

Digital Twins per il monitoraggio e la gestione del costruito: un approccio integrato

Just Accepted: May 26, 2025 Published: November 06, 2025

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Spartaco Paris¹, <https://orcid.org/000-0003-4244-8105>
Vincenzo Gattulli¹, <https://orcid.org/0000-0002-5336-3687>
Roberto Bianchi¹, <https://orcid.org/0000-0001-6318-3711>
Elisa Pennacchia², <https://orcid.org/0000-0001-8775-9711>
Cecilia Rinaldi¹, <https://orcid.org/0000-0003-4178-1467>
Marianna Crognale¹, <https://orcid.org/0000-0002-2190-1866>

spartaco.paris@uniroma1.it
vincenzo.gattulli@uniroma1.it
roberto.bianchi@uniroma1.it
elisa.pennacchia@uniroma1.it
cecilia.rinaldi@uniroma1.it
marianna.crognale@uniroma1.it

¹ Dipartimento di Ingegneria strutturale e geotecnica, Sapienza Università di Roma, Italia

² Dipartimento di Architettura e Progetto, Sapienza Università di Roma, Italia

Abstract. Nell'ambito delle opportunità di trasferimento tecnologico promosse dalla terza missione della ricerca, il contributo illustra l'attività di una start-up Sapienza impegnata in un progetto finanziato sugli ecosistemi d'innovazione territoriale, TECNODIGIT, co-finanziato dal PNRR. La ricerca applicata esplora l'uso innovativo dei Digital Twin in ingegneria civile e architettura attraverso due casi studio: l'infrastruttura dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso e l'Esedra nei Musei Capitolini nella quale è esposto il monumento equestre di Marco Aurelio. Integrando sensori IoT e modelli BIM, il progetto mira a sviluppare metodologie avanzate per il monitoraggio automatizzato, la manutenzione e l'ispezione del costruito. Selezionato da Rome Technopole, il progetto combina automazione, analisi in tempo reale e machine learning, contribuendo alla digitalizzazione del settore delle costruzioni.

Parole chiave: Imprenditorialità accademica; Sustainable built environment; Digital twin; Structural Health monitoring; Energy.

Introduzione

Il trasferimento di tecnologie e conoscenze costituisce un elemento strategico per ridurre il divario tra ricerca accademica e applicazioni industriali, promuovendo l'innovazione e accrescendo la competitività dei settori produttivi. Nell'ambito dell'imprenditorialità accademica, strumenti quali brevetti, spin-off, start-up, innovation center e incubatori rivestono un ruolo fondamentale nella valorizzazione dei risultati della ricerca, favorendone lo sviluppo e l'applicazione in contesti esterni alle istituzioni universitarie e determinando competitività e crescita economica.

Digital Twins for Monitoring and Managing the Built Environment: An Integrated Approach

Abstract. Within the framework of technology transfer opportunities promoted by the third mission of research, this paper presents the activities of a Sapienza start-up engaged in a funded project on territorial innovation ecosystems, TECNODIGIT, co-financed by the PNRR. The applied research explores the innovative use of Digital Twins in civil engineering and architecture through two case studies, namely the infrastructure of the Gran Sasso National Laboratories, and the Esedra in the Capitoline Museums, where the equestrian monument of Marcus Aurelius is exhibited. By integrating IoT sensors and BIM models, the project aims to develop advanced methodologies for automated monitoring, maintenance, and inspection of the built environment. Selected by Rome Technopole, the project combines automation, real-time analysis, and machine learning, contributing to the digitalisation of the construction sector.

Questa dinamica trova applicazione anche in settori tradizionalmente meno inclini all'innovazione, come quello delle costruzioni, che negli ultimi anni ha iniziato a integrare soluzioni digitali tecnologicamente avanzate per la gestione del costruito (Carpo, 2017; Ortega, 2017). L'introduzione del *Building Information Modeling* (BIM) ha agito da trampolino di lancio verso l'impiego di paradigmi digitali avanzati, capaci di ottimizzare costi, semplificare processi complessi e fornire strumenti utili a tutta la filiera della costruzione, nonché agli utenti finali. Il BIM viene definito dalla UNI EN ISO 19650-1:2018 come «uso di una rappresentazione digitale condivisa di un bene costruito per facilitare i processi di progettazione, costruzione e gestione, al fine di formare una base affidabile per le decisioni».

Le tecnologie digitali e la loro interazione costituiscono i principali motori della cosiddetta Edilizia 4.0 (Bai *et al.*, 2020; Ciribini *et al.*, 2019; Grabowska *et al.*, 2022; Ikudayisi *et al.*, 2023; Mateev, 2020; X. Wang *et al.*, 2023), con l'adozione di strumenti come l'intelligenza artificiale (AI), l'apprendimento automatico (ML), le tecnologie semantiche, l'analisi dei *Big Data*, la *Blockchain*, l'*Internet of Things* (IoT) e il Cloud computing. Parallelamente alla quinta rivoluzione industriale, si inizia ora a parlare di Edilizia 5.0, un modello che promuove la trasparenza delle informazioni, l'inclusività dei processi, la decentralizzazione decisionale, la continuità nei flussi di dati, l'automazione, l'interconnessione e l'interoperabilità tra le tecnologie (Iku-

Keywords: academic entrepreneurship; sustainable built environment; digital twin; structural health monitoring; energy.

Introduction

The transfer of technology and knowledge is a strategic driver for narrowing the gap between academic research and industrial applications, fostering innovation, and enhancing the competitiveness of productive sectors. Within the realm of academic entrepreneurship, mechanisms such as patents, spin-offs, start-ups, innovation centres, and incubators play a crucial role in leveraging research outcomes, facilitating their development and application beyond academic institutions, and contributing to economic growth and competitiveness.

This dynamic is also evident in sectors traditionally less receptive to innovation, such as the construction industry,

which in recent years has begun to incorporate technologically advanced digital solutions to manage the built environment (Carpo, 2017; Ortega, 2017).

The introduction of Building Information Modelling (BIM) has served as a springboard for the adoption of advanced digital paradigms, capable of optimising costs, streamlining complex processes, and providing effective tools for the entire construction supply chain, as well as for end users. BIM is defined by UNI EN ISO 19650-1:2018 as the “use of a shared digital representation of a built asset to facilitate design, construction and operation processes to form a reliable basis for decisions.”

Digital technologies and their interplay constitute the primary drivers of the so-called Construction 4.0 (Bai *et al.*, 2020; Ciribini *et al.*, 2019;

dayisi *et al.*, 2023; X. Wang *et al.*, 2023; Trombadore *et al.*, 2023). Per affrontare queste sfide, è necessario sviluppare strumenti innovativi che orientino il settore verso una transizione digitale, in grado di generare impatti positivi sia sul piano sociale che economico.

In questo contesto si inserisce l'attività svolta dalla *start-up* BEST Design S.r.l. di Sapienza che mira a ottimizzare la gestione dell'ambiente costruito attraverso lo sviluppo e l'applicazione di tecnologie digitali avanzate. Attraverso la creazione di rappresentazioni digitali accurate e dinamiche delle strutture fisiche, il progetto sviluppa metodologie e tecnologie per i processi di monitoraggio, manutenzione e gestione complessiva, garantendo sicurezza, efficienza e sostenibilità.

La *start-up* ha focalizzato il suo lavoro sulla realizzazione di modelli BIM, che ha permesso di ottimizzare la progettazione e la gestione delle informazioni relative agli edifici, migliorando la collaborazione tra i vari attori coinvolti nei progetti e riducendo al minimo gli errori durante le fasi di costruzione. Inoltre, BEST Design ha condotto attività sperimentali fondamentali per una maggiore conoscenza di edifici e infrastrutture esistenti, tra cui misure sperimentali, prove di caratterizzazione dinamica e analisi modali operazionali. Questi approcci, integrati con il BIM, hanno arricchito la conoscenza e la gestione delle strutture esistenti, fornendo un quadro preciso delle loro performance e potenzialità.

L'innovazione derivante dalle attività della *start-up* ha contribuito in modo significativo al progresso delle condizioni tecnologiche, generando di conseguenza rilevanti benefici economici e sociali per enti pubblici (quali municipalità, Area Gestione Edilizia dell'Università Sapienza, strutture ospedaliere) e pri-

vati (ad esempio studi di architettura e ingegneria). Attraverso l'ottimizzazione dei processi di gestione del patrimonio costruito, tali innovazioni hanno consentito una gestione più efficiente delle risorse, sia in fase di costruzione che in fase di manutenzione degli edifici, per una maggiore sostenibilità.

Dall'integrazione di questi *know-how*, che combinano il BIM con l'analisi e l'interpretazione dei dati raccolti direttamente dalle strutture, BEST Design ha visto la sua naturale evoluzione verso la realizzazione di *Digital Twin* (DTw), un passo fondamentale per l'ottimizzazione della gestione operativa e della manutenzione predittiva delle infrastrutture (Davila Delgado and Oyedele, 2021; Mahmoodian *et al.*, 2022). Il DTw, definito dalla ISO/IEC 30173:2023 come "Rappresentazione digitale di un'entità target con connessioni dati che consentono la convergenza tra gli stati fisico e digitale a un tasso di sincronizzazione appropriato", consente di ottenere una visione dinamica delle performance delle strutture e degli impianti, migliorando la loro gestione operativa.

Il percorso di crescita di BEST Design è stato ulteriormente rafforzato dalla partecipazione a progetti di ricerca, come il progetto TECNODIGIT, finanziato dal Bando a cascata Sapienza per progetti collaborativi di ricerca nell'ambito di Rome Technopole (Spoke 1 e 6). Il progetto, coinvolgendo le due università abruzzesi dell'Aquila e di Chieti-Pescara, e tre società con il coordinamento di BEST Design, mira a sviluppare un sistema di Digital Twin per ottimizzare la gestione del costruito, migliorando la sostenibilità energetica e ambientale degli edifici, monitorando in tempo reale la sicurezza delle strutture e fornendo analisi dinamiche per la gestione operativa.

Grabowska *et al.*, 2022; Ikudayisi *et al.*, 2023; Mateev, 2020; X. Wang *et al.*, 2023), characterised by the adoption of tools such as Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), semantic technologies, Big Data analytics, Blockchain, the Internet of Things (IoT), and Cloud computing. In parallel with the Fifth Industrial Revolution, the concept of Construction 5.0 is beginning to emerge – a model that promotes information transparency, inclusive processes, decentralised decision-making, continuous data flows, automation, interconnectivity, and interoperability among technologies (Ikudayisi *et al.*, 2023; X. Wang *et al.*, 2023; Trombadore *et al.*, 2023). Addressing these challenges requires the development of innovative tools, which can guide the sector through a digital transition capable of generating positive social and economic impacts.

In this context, the activities of the Sapienza start-up BEST Design S.r.l. aim to optimise management of the built environment through the development and application of advanced digital technologies. By creating accurate and dynamic digital representations of physical structures, the project develops methodologies and technologies for monitoring, maintenance, and overall management processes, ensuring safety, efficiency, and sustainability. The startup focused its efforts on the development of BIM models, which enabled optimisation of design processes and the management of building-related information, thereby enhancing collaboration among the various stakeholders involved in projects, and minimising errors during the construction phases. In addition, BEST Design carried out fundamental experimental activities aimed at

improving the understanding of existing buildings and infrastructures, including experimental measurements, dynamic characterisation tests, and operational modal analyses. These approaches, when integrated with BIM, enriched the knowledge and management of existing structures, providing an accurate picture of their performance and potential.

The innovation resulting from the start-up's activities has significantly contributed to advancing technological capabilities, thereby generating substantial economic and social benefits for both public entities (such as municipalities, the Building Management Department of Sapienza University, and healthcare facilities), and private stakeholders (including architectural and engineering firms). By making the most of built heritage management processes, these inno-

vations have enabled a more efficient use of resources, both during the construction phase and in the maintenance of buildings, leading to greater sustainability. From the integration of such *know-how*, which combine BIM with the analysis and interpretation of data directly collected from structures, BEST Design has naturally evolved toward the creation of Digital Twins (DT), a crucial step for optimising operational management and predictive maintenance of infrastructures (Davila Delgado and Oyedele, 2021; Mahmoodian *et al.*, 2022).

The Digital Twin (DTw), defined by ISO/IEC 30173:2023 as «a digital representation of a target entity with data connections that enable convergence between the physical and digital states at an appropriate synchronisation rate», enables dynamic understanding of the performance of struc-

Metodologia

Lo sviluppo di *Digital Twins* per l'ambiente costruito segue un approccio articolato in più fasi, ciascuna fondamentale per garantire la creazione di modelli virtuali precisi e dinamici che riflettano fedelmente il comportamento e le performance degli edifici. La prima fase prevede l'implementazione della metodologia Building Information Modeling (BIM), che consente di creare un modello virtuale dettagliato dell'edificio. Questo approccio favorisce una collaborazione ottimizzata tra i team di progettazione, costruzione e gestione, migliorando la condivisione delle informazioni e riducendo al minimo gli errori durante il processo costruttivo.

Segue la fase di modellazione, durante la quale si sviluppano modelli fisici in grado di simulare il comportamento dell'edificio in tempo reale e di valutare diversi scenari di danno.

Successivamente, si integra l'*Internet of Things* (IoT), connettendo dispositivi e sensori all'interno dell'infrastruttura per lo scambio continuo di dati in tempo reale. Questa fase permette di monitorare e gestire l'ambiente costruito in modo efficiente e dinamico, raccogliendo informazioni vitali sulle condizioni strutturali e energetiche. Parallelamente, si sfrutta l'*Intelligenza Artificiale* (IA) e il *Machine Learning* (ML) per analizzare i dati raccolti, prevedere le prestazioni future e implementare strategie di manutenzione predittiva. Questi strumenti avanzati offrono insight utili per ottimizzare l'efficienza operativa e ridurre i costi.

La fase di integrazione e calibrazione dei modelli è cruciale per affinare le simulazioni, utilizzando i dati raccolti per ottimizzare la precisione delle previsioni. Una volta realizzati i digital twin, si implementa la fase di monitoraggio continuo, che consente

di raccogliere nuovi dati operativi, aggiornando e adattando i modelli alle condizioni effettive dell'edificio. Infine, l'analisi predittiva e l'ottimizzazione vengono utilizzate per testare scenari futuri, consentendo una gestione proattiva delle risorse energetiche e una manutenzione predittiva delle strutture.

Questo modello virtuale facilita l'ottimizzazione delle operazioni e la manutenzione automatizzata. L'uso di tecnologie come la Realtà Aumentata, Virtuale e Mista consente di creare esperienze immersive che migliorano la simulazione, la comunicazione e la visualizzazione delle informazioni in tempo reale. Inoltre, l'integrazione di Robotica e Automazione supporta l'automazione dei processi di costruzione e manutenzione e la gestione decentralizzata dei dati, contribuendo ad aumentare efficienza e sicurezza operativa.

Tuttavia, l'implementazione di un *Digital Twin* presenta alcune criticità legate alla gestione dell'infrastruttura digitale. Tra queste, la sicurezza dei server e la scelta tra soluzioni locali o cloud, entrambe con specifici vantaggi e rischi. È essenziale stabilire modalità di accesso sicure, con livelli di autorizzazione e protocolli adeguati alla protezione dei dati. Un ulteriore aspetto cruciale è il trasferimento efficiente dei dati verso una piattaforma *user-friendly*, che permetta all'utente finale di accedere a visualizzazioni intuitive dei dati già elaborati, facilitando così l'interpretazione dei risultati e il processo decisionale.

Un progetto pilota

Il progetto TECNODIGIT è stato l'unico selezionato tra le 19 proposte per Rome Technopole nell'ambito disciplinare dell'Ingegneria Civile e dell'Architettura, essendosi distinto per l'applicazione innovativa del DT sul costruito, combinando tec-

tures and systems, thereby enhancing their operational management. The growth trajectory of BEST Design has been further strengthened through its involvement in research projects, such as the TECNODIGIT project, funded by the Sapienza Cascade Call for collaborative research projects within the framework of Rome Technopole (Spokes 1 and 6). The project, which involves the two universities of Abruzzo – L'Aquila and Chieti-Pescara – and three companies under the coordination of BEST Design, aims to develop a Digital Twin system to optimise built environment management. Its objectives include improving the energy and environmental sustainability of buildings, enabling real-time structural safety monitoring, and providing dynamic analytics to support operational management.

Methodology

The development of Digital Twins for the built environment follows a multi-phase approach, with each phase being crucial to ensuring the creation of accurate and dynamic virtual models that faithfully reflect the behaviour and performance of buildings. The first phase involves implementation of Building Information Modelling (BIM) methodology, which allows for the creation of a detailed virtual model of the building. This approach promotes excellent collaboration among design, construction, and management teams, enhancing information sharing and minimising errors during the construction process.

The next phase is modelling, during which physical models are developed to simulate the building's behaviour in real-time, and to assess various damage scenarios. Subsequently, the Internet of Things (IoT) is integrated, con-

necting devices and sensors within the infrastructure to enable continuous real-time data exchange. This phase allows for efficient and dynamic monitoring and management of the built environment, collecting vital information on structural and energy conditions. In parallel, Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) are leveraged to analyse the collected data, predict future performance, and implement predictive maintenance strategies. These advanced tools provide valuable insights to optimise operational efficiency and reduce costs. The integration and calibration phase of the models is crucial for refining simulations, using the collected data to enhance the accuracy of predictions. Once the Digital Twins are created, continuous monitoring is implemented, allowing for the collection of new operational data, updating, and adapt-

ing the models to the actual conditions of the building. Finally, predictive analysis and optimisation are used to test future scenarios, enabling proactive energy resource management and predictive maintenance of structures. This virtual model facilitates optimisation of operations and the automation of maintenance activities. The use of technologies such as Augmented, Virtual, and Mixed Reality enables the creation of immersive experiences, which enhance simulation, communication, and real-time visualisation of information. Furthermore, the integration of Robotics and Automation supports the automation of construction and maintenance processes, as well as decentralised management of data, contributing to increased efficiency and operational safety. However, the implementation of a Digital Twin also presents several

nologie avanzate di automazione per ispezione, manutenzione e monitoraggio continuo delle strutture.

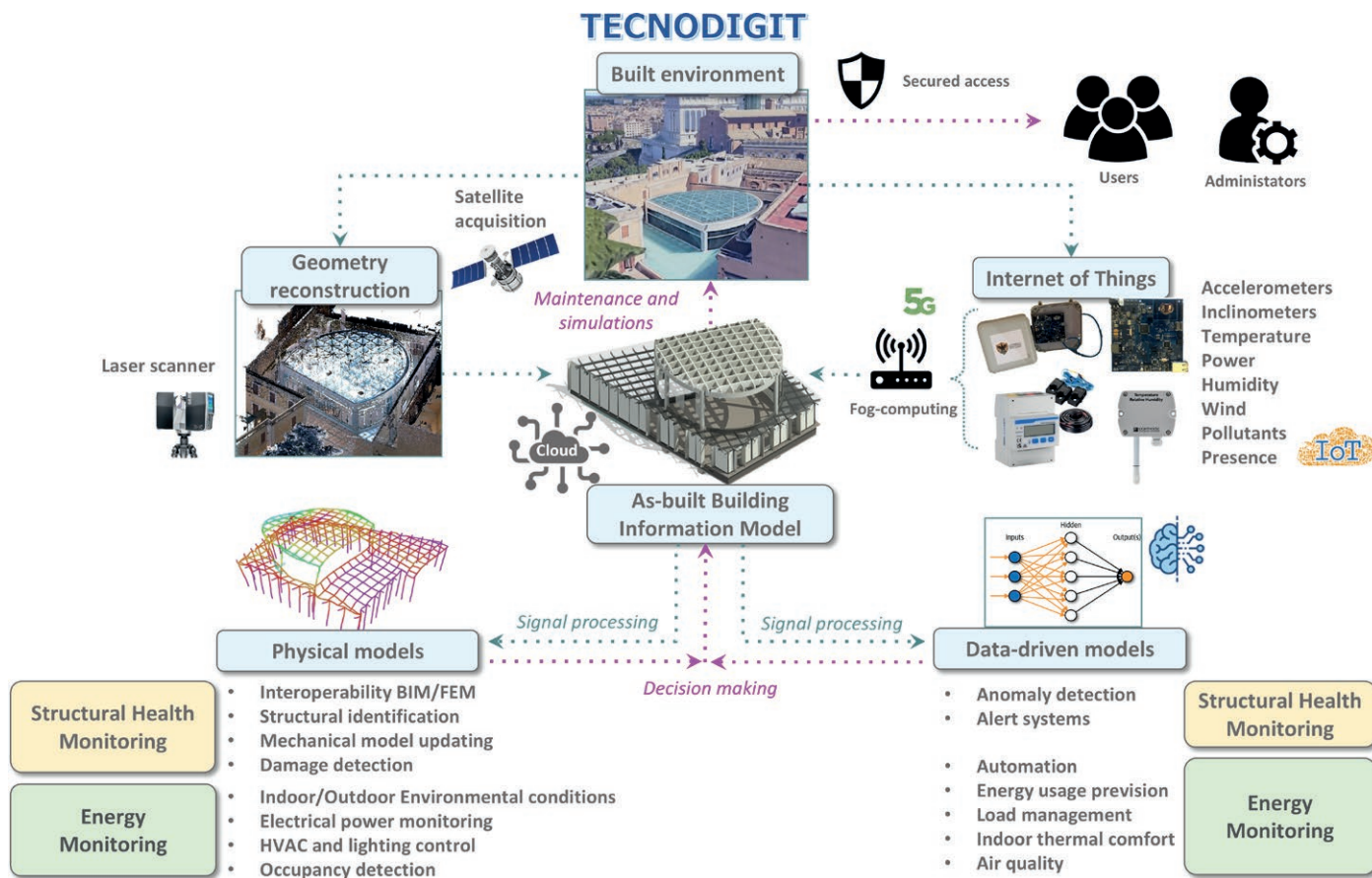
La proposta si concentra sull'adozione di un elevato livello di automazione, in grado di garantire un miglioramento significativo degli standard di utilizzo dei beni oggetto di studio. Il progetto si inserisce nel contesto della *twin transition*, sia digitale che energetica con un particolare focus sull'ottimizzazione delle strutture strategiche e sulla salvaguardia dei beni culturali. Il progetto intende perfezionare la tecnologia da laboratorio, con Technology Readiness Level (TRL) sperimentale 3/4, testandola in condizioni operative su casi studio reali, TRL 5/6. Scopo del progetto è quello di sviluppare soluzioni avanzate per l'ispezione, la manutenzione e il monitoraggio delle strutture edilizie, con particolare attenzione all'integrazione delle tecnologie automatizzate e al miglioramento delle performance strutturali ed energetiche.

Il Digital Twin dell'Esedra di Marco Aurelio

L'Esedra di Marco Aurelio, situata nel complesso dei Musei Capitolini, è un sito di enorme valore storico e culturale, che ospita la statua equestre dell'imperatore.

È una sala moderna progettata da Carlo Aymonino nel Palazzo dei Conservatori, in vetro e acciaio. Sostenuta da sei colonne circolari, presenta una cupola vetrata su due livelli, collegati da pannelli vetrati e sorretti da una trave ellittica.

Il progetto mira a dotare l'Esedra di un sistema di monitoraggio strutturale avanzato, integrando i dati in ambiente BIM per migliorare l'analisi e la gestione del patrimonio culturale (Fig. 1). La Soprintendenza dei Musei Capitolini supervisiona l'iniziativa, volta a sperimentare tecnologie digitali su edifici storici complessi. Per un rilievo geometrico preciso, è stata utilizzata la scansione laser 3D, generando una nuvola di punti e un modello BIM As-Built dopo un'attenta pianificazione delle acquisizioni (Fig. 2). Per monitorare la risposta strutturale dinamica dell'Esedra di Marco Aurelio, è stato installato un sistema di monitoraggio continuo basato su accelerometri MEMS triassiali, che misurano in tempo reale le vibrazioni della struttura. I dati raccolti vengono trasmessi a un nodo gateway centrale e resi accessibili da remoto tramite cloud. Questi dati vengono elaborati per stimare i principali parametri dinamici strutturali. Tale processo, noto come identificazione strutturale, consente di comprendere



il comportamento dinamico dell'edificio. Ogni struttura, infatti, è caratterizzata da un proprio comportamento vibratorio, descritto da frequenze naturali, forme modali e smorzamenti, che riflettono le sue proprietà fisiche. Variazioni nel tempo di tali parametri possono indicare l'insorgenza di anomalie o fenomeni di degrado, come l'allentamento di un nodo, la fessurazione di un elemento strutturale o una perdita localizzata di rigidità. In particolare, il monitoraggio delle frequenze naturali di vibrazione permette di rilevare in modo non invasivo informazioni cruciali sulla rigidità e sull'integrità dell'intera struttura.

Un elemento chiave di questa analisi è la densità spettrale di potenza (PSD), una funzione che rappresenta la distribuzione della potenza del segnale in funzione della frequenza. La PSD consente di individuare le frequenze dominanti attraverso i picchi presenti nello spettro, che corrispondono alle frequenze naturali della struttura. In Fig. 03 sono mostrati la serie temporale delle accelerazioni e la PSD relativi ai dati acquisiti dal sistema di monitoraggio implementato sull'Esedra. Le prime tre frequenze naturali della struttura sono chiaramente evidenziate dai picchi presenti nello spettro (3.03 Hz, 3.52 Hz e 4.78 Hz) (Fig. 3).

Le frequenze naturali identificate attraverso l'analisi dei dati vibrazionali forniscono informazioni fondamentali sul comportamento dinamico della struttura, costituendo la base per la calibrazione e l'aggiornamento di un modello fisico agli elementi finiti. Questo consente di individuare potenziali danni strutturali e di prevedere l'evoluzione del sistema nel tempo.

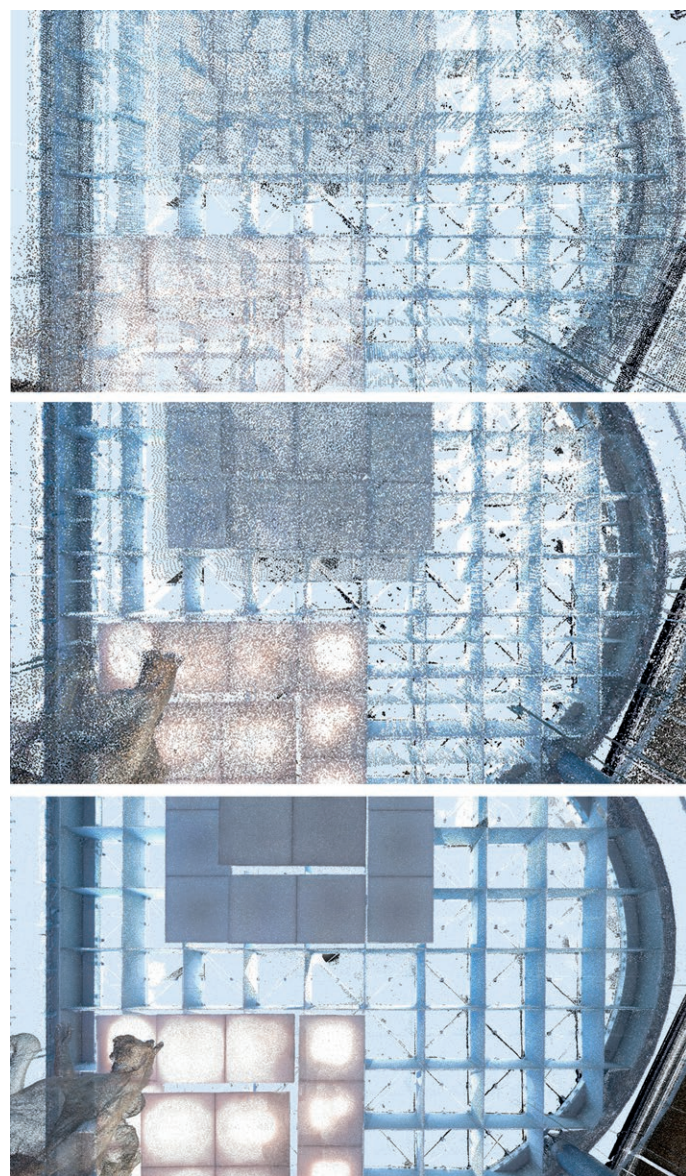
Parallelamente, una fase di apprendimento offline è prevista per addestrare modelli *data-driven* basati su tecniche di machine learning, finalizzati alla diagnosi della salute strutturale e

challenges related to the management of the digital infrastructure. These include server security and the choice between on-premises and cloud-based solutions, each of which entails specific advantages and risks. Establishing secure access protocols – with appropriate authorisation levels and data protection measures – is essential. Another crucial aspect is the efficient transfer of data to a user-friendly platform, allowing end users to access intuitive visualisations of processed data, thereby facilitating result interpretation and informed decision-making.

A Pilot Project

The TECNODIGIT project was the only proposal selected among 19 submissions for Rome Technopole within the disciplinary field of Civil Engineering and Architecture, having distinguished itself through the innovative

application of the Digital Twin to the built environment. The project combines advanced automation technologies for inspection, maintenance, and continuous monitoring of structures. The proposal emphasises the adoption of a high level of automation aimed at significantly improving the standards of use for the assets under study. It is framed within the broader context of the twin transition – both digital and energy-related – with a specific focus on optimising strategic infrastructures, and on preserving cultural heritage assets. The project aims to mature laboratory-based technology, currently at an experimental Technology Readiness Level (TRL) of 3/4, by testing it under real operational conditions with selected case studies, reaching TRL 5/6. The ultimate goal is to develop advanced solutions for the inspection, maintenance, and monitoring of



building structures, with particular attention to the integration of automated technologies and the enhancement of structural and energy performance.

The Digital Twin of the Esedra of Marcus Aurelius

The Esedra of Marcus Aurelius, located within the Capitoline Museums complex, is a site of outstanding historical and cultural significance, housing the emperor's equestrian statue. It is a modern hall designed by Carlo Aymonino within the Palazzo dei Conservatori, constructed in glass and steel. Supported by six circular columns, it features a glazed dome spanning two levels, connected by glass panels and sustained by an elliptical beam.

The project aims to equip the Esedra with an advanced structural health monitoring system, integrating the acquired data within a Building In-

formation Modelling (BIM) environment to enhance analysis and management of cultural heritage assets (Fig. 01). The initiative is overseen by the Superintendence of the Capitoline Museums, and serves as a pilot study for the application of digital technologies to complex historical buildings. For precise geometric surveying, 3D laser scanning was employed, producing a point cloud and an As-Built BIM model following a carefully planned acquisition campaign (Fig. 02).

To monitor the dynamic structural response of the Esedra of Marcus Aurelius, a continuous monitoring system was installed using triaxial MEMS accelerometers, which measure the structure's vibrations in real time. The data are transmitted to a central gateway node and made remotely accessible via a cloud-based platform. These data are processed to estimate key structural

alla pianificazione degli interventi di controllo. I dati etichettati relativi a possibili scenari di danno vengono generati utilizzando il modello fisico agli elementi finiti (Torzoni *et al.*, 2024).

Il *Digital Twin* dell'Esedra di Marco Aurelio integra questi dati all'interno del modello BIM, abilitando una visualizzazione accurata e un'analisi continua dello stato strutturale. L'aggiornamento dinamico del modello digitale supporta previsioni sull'evoluzione della struttura e ottimizza le strategie di manutenzione, grazie anche all'utilizzo del formato IFC, che garantisce l'interoperabilità tra i diversi sistemi coinvolti nel processo.

Il Digital Twin dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Il secondo caso di studio riguarda i Laboratori Nazionali del Gran Sasso, una struttura di ricerca situata in un contesto paesaggistico di grande rilevanza.

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso, situati a 1.400 metri di profondità, offrono un ambiente ideale per la ricerca scientifica grazie alla riduzione della radiazione cosmica. L'accesso avviene tramite un tunnel stradale, e il complesso comprende tre gallerie principali: la Galleria A per la fisica delle particelle, la Galleria B per l'astrofisica e la Galleria C per la fisica nucleare. BEST Design offre un'opportunità per migliorare le attività tecnico-ingegneristiche nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (in particolare nella galleria B), creando un'interfaccia digitale gemella dei laboratori sotterranei. Questo sistema integrerà dati provenienti da sensori altamente sensibili, capaci di rilevare minime variazioni dei parametri ambientali e strutturali, ottimizzando così la gestione delle attività nelle gallerie sotterranee.

Il laboratorio attraverso un progetto PNRR indipendente, presentato dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, ha potenzia-

to il sistema di monitoraggio strutturale, ambientale, sismico e idraulico, finalizzato al controllo e alla sicurezza dell'infrastruttura attraverso l'installazione ed il cablaggio di numerosi sensori. Il monitoraggio strutturale consentirà l'individuazione di fenomeni tenso-deformativi mediante l'impiego di celle di carico, martinetti piatti, barrette estensimetriche e clinometri biassiali. Il monitoraggio vibrometrico utilizzerà accelerometri per rilevare effetti sismici e disturbi derivanti da attività quotidiane, quali il transito di veicoli o l'apertura dei portoni, con il supporto di sensori laser per una registrazione precisa delle sollecitazioni. Il monitoraggio ambientale sarà rivolto all'analisi di fattori potenzialmente interferenti con le attività sperimentali, tra cui rumore, campi elettromagnetici, concentrazione di gas radon e microclima (temperatura e umidità), con sensori distribuiti in ogni sala. Infine, il monitoraggio idraulico controllerà le portate della rete di drenaggio tramite sensori installati nelle tubazioni, assicurando una gestione dinamica dei dati e la sicurezza del laboratorio.

Il sistema di monitoraggio prevede una rete di sensori cablati e centraline che trasmetteranno i dati a un centro di controllo, dove i risultati saranno visualizzati in tempo reale su una piattaforma web. La supervisione dei sottosistemi sarà centralizzata in un sistema SCADA, che integrerà i dati raccolti e sarà gestito da due sale controllo, situate rispettivamente in un centro direzionale e all'ingresso dei laboratori. Sensori climatici ottimizzeranno le condizioni ambientali, migliorando sicurezza, comfort ed efficienza energetica.

Una simulazione del processo di gestione dei dati è illustrata in Fig. 4. È stato sviluppato un sistema integrato che combina le potenzialità delle API di *Autodesk Platform Services* con

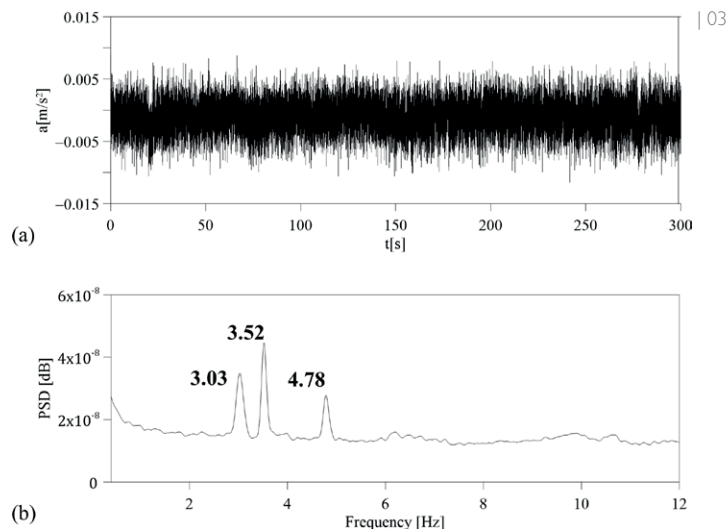
dynamic parameters. This process, known as structural identification, enables to understand the building's dynamic behaviour. Every structure exhibits a unique vibrational response, characterised by natural frequencies, mode shapes, and damping ratios, which reflect its physical properties. Temporal variations in these parameters may indicate the onset of anomalies or degradation phenomena, such as loosening of connections, cracking of structural elements, or localised loss of stiffness. In particular, monitoring natural vibration frequencies allows for the non-invasive detection of critical information on the structure's stiffness and overall integrity.

A key aspect of this analysis is the Power Spectral Density (PSD), a function representing the signal's power distribution as a function of frequency. The PSD facilitates the identification of

dominant frequencies through spectral peaks corresponding to the structure's natural frequencies. Figure 03 displays the acceleration time series and the corresponding PSD derived from the monitoring system installed on the Esedra. The first three natural frequencies of the structure are clearly identifiable as peaks in the spectrum (3.03 Hz, 3.52 Hz, and 4.78 Hz) (Fig. 03).

The natural frequencies identified from the vibration data analysis provide fundamental insights into the structure's dynamic behaviour, and form the basis for calibrating and updating a finite element (FE) physical model. This model enables the detection of potential structural damage, and supports forecasting the system's future evolution.

In parallel, an offline learning phase is planned to train data-driven models using machine learning techniques,





uno script Python ospitato su GitHub, progettato per acquisire e visualizzare i dati provenienti dai sensori installati all'interno della galleria. In particolare, il sistema è stato implementato per leggere e analizzare i dati relativi ai sensori di temperatura, rendendoli disponibili in tempo reale all'interno di un visualizzatore 3D interattivo, integrato nel modello digitale. L'integrazione di sensori IoT e BIM permette il monitoraggio in tempo reale delle infrastrutture, con visualizzazioni grafiche delle condizioni ambientali. Tale strumento si rivela utile per la gestione ottimale delle operazioni in galleria, grazie a una valutazione continua dei livelli di emissione di CO₂, dei parametri di LCA sia dei singoli componenti sia dell'intero sistema, con accesso ai dati garantito tramite una piattaforma cloud.

aimed at structural health diagnosis and the planning of control interventions. Labelled datasets representing possible damage scenarios are generated using the finite element model (M. Torzoni et al., 2024). The Digital Twin of the Esedra of Marcus Aurelius incorporates these data into the BIM model, enabling accurate visualisation and continuous analysis of the structural condition. Dynamic updating of the digital model supports predictive assessments of the structure's behaviour, enhancing maintenance strategies. It is further facilitated by the use of the IFC format, which ensures interoperability among the various systems involved in the process.

The Digital Twin of the Gran Sasso National Laboratories

The second case study focuses on the Gran Sasso National Laboratories, a

research facility located in a region of significant landscape value. Positioned 1,400 metres underground, the Gran Sasso National Laboratories offer an optimal environment for scientific research due to the attenuation of cosmic radiation. Access to the facility is provided through a road tunnel, and the complex consists of three main galleries: Gallery A for particle physics, Gallery B for astrophysics, and Gallery C for nuclear physics. BEST Design offers an opportunity to enhance the technical and engineering activities at the Gran Sasso National Laboratories (specifically in Gallery B) by creating a digital twin interface of the underground laboratories. This system will integrate data from highly sensitive sensors capable of detecting even the slightest variations in environmental and structural parameters, thereby optimising management of

Implicazioni culturali, pratiche e socio-economiche

edifici e ottimizzando i processi di costruzione e manutenzione. L'integrazione di tecnologie avanzate consente una gestione efficiente dei dati, riducendo costi operativi e migliorando l'utilizzo delle risorse. Il monitoraggio continuo permette di prevenire guasti, ridurre rischi operativi e incrementare la sicurezza, anche attraverso l'impiego di automi per compiti pericolosi o ripetitivi.

Un aspetto centrale del progetto è la sostenibilità, con strategie per la *carbon neutrality* e modelli predittivi che riducono

Il progetto di creazione di gemelli digitali del costruito apporta significativi benefici, prolungando il ciclo di vita degli

activities within the underground galleries. Through an independent PNRR project presented by the National Institute for Nuclear Physics, the laboratory has enhanced its structural, environmental, seismic, and hydraulic monitoring system, aimed at infrastructure control and safety through the installation and wiring of numerous sensors.

Structural monitoring will enable the identification of tensile-deformative phenomena through the use of load cells, flat jacks, strain gauges, and bi-axial inclinometers. Vibrometric monitoring will employ accelerometers to detect seismic effects and disturbances caused by daily activities, such as vehicle traffic or the opening of gates, supported by laser sensors for precise stress recording. Environmental monitoring will focus on analysing factors that may interfere with experimental activities,

including noise, electromagnetic fields, radon gas concentration, and microclimate (temperature and humidity), with sensors distributed in each room. Finally, hydraulic monitoring will track the flow rates of the drainage network through sensors installed in the pipes, ensuring dynamic data management and the safety of the laboratory.

The monitoring system consists of a network of wired sensors and control units, which transmit data to a control centre, where results are displayed in real time on a Web-based platform. Supervision of the subsystems is centralised within a SCADA system, which integrates the collected data and is managed from two control rooms located respectively at a management centre, and the entrance to the laboratories. Environmental sensors improve ambient conditions, enhancing safety, comfort, and energy efficiency.

le emissioni di CO₂ e ottimizzano l'efficienza energetica, migliorando la resilienza delle strutture ai cambiamenti climatici. Inoltre, l'uso di tecnologie digitali e IoT per la salvaguardia del patrimonio artistico favorisce la conservazione e l'accessibilità dei beni culturali. Il monitoraggio strutturale e ambientale, unito a soluzioni di realtà aumentata e virtuale, migliora la fruizione delle opere, garantendo al contempo una protezione più efficace del patrimonio storico e museale.

La digitalizzazione nel settore delle costruzioni migliora la gestione del patrimonio edilizio e promuove una cultura urbana più consapevole e partecipativa. L'uso di tecnologie come i *Digital Twin* aumenta la trasparenza nelle decisioni progettuali, favorendo la collaborazione tra professionisti e cittadini. La condivisione di dati consente a tutti gli attori, inclusi cittadini e amministrazioni, di monitorare sostenibilità e sicurezza. Inoltre, l'integrazione delle tecnologie digitali stimola nuove opportunità occupazionali, favorendo lo sviluppo di competenze innovative e migliorando il benessere economico della comunità. L'adozione di DTw e intelligenza artificiale implica rilevanti implicazioni etiche e giuridiche, in particolare rispetto alla responsabilità dei processi automatizzati, alla trasparenza informativa verso utenti non specializzati e all'affidabilità dei sistemi. È pertanto necessario garantire tracciabilità, verificabilità e criteri di accountability chiari, al fine di promuovere un impiego consapevole, sicuro e responsabile delle tecnologie.

Conclusioni e prospettive future

L'esperienza della *start-up* BEST Design e il progetto descritto hanno evidenziato il ruolo cruciale delle tecnologie digitali in ingegneria civile e ar-

chitettura, con applicazioni concrete nell'Esedra di Marco Aurelio e nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. L'integrazione di sensori IoT, modelli BIM, Machine Learning e Intelligenza Artificiale ha sviluppato un sistema di monitoraggio predittivo, migliorando la sicurezza, l'efficienza e la sostenibilità. Questo approccio rappresenta un passo importante verso la transizione digitale del settore, orientato a modelli più sostenibili e tecnologicamente avanzati.

Il progetto TECNODIGIT offre prospettive future promettenti, grazie all'evoluzione dei *Digital Twin* e all'uso crescente di IoT, AI e *Machine Learning* per migliorare la gestione delle infrastrutture. L'integrazione di realtà aumentata, virtuale e automazione ottimizzerà ulteriormente la progettazione, costruzione e gestione, rendendo l'intero ciclo di vita degli edifici più trasparente, efficiente e resiliente.

Il progetto offre soluzioni applicabili a settori come il patrimonio culturale, la gestione urbana e la riqualificazione edilizia, puntando a una pianificazione urbana integrata e inclusiva. L'uso dei dati in tempo reale permette una gestione delle infrastrutture adattata alle esigenze della popolazione, migliorando sicurezza e comfort. Inoltre, favorisce il coinvolgimento dei cittadini nella conservazione del patrimonio esistente. Per raggiungere questi obiettivi, è necessario un impegno continuo nella ricerca e nello sviluppo tecnologico, supportato da collaborazioni tra università, *start-up* e industria, con l'obiettivo di promuovere soluzioni sostenibili e sicure per tutti.

A simulation of the data management process is illustrated in Fig. 04. An integrated system has been developed combining the capabilities of Autodesk Platform Services APIs with a Python script hosted on GitHub, designed to acquire and visualise data from sensors installed inside the gallery. Specifically, the system is implemented to read and analyse temperature sensor data, making it available in real time within an interactive 3D viewer integrated into the digital model.

The integration of IoT sensors and BIM enables real-time monitoring of the infrastructure, providing graphical visualisations of environmental conditions. This tool proves useful for optimal management of gallery operations through continuous evaluation of CO₂ emission levels and Life Cycle Assessment (LCA) parameters, both for individual components and the entire

system, with data access ensured via a cloud platform.

Cultural, Practical, and Socio-Economic Implications

The project of creating digital twins of the built environment brings significant benefits, extending the life cycle of buildings and optimising construction and maintenance processes. The integration of advanced technologies enables efficient data management, reducing operational costs and improving resource utilisation. Continuous monitoring allows for the prevention of failures, the reduction of operational risks, and the enhancement of safety, including the use of automation for hazardous or repetitive tasks. A central aspect of the project is sustainability, with strategies aimed at achieving carbon neutrality and predictive models that reduce CO₂ emissions

and improve energy efficiency, thereby enhancing the resilience of structures to climate change. Furthermore, the use of digital technologies and IoT for the protection of artistic heritage promotes the conservation and accessibility of cultural assets. Structural and environmental monitoring, combined with augmented and virtual reality solutions, enhances the experience of artworks, while simultaneously ensuring more effective protection of historical and museum heritage.

Digitalisation of the construction sector enhances management of the built environment and promotes a more informed and participatory urban culture. The use of technologies such as Digital Twins increases transparency in design decisions, fostering collaboration between professionals and citizens. Data sharing enables all stakeholders, including citizens and public

administrations, to monitor sustainability and safety. Furthermore, the integration of digital technologies stimulates new employment opportunities, supports the development of innovative skills, and enhances the economic well-being of the community. The adoption of Digital Twins (DTw) and artificial intelligence entails significant ethical and legal implications, particularly concerning the accountability of automated processes, informational transparency towards non-expert users, and system reliability. Therefore, it is essential to ensure traceability, verifiability, and clear criteria for accountability in order to promote the conscious, safe, and responsible use of these technologies.

Conclusions and future perspectives

The experience of the start-up BEST Design and the project described have

REFERENCES

- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., and Sarkis, J. (2020), "Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective", *International Journal of Production Economics*, Vol. 229, 107776, available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776> (Accessed on 06/03/2025).
- Carpo, M. (2017), *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*, MIT Press Ltd, Cambridge, Massachusetts, Stati Uniti.
- Ciribini, L. C. A., Ghelfi, D., Caratozzolo, G., Tagliabue, L. C. and Mastrolembo Ventura, S. (2019), *BIM E Cantiere Digitale 4.0*, 2nd ed., Grafill S.r.l., Palermo, Italia.
- Davila Delgado, J., M. and Oyedele, L. (2021), "Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing", *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 49, 101332, available at: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332> (Accessed on 06/03/2025).
- Grabowska, S., Saniuk, S. and Gajdzik, B. (2022), "Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0", *Scientometrics*, Vol. 127, pp. 3117-3144, available at: <https://doi.org/10.1007/s11192-022-04370-1> (Accessed on 06/03/2025).
- Ikudayisi, A. E., Chan, A. P. C., Darko, A. and Adedeji, Y. M. D. (2023), "Integrated practices in the Architecture, Engineering, and Construction industry: Current scope and pathway towards Industry 5.0", *Journal of Building Engineering*, Vol. 73, 106788, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106788> (Accessed on 06/03/2025).
- Mateev, M. (2020), "Industry 4.0 and the digital twin for building industry", *International Scientific Journal "Industry 4.0"*, Vol. 5, pp. 29-32, available at: <https://stumejournals.com/journals/i4/2020/1/29> (Accessed on 06/03/2025).
- Mahmoodian, M., Shahrivar, F., Setunge, S. and Mazaheri, S. (2022), "Development of Digital Twin for Intelligent Maintenance of Civil Infrastructure", *Sustainability*, Vol. 14, 8664, available at: <https://doi.org/10.3390/su14148664> (Accessed on 06/03/2025).
- Ortega, L. (2017), *The Total Designer. Authorship in the Architecture of the Postdigital Age*, Actar, New York.
- Wang, X., Yang, J., Wang, Y., Miao, Q., Wang, F. Y., Zhao, A., Deng, J. L., Li, L., Na, X. And Vlacic, L. (2023), "Steps Toward Industry 5.0: building "6S" parallel industries with cyber-physical-social intelligence", *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, Vol. 10, pp. 1692-1703, available at: <https://doi.org/10.1109/JAS.2023.123753> (Accessed on 06/03/2025).
- Torzoni, M., Tezzele, M., Mariani, S., Manzoni, A. and Willcox, K. E. (2024), "A digital twin framework for civil engineering structures", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 418, 116584, available at: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116584> (Accessed on 06/03/2025).
- Trombadore, A., Giorgi, D., Calcagno, G. and Pierucci, G. (2023), "Enabling an augmented building experience by encouraging user engagement", *TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 25, pp. 204-213, available at: <https://doi.org/10.36253/techne-13724> (Accessed on 06/03/2025).
- highlighted the crucial role of digital technologies in civil engineering and architecture, with concrete applications at the Marcus Aurelius Esedra and the Gran Sasso National Laboratories. The integration of IoT sensors, BIM models, Machine Learning, and Artificial Intelligence has led to the development of a predictive monitoring system, enhancing safety, efficiency, and sustainability. This approach marks a significant step towards the digital transition of the sector, aimed at more sustainable and technologically advanced models.
- The TECNODIGIT project offers promising future prospects, driven by the advancement of Digital Twins and the increasing use of IoT, AI, and Machine Learning to enhance infrastructure management. The integration of augmented reality, virtual reality, and automation will further optimise design, construction, and management, making the entire building lifecycle more transparent, efficient, and resilient.
- The project offers solutions applicable to sectors such as cultural heritage, urban management, and building redevelopment, aiming for integrated and inclusive urban planning. The use of real-time data enables infrastructure management that is adapted to the needs of the population, enhancing safety and comfort. Additionally, it promotes citizen engagement in the preservation of existing heritage. Achieving these objectives requires a continuous commitment to research and technological development, supported by collaborations between universities, start-ups, and industry, with the goal of promoting sustainable and secure solutions for all.