare l'alimentazione dei dati privi di errori relativi a ciascun componente in base alla nomenclatura, numerazione e catalogazione effettuata all'interno dell'ambiente BIM. In una fase successiva è prevista poi la reimportazione dei dati risultanti dalle ispezioni di dettaglio – sintetizzati dall'*Indicatore di Difettosità Relativa* [Dr] elaborato all'interno del BMS – verso l'ambiente BIM editabile, Autodesk Revit [fase di potenziamento del LOI]. Il modello BrIM diventa così un repository completamente aggiornato sulle condizioni di salute dei modelli infrastrutturali, attraverso il quale è possibile fornire anche una visualizzazione grafica avanzata dei dati sintetici raggruppati, ad esempio, nelle *Classi di Attenzione* [CdA] imposte dalla normativa.

Come illustrato nella terza parte, molti ricercatori hanno già evidenziato la necessità di integrare le attuali procedure di *Structural Health Monitoring* [SHM], includendo ma non limitandosi ai *Bridges Management Systems* [BMS], con i dati provenienti da sensori, sia in termini di strumenti di misura collegati a un *Digital Twin* dell'asset fisico attraverso il cosiddetto *Internet of Things* [IoT], sia per quanto riguarda i dati di rilievo tridimensionali. Infatti, nell'ottica di un'attività di manutenzione preventiva e sistematica delle strutture, le ispezioni visive periodiche sono essenziali nel rilevare precocemente i difetti strutturali e per intraprendere gli interventi necessari. Le moderne tecnologie, come i *sistemi aerei a pilotaggio remoto* [SAPR] dotati di telecamere ad alta risoluzione, sono sempre più spesso in grado di supportare il processo di ispezione e la relativa documentazione. Inoltre, i metodi di elaborazione e i modelli di dati collegati consentono una gestione efficace dei dati.

Oltre che per la rilevanza storica del caso di studio proposto di seguito, il Tempio di Nettuno – a Paestum, uno dei manufatti di origine greca meglio conservati in Italia – è stato per tanto scelto data la possibilità di realizzare applicazioni sperimentali a partire dalla già ricca banca dati esistente costruita nel corso di più di un decennio. Sono state inoltre implementate le informazioni aggiuntive provenienti dall'innovativo sistema di monitoraggio sismometrico – i cui punti di misura sono collocati sul cornicione del colonnato esterno del Tempio di Nettuno e i pozzetti di raccolta dati in prossimità dello stilobate. Il primo rilievo laser scanner, fondamentale per la fase di modellazione Scan-to-BIM, risale al 2011. La conoscenza del sito è stata poi variamente aggiornata soprattutto con rilievi fotogrammetrici orientati all'acquisizione di dati materici, il più aggiornato dei quali, finalizzato ad acquisire con un buon livello di dettaglio sia il tempio che il contesto circostante, è stato poi realizzato nel 2017. Il successivo rilievo fotogrammetrico effettuato nel 2020 è stato, invece, incentrato sul rilievo dell'area circostante il tempio di Nettuno, essendo stato richiesto in ragione dei nuovi scavi effettuati in occasione del posizionamento del sistema di monitoraggio sismometrico.

La rete del sistema di monitoraggio è costituita, oltre ad altre attrezzature specifiche, da strumenti di misura sperimentali – *UNISA Folded Pendulum*, sismometri sviluppati e brevettati dal *Gruppo di Ricerca in Fisica Applicata* dell'Università di Salerno impegnati nello studio delle onde gravitazionali – messi in opera sotto la supervisione dei coordinatori scientifici: il professor Luigi Petti (Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Salerno) e il direttore del *Parco Archeologico di Paestum e Velia* l'archeologo Gabriel Zuchtriegel.

Poiché il BIM lavora con un sistema di riferimento cartesiano, quando si collega una nuvola di punti RCP georeferenziata a un progetto Revit, questa viene automaticamente avvicinata alla nuova origine interna del progetto, cancellando i valori delle coordinate precedenti. D'altra parte, quando la generazione delle istanze BIM viene forzata in loco utilizzando ad esempio script VPL, al fine di mantenere le coordinate geografiche, si verificano errori di approssimazione negli oggetti riproiettati, soprattutto nel caso delle mesh, con conseguenti problemi di visualizzazione e modellazione.

Pertanto, date le problematiche legate all'impiego di un sistema di coordinate topografiche all'interno di un ambiente BIM, al fine di configurare l'ambiente condiviso [FSC] per l'ECO-sistema di monitoraggio del

Tempio di Nettuno, è stato necessario effettuare una traslazione dal sistema di riferimento globale a quello locale sia sulle nuvole di punti fotogrammetriche – agendo in questo caso direttamente all'interno dell'ambiente Agisoft Metashape sottraendo una quantità fissa ai valori x , y e z dei GCP – sia sulla nuvola di punti integrata utilizzata come riferimento per la successiva applicazione Scan-to-BIM. Famiglie strutturali interamente parametriche, sono state quindi modellate da zero e disposte nel progetto BIM utilizzando la nuvola di punti integrata come riferimento.

Sebbene lo scopo a lungo termine di una modellazione BIM sia quello di standardizzare il maggior numero possibile di elementi, quando l'oggetto da modellare è unico, come nel caso del contesto urbano, che è tipicamente diverso e distintivo in qualsiasi asset, l'obiettivo dovrebbe puntare piuttosto alla standardizzazione del processo per riprodurlo nel modo più autentico, in vista di futuri approfondimenti. Pertanto, le applicazioni metodologiche proposte nella terza parte riguardano due flussi di lavoro sviluppati per riprodurre mesh fotogrammetriche testurizzate del contesto urbano e alcune aree di interesse particolareggiate all'interno di un ambiente BIM, parametrizzando le componenti essenziali del modello di mesh, le sue facce triangolari. In particolare, il primo procedimento può essere ulteriormente migliorato attraverso l'impegno di materiali di tipo *Physically Based Rendering* [PBR], generando mappe avanzate come risultato del processo fotogrammetrico; mentre il secondo può tornare utile quando l'obiettivo dell'applicazione è una riproduzione accurata di aree selezionate per future valutazioni qualitative e quantitative. L'obiettivo è infatti quello di colmare il divario tra il tipo di dettaglio che può raggiungere un rilievo, per l'appunto fotogrammetrico, quando si parla di dati colorimetrici, e quello che è possibile riprodurre in ambiente BIM, nel caso di elementi caratteristici se non unici, come il contesto urbano o elementi rilevanti di dettaglio, come fregi/decorazioni o aree danneggiate.

I due flussi di lavoro procedurali presentati di seguito – definiti *Workflow A* e *B* per semplicità – sono a tutti gli effetti approcci di tipo Mesh-to-BIM. Pertanto, per una loro efficace implementazione, è necessario intraprendere alcune azioni preliminari sul modello rilevato dalla mesh. La semplificazione della mesh è una pratica comune per minimizzare le dimensioni del modello riducendo il numero di facce preservandone la forma, il volume e i confini. I criteri per la decimazione della mesh sono generalmente definiti dall'utente, che seleziona il metodo di riduzione (lavorando sul numero di vertici, spigoli o facce) e l'obiettivo di riduzione; in effetti, molti software di editing e modellazione commerciali e open-source includono un modulo di semplificazione della mesh per gestire in modo efficiente questa attività di post-elaborazione. Pertanto, affinché un notebook medio (Core i7 16GB di RAM, 2GB di GPU) possa elaborare gli script sviluppati e gestire i risultati, è consigliabile mantenere il numero di triangoli della mesh sotto le 600 000 unità, per il primo metodo proposto, e sotto le 20 000 unità, per il secondo, semplificando e dividendo in più progetti il modello di mesh fotogrammetrico originale (tramite Agisoft Metashape e ISTI-CNR MeshLab).

Anche la rete di monitoraggio costituita da sensori sismometrici posizionati tra la fine del 2020 e l'inizio del 2021 è stata modellata utilizzando famiglie MEP sviluppate *ad hoc*, ma con un livello di dettaglio geometrico inferiore – LOG 200 (puramente volumetrico). Successivamente, il database delle informazioni relative agli strumenti di misura e i dati di monitoraggio in tempo reale disponibili fino ad oggi sono stati collegati al modello MEP tramite uno script VPL [Script 10] customizzato su questa specifica rete sismometrica. La piena comprensione e l'utilizzo dei segnali dei sismometri sono ancora in fase di sperimentazione, poiché la rete è attualmente in collaudo; quindi, l'interfaccia BIM è stata pensata in modo da essere sufficientemente flessibile e aggiornabile in qualsiasi momento. A tal fine, è stato progettato espressamente per possibili aggiornamenti futuri del sistema di monitoraggio, scegliendo Microsoft Excel come database di origine e automatizzando ulteriormente l'implementazione di eventuali ulteriori descrittori del sistema definiti come *parametri condivisi* [Script 9]. Inoltre, le immagini collegate utili a comprendere meglio il sistema sono state rese disponibili online attraverso una cartella di Google Drive condivisa apertamente.

Per quanto riguarda il primo caso studio proposto, la sfida maggiore è stata quella di semplificare e ottimizzare la procedura per l'effettiva implementazione dei modelli di tipo BIM nei processi di catalogazione e ispezione

di ponti, viadotti e cavalcavia esistenti, in modo che diventasse un valido strumento di supporto e non un ostacolo per i tecnici del C.U.G.R.I., non esperti nel campo della modellazione informativa tridimensionale. D'altra parte, il confronto diretto con esperti specializzati nella progettazione e nel monitoraggio strutturale ha permesso alla sottoscritta di colmare alcune lacune tecniche, ricevendo anche preziosi feedback in tempo reale. La seconda applicazione ha invece evidenziato come la gestione del patrimonio esistente non possa prescindere da un'accurata indagine sullo stato di conservazione dei materiali e da una dettagliata ricostruzione in 3D. La ricostruzione morfologica e colorimetrica di strutture complesse, di elementi e di specifiche aree danneggiate in ambiente BIM è essenziale per lo sviluppo di banche dati che consentano di archiviare i dati e di facilitare la pianificazione di ristrutturazioni e, in generale, di qualsiasi attività di intervento sul bene oggetto di studio. D'altra parte, se l'integrazione di dati basati su sensori diventerà una pratica comune per le procedure di monitoraggio, questa prassi ottimizzerà certamente le valutazioni di conservazione, evidenziando con precisione i cambiamenti nella geometria e nella texture del bene, semplicemente confrontando i dati di indagine aggiornati con il bene modellato a intervalli regolari.

Resumen Español

El objetivo principal del presente trabajo de tesis es desarrollar una metodología eficiente para la creación y gestión de *ECO-Sistemas de Monitoreo* actualizados y actualizables, pensados como *Sistemas Cooperativos Enriquecidos*. Así, se organiza en doce capítulos repartidos en tres partes principales. La primera parte abarca una introducción a la *modelización de la información del edificio* [BIM], a la *monitorización de la salud estructural* [SHM] y a la metodología general estandarizada Scan-To-BIM que se plantea en este documento. Posteriormente, la segunda parte presenta una metodología procedimental y semiautomatizada en el marco del enfoque macro Scan-to-BIM para la digitalización del patrimonio de infraestructuras italiano, centrándose especialmente en los puentes, viaductos y pasos elevados. Siendo, en esta oportunidad, el caso de estudio piloto para el procedimiento desarrollado el Viaducto Olivieri (Salerno, Italia). Por otro lado, la tercera parte trata de los procedimientos automatizados para la integración de los datos de los sensores en un entorno BIM, desarrollados en el Templo de Neptuno (Paestum, Italia) elegido tanto por la rica base de datos histórica ya disponible como por la posibilidad de integrar aún más los datos del innovador sistema de sismómetros recientemente dispuesto para el seguimiento de los micro-desplazamientos. Esta aplicación permite, por tanto, la implementación de información procedente tanto de sensores activos – como escáneres *láser terrestres* [TLS] y *sismómetros* -; así como de sensores pasivos – cámaras montadas en *vehículos aéreos no tripulados* [VANT].

Como se ha explicado anteriormente, de una manera más figurativa, podríamos describir exhaustivamente la metodología del *Building Information Modelling* [BIM] como la combinación ideal de la representación simbólica -que parte del dibujo de los hombres de las cavernas y llega a los gemelos digitales en tres dimensiones del mundo físico y de la modelización numérica que, de hecho, se remite a los legados griegos de Pitágoras. Sin embargo, al igual que los prisioneros de la caverna de la conocida alegoría de Platón, cada día estamos más convencidos de que la reproducción digital del mundo fenoménico puede convertirse en la propia realidad. Si no, al menos, puede reflejarla impecablemente. En realidad, no hay que olvidar que el conjunto de la experiencia del mundo no es igual a la realidad objetiva, aunque ésta exista, sino una versión de la misma mediada por nuestra observación, por lo que una discretización de la misma, por muy fiel que sea, nunca debe proponerse como la verdad absoluta. El concepto de *monitorización de la salud estructural* [SHM] es también relativamente reciente. A partir de los primeros años del siglo XXI, el problema de la monitorización de las condiciones físico-químicas-mecánicas de las estructuras e infraestructuras de uso civil comenzó a plantearse de una manera significativamente diferente a la del siglo pasado. En efecto, en los últimos veinte años se ha comprendido que los nuevos materiales de construcción, como el hormigón armado y el acero pretensado, pueden tener una vida larga, pero no indefinida. También se ha aprendido más sobre el comportamiento de los materiales del pasado, como la madera. Así, ha quedado claro que llevar a cabo un mantenimiento correcto y metódico es esencial y puede alargar considerablemente la vida útil de una estructura o infraestructura. Todos estos argumentos han llevado a la definición del concepto moderno de salud estructural y a la necesidad de su seguimiento, de forma similar a lo que ocurre con la salud humana.

Al mismo tiempo, específicamente para el territorio italiano, altamente cargado de historia, la SHM constituye una buena herramienta para mejorar la gestión del patrimonio histórico y arquitectónico. En ese sentido, las *líneas guía para la clasificación y gestión de riesgos, la evaluación de la seguridad y la vigilancia de los puentes existentes* destacan la importancia de los modelos predictivos. Así pues, parece claro que la experimentación actual se tiene que enfocar cada vez más en la conjugación de la modelización numérica SHM con la tecnología de modelización BIM, empleando a menudo herramientas de programación avanzadas – como el script *Visual Programming Language* [VPL] – para añadir la visualización a los sistemas de gestión de activos, con el fin de proporcionar una ayuda cognitiva muy útil para el procesamiento de cantidades ingentes de información. Como resultado de las consideraciones expuestas, surge el objetivo principal del

presente proyecto de tesis, que es el desarrollo de una metodología para la gestión a largo plazo en un entorno BIM de los *Sistemas COoperativos Enriquecidos [ECO-Systems]* de monitorización estructural, que se enmarca dentro de los temas del *noveno objetivo sostenible – Industria, innovación e infraestructuras*.

El *ECO-sistema de monitorización* está concebido como un entorno abierto que necesita aportaciones continuas para mantener su orden. Éstas aportaciones estarán representadas por información actualizada y actualizable, para que el ECO-sistema funcione correctamente. Por lo tanto, a la hora de organizar un sistema BIM de gestión de instalaciones es imprescindible establecer claramente los procedimientos de implementación y gestión de datos, es decir, definir el llamado *Entorno Común de Datos [Common Data Environment – CDE]*. Así, la metodología propuesta avanza hacia una estandarización de los procedimientos de modelización del entorno construido existente, siendo al mismo tiempo fácilmente adaptable a la modelización *ex-novo*, simplemente dejando de lado la etapa de levantamiento integrado inicial.

Los ECO-sistemas de vigilancia se configuran así como sistemas cuyos datos de entrada proceden de las operaciones de vigilancia, tanto si éstas se realizan de forma predominantemente analógica como si son casi totalmente digitales.

El objetivo secundario del presente trabajo es, pues, la generación, al final de cada etapa de modelización, de modelos BIM abiertos debidamente mapeados y, por tanto, fácilmente asequibles para un intercambio de información eficaz que se enmarca en los temas del *decimoséptimo objetivo sostenible – Asociación para el Objetivo*.

Un enfoque consolidado de Scan-to-BIM suele implicar primero el estudio de la estructura y el paisaje circundante sobre el que desarrollar un modelo BIM. Por ello, se propone un marco para la estandarización de algunas prácticas bien y mal conocidas implementadas en este proceso para poder trazar las fuentes de datos y la calidad de su reproducción a lo largo de todo el proceso de modelado. La metodología Scan-to-BIM testada, que emplea el paquete de software de Autodesk, se entiende como una buena práctica operativa y puede organizarse en seis pasos secuenciales: (1) *Levantamiento tridimensional [3DS]*; (2) *Georreferenciación [GEO]*; (3) *Modelado federado y establecimiento de coordenadas compartidas [FSC]*; (4) *Modelado estructural [STR]*; (5) *Mejora del nivel de información [LOI]*; (6) *Exportación de modelos BIM abiertos [IFC]*. Cada paso del flujo de trabajo propuesto es necesario para el posterior, pero se mantiene actualizable gracias al entorno BIM. El modelado del patrimonio existente no suele ser un proceso sencillo y, en algunos casos, puede ser iterativo, de ahí la necesidad de repetir algunos pasos o, al menos, de intercambiar algunos de ellos. Cabe destacar que la fase de LOI está presente en diferentes niveles, siendo una constante a lo largo de todo el proceso, tanto si se realiza manualmente como a través de scripts VPL, rellenando parámetros *ad-hoc* con distintos tipos de información.

Como se ha mencionado anteriormente, la segunda parte de la tesis aborda la digitalización del patrimonio infraestructural italiano, que, hasta la fecha, parece haber sido abandonado, faltando por lo general la planificación del mantenimiento o incluso estando completamente abandonado. Las obras de infraestructura se rememoran esporádicamente, lamentablemente en ocasión de eventos catastróficos, que desgraciadamente parecen ser el único catalizador para impulsar cambios legislativos, lo que ha llevado al imperativo actual de introducir un sistema digital para la gestión de los puentes, viaductos y pasos elevados italianos. Por lo tanto, el caso de estudio del viaducto Olivieri que se presenta en los siguientes capítulos, se refiere a la creación de un *Sistema de Gestión de Puentes [BMS]* optimizado, destinado a convertirse en un marco para la *Monitorización de la Salud Estructural [SHM]* de la infraestructura de puentes italiana.

La información es la clave para una gestión eficaz de los puentes; por lo tanto, un módulo esencial de un sistema de gestión es el modelo de información. Las bases de datos están en el centro del módulo y, en última instancia, configuran la esencia y la calidad de todas las decisiones y acciones consideradas por el BMS. La incorporación de la visualización a la gestión de bienes proporciona una benéfica ayuda cognitiva para procesar cantidades masivas de información. Esto puede lograrse mediante el *Modelado de Información de Puentes [BrIM]*, que no es sólo una representación geométrica de los puentes, sino que es sobre todo un modelo virtual

inteligente en tres dimensiones del puente, ya que recoge toda la información sobre cada componente durante todo su ciclo de vida. Este modelo permite mejorar la calidad y la precisión de los planos, así como la constructibilidad, y favorece la colaboración.

Por lo tanto, cabe realizar un análisis exhaustivo de los aspectos normativos nacionales e internacionales relativos a los protocolos de inspección e identificación de criticidades estructurales para puentes e infraestructuras elevadas. El análisis se ha centrado particularmente en los aspectos internacionales de una selección de países elegidos, ya sea porque constituyen un punto de referencia normativos para los demás países o porque forman parte de los estudios realizados por la doctoranda. En efecto, Estados Unidos propone una estructura normativa articulada entre distintos documentos que ofrecen una visión de conjunto de las distintas figuras profesionales que intervienen en el análisis y desarrollo de un plan de mantenimiento, constituyendo así una referencia cultural para muchos países. España y Argentina, por su parte, si bien incorporan ciertos conceptos propios de los marcos normativos *latinos*, presentan diferencias sustanciales cuyo análisis resalta cómo las herramientas de representación y modelización de la información deben adaptarse a peculiaridades operativas que pueden variar ampliamente incluso entre entornos culturalmente cercanos. Posteriormente, se ha realizado una amplia revisión bibliográfica sobre el estado de la técnica en lo que respecta a la aplicación de la metodología BIM a la digitalización de los activos de infraestructura – en particular, puentes, viaductos y pasos elevados – y los datos relativos a las prácticas de inspección destinadas a la definición de los procedimientos de supervisión y mantenimiento, seguida de un análisis de la evolución del sistema normativo italiano pertinente a partir de la década de 1960 hasta la aplicación más reciente de las *Líneas Guías para la Clasificación y Gestión de Riesgos, la Evaluación de la Seguridad y la Supervisión de los Puentes Existentes* emitidas en 2020.

La primera fase experimental consistente en la actualización de la base de datos de información del Viaducto Olivieri se inició con una campaña de reconocimiento del puente y del valle subyacente con el fin de elaborar una primera modelización de la infraestructura en su contexto urbanizado, para extrapolar los planos técnicos actualizados del sistema complejo. La campaña de reconocimiento se llevó a cabo en el marco del proyecto *CUR_CIS2020 Metodologías para la evaluación puntual del riesgo hidrogeológico en zonas fuertemente pobladas y herramientas para las estrategias de desarrollo regional – Aplicación al caso de estudio Corredor Estratégico de Infraestructuras [CIS] a nivel regional; analizando el tramo de la autopista Salerno-Cava de' Tirreni – A3 Nápoles-Salerno y otras infraestructuras viarias aguas abajo*. El objetivo del proyecto se centra en los procedimientos para procesar e integrar diversos tipos de datos 2D y 3D en un entorno SIG. En concreto, el estudio fue realizado por los grupos de *geomática* y de *levantamiento y representación* del *Laboratorio Modelli – Surveying and Geo-Mapping for Environment and Cultural Heritage*, del Departamento de Ingeniería Civil [DICIV] de la Universidad de Salerno.

Dada su relevancia, el viaducto Olivieri y el contexto urbano que lo rodea aparecieron como el caso de estudio perfecto para desarrollar una metodología operativa para la digitalización masiva tanto de la geometría estructural como del estado de conservación relativo de las estructuras infraestructurales pertenecientes a la categoría de "puentes viaductos y pasos elevados" situados a lo largo de la autopista A3, en el marco del acuerdo entre el C.U.G.R.I. [*Consorzio inter-Universitario per la previsione e prevenzione dei Grandi Rischi – Consorzio interuniversitario para la previsión y prevención de grandes riesgos*] y la empresa *Autostrade Meridionali* [SAM] relativo a la puesta en marcha del *Servicio de vigilancia de las grandes infraestructuras de la autopista A3 Nápoles-Pompei-Salerno – de acuerdo con las circulares del Ministerio de Obras Públicas núm. 6736/61 de 19.7.67 y n° 34233 de 25.02.1991- y las actividades de apoyo relacionadas, como las pruebas técnicas no destructivas, los ensayos de laboratorio, etc.* A continuación, se presentan los procedimientos validados y optimizados para el intercambio de información relativa tanto al registro como a los datos de catalogación de la infraestructura, así como los modelos en formato abierto que sirvan de base para seguir mejorando el nivel de conocimiento de la propia estructura. La masa de datos así producida se organiza para

introducirla en el BMS desarrollado por los técnicos informáticos de la C.U.G.R.I., en el cual se archiva de acuerdo con los preceptos normativos.

Se han introducido los parámetros compartidos *Enlace Ficha* [*Link Scheda*] y *CódigoGlobalEstructura* [*CodiceOperaGlobale*] que contendrían, respectivamente, un enlace funcional al directorio del BMS que alberga el formulario de inspección relleno para cada componente, y un identificador único para cada componente necesario para organizar la alimentación de datos sin errores relativos a cada componente según la nomenclatura, la numeración y la catalogación realizadas en el entorno BIM. A continuación, se prevé una fase de reimportación de los datos resultantes de las inspecciones detalladas – resumidos por el *Indicador Relativo de Defectuosidad* [Dr] calculado por el BMS – al entorno BIM editable, Autodesk Revit [fase de enriquecimiento del LOI]. El modelo BrIM se convierte así en un repositorio totalmente actualizado que alberga el estado de salud de los modelos de infraestructura, a través del cual también es posible ofrecer una visualización gráfica avanzada de los datos sintéticos agrupados, por ejemplo, en las Clases de Atención [CdA] impuestas por la normativa.

Como se explica en la tercera parte, muchos investigadores ya han señalado la necesidad de integrar los actuales procedimientos de Monitorización de la Salud Estructural [SHM], incluyendo, pero no limitándose, a los *Sistemas de Gestión de Puentes* [BMS], con los datos procedentes de los sensores, tanto en términos de instrumentos de medición conectados a un Gemelo Digital del activo físico a través del llamado *Internet de las Cosas* [IoT] como de los datos del levantamiento tridimensional. De hecho, para el mantenimiento preventivo y sistemático de las estructuras, las inspecciones visuales periódicas son esenciales para detectar los defectos estructurales en una fase temprana e iniciar las intervenciones necesarias. Las tecnologías modernas, como los sistemas de vehículos aéreos no tripulados [VANT] equipados con cámaras de alta resolución, contribuyen cada vez más al proceso de inspección y a la documentación asociada. Además, los métodos de procesamiento y los modelos de datos vinculados permiten una gestión eficaz de los datos.

Conjuntamente a la relevancia histórica del caso de estudio que se propone a continuación, se ha elegido el Templo de Neptuno en Paestum, – uno de los artefactos de origen griego mejor conservados de Italia – por la posibilidad de llevar a cabo aplicaciones experimentales a partir de la ya rica base de datos existente construida a lo largo de más de una década. Además, se ha implementado posteriormente información adicional procedente del innovador sistema de monitorización sismométrica – cuyos puntos de medición están situados en la cornisa de la columnata exterior del Templo de Neptuno y en las arquetas de recopilación de datos cerca de la estilóbata. El primer levantamiento con escáner láser, crucial en este caso para el modelado Scan-to-BIM, se remonta a 2011. Posteriormente, el conocimiento del sitio se actualizó en varias ocasiones, principalmente con levantamientos fotogramétricos orientados a la adquisición de datos materiales, el más actualizado de los cuales, diseñado para adquirir información tanto el templo como el contexto circundante con un buen nivel de detalle, se llevó a cabo en 2017. El levantamiento fotogramétrico realizado en 2020 se centró, a su vez, en el levantamiento de la zona que rodea al templo de Neptuno, habiéndose solicitado debido a las nuevas excavaciones realizadas con motivo de la colocación del sistema de monitorización sismométrica.

La red del sistema de monitorización se compone, entre otros aparatos específicos, de instrumentos de medición experimentales – *Péndulo Plegado UNISA*, sismómetros desarrollados y patentados por el *Grupo de Investigación en Física Aplicada* de la Universidad de Salerno dedicado al estudio de las ondas gravitacionales – colocados bajo la supervisión de los coordinadores científicos: el profesor Luigi Petti (Departamento de Ingeniería Civil – Universidad de Salerno) y el director del *Parque Arqueológico de Paestum y de Velia* el arqueólogo Gabriel Zuchtriegel. Debido a que BIM trabaja con un sistema de referencia cartesiano, al vincular una nube de puntos en formato RCP georreferenciada a un proyecto Revit, ésta se desplazará automáticamente hacia el nuevo origen interno, borrando los valores de coordenadas anteriores. Por otro lado, cuando se fuerza la generación de las instancias BIM en su lugar mediante scripts VPL, con el fin de mantener las coordenadas geográficas, se producen fallos de aproximación en los objetos re proyectados, sobre todo en el caso de mesh

y surgirán posteriormente problemas de visualización y modelado. Por lo tanto, teniendo en cuenta los problemas relacionados con el empleo de un sistema de coordenadas topográficas dentro de un entorno BIM, para configurar el entorno compartido [FSC] del ECO-Sistema de Vigilancia del Templo de Neptuno fue necesario realizar una traslación del sistema de referencia global al local tanto en las nubes de puntos fotogramétricas -directamente dentro del entorno Agisoft Metashape restando una cantidad fija a los valores x , y y z de los GCP- como en la nube de puntos integrada utilizada como referencia para la posterior aplicación Scan-to-BIM. A continuación, se modelaron familias estructurales totalmente paramétricas desde cero y se colocaron en el proyecto BIM utilizando la nube de puntos integrada como referencia.

Aunque el propósito a largo plazo de un modelado BIM es estandarizar el mayor número de elementos posible, cuando el objeto a modelar es único, como en el caso del contexto urbano, que suele ser diferente y distintivo de cualquier bien, el objetivo debe centrarse en estandarizar el proceso para reproducirlo de la forma más auténtica, para su posterior estudio en profundidad. Por ello, las aplicaciones metodológicas propuestas en la tercera parte implican dos flujos de trabajo desarrollados para reproducir mesh fotogramétricas texturizadas del contexto urbano, y algunas áreas de interés detalladas dentro de un entorno BIM, mediante la parametrización de los propios componentes del modelo de la mesh, sus caras triangulares. En particular, el primer procedimiento puede potenciarse aún más mediante materiales de *Physically Based Rendering* [PBR], generando los mapas avanzados como resultado del proceso fotogramétrico; mientras que el segundo puede resultar útil cuando el objetivo de la aplicación es una reproducción precisa de las áreas seleccionadas para futuras evaluaciones cualitativas y cuantitativas. El objetivo es, en efecto, salvar la distancia entre el tipo de detalle que puede alcanzar un levantamiento, precisamente fotogramétrico, cuando se habla de los datos colorimétricos, y lo que es posible reproducir en un entorno BIM cuando se habla de elementos distintivos, si no únicos, como el contexto urbano o elementos relevantes detallados, como frisos/decoraciones o zonas dañadas.

Los dos flujos de trabajo procedimentales que se presentan a continuación -definidos como *flujo de trabajo A* y *B* en aras de la simplicidad- son a todos los efectos enfoques Mesh-to-BIM. Por lo tanto, para su aplicación efectiva, es necesario llevar a cabo algunas acciones preliminares en el modelo mesh estudiado. La simplificación de la mesh es una práctica habitual para minimizar el tamaño del modelo reduciendo el número de triángulos y conservando la forma, el volumen y los contornos. Los criterios para la decimación de mesh son generalmente definidos por el usuario, seleccionando el método de reducción (trabajando sobre el número de vértices, aristas o caras) y el objetivo de reducción, de hecho, varios programas comerciales y de código abierto de edición y modelado incluyen un módulo de simplificación de mesh para manejar eficientemente esta tarea de post-procesamiento. Por lo tanto, en el caso de un ordenador portátil medio (Core i7 16GB de RAM, 2GB GPU) para poder procesar los scripts desarrollados y gestionar los resultados, es aconsejable mantener el recuento de triángulos de la mesh por debajo de las 600'000 unidades, para el primer método propuesto, y por debajo de las 20'000 unidades, para el segundo, simplificando y fraccionando en más de un proyecto el modelo original de la mesh fotogramétrica (a través de Agisoft Metashape y ISTI-CNR MeshLab). Finalmente, la red de monitorización formada por los sensores sismométricos colocados entre finales de 2020 y principios de 2021 se modeló también mediante familias MEP desarrolladas *ad-hoc* con un nivel de detalle geométrico menor - LOG 200 (puramente volumétrico). Posteriormente, la base de datos de información relacionada con los instrumentos de medición y los datos de monitorización en tiempo real disponibles hasta la fecha se vincularon al modelo MEP a través de un script VPL [Script 10] customizado en esta red sismológica específica. La plena comprensión y utilización de las señales de los sismómetros aún está en evaluación, ya que la red está todavía en fase de rodaje, por lo que la interfaz BIM tenía que ser diseñada para ser suficientemente flexible y actualizable. Para ello, se ha diseñado explícitamente el script para posibles actualizaciones futuras del sistema de monitorización, eligiendo Microsoft Excel como base de datos de origen y automatizando aún más la implementación de posibles nuevos descriptores del sistema definidos como

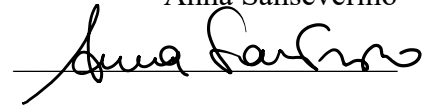
parámetros compartidos [Script 9]. Además, las imágenes vinculadas útiles para comprender mejor el sistema se han puesto a disposición en línea a través de una carpeta de Google Drive compartida abiertamente.

En cuanto al primer caso de estudio propuesto, el mayor reto era simplificar y optimizar el procedimiento para la implantación efectiva de modelos tipo BIM en los procesos de catalogación e inspección de puentes, viaductos y pasos superiores existentes, de forma que se convirtiera en una herramienta válida de apoyo y no en una barrera para los técnicos del C.U.G.R.I., que no son expertos en el campo del modelado de información tridimensional. Por otra parte, la confrontación directa con expertos especializados en diseño y monitoreo de estructuras permitió a quien escribe llenar algunas lagunas técnicas y a la vez recibir una valiosa retroalimentación en tiempo real.

Por otro lado, la segunda aplicación mostró cómo la gestión del patrimonio existente no puede separarse de una investigación precisa del estado de conservación de los materiales y de una reconstrucción 3D detallada. La reconstrucción morfológica y colorimétrica de estructuras complejas, elementos y zonas específicas dañadas en el entorno BIM es esencial para el desarrollo de bases de datos que permitan almacenar datos y facilitar la planificación de las reformas y, en general, de cualquier actividad de intervención sobre el bien en estudio. Por otra parte, si la integración de datos basados en sensores se convierte en una práctica habitual para los procedimientos de supervisión, esta práctica optimizará sin duda las evaluaciones de conservación, señalando con precisión los cambios en la geometría y la textura del bien, simplemente comparando los datos de levantamiento actualizados con el bien modelado a intervalos regulares.

Fisciano, lì 02/01/2023

Anna Sanseverino

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Anna Sanseverino', written over a horizontal line.