

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

Spartaco Paris¹, Vincenzo Gattulli¹, Roberto Bianchi¹, Elisa Pennacchia², Cecilia Rinaldi¹, Marianna Crognale¹

¹ Department of Structural and Geotechnical Engineering, Sapienza University of Rome, Italy

² Department of Architecture and Design, Sapienza University of Rome, Italy

Primary Contact: Spartaco Paris, spartaco.paris@uniroma1.it

This article has been accepted for publication and undergone full peer review but has not been through the copyediting, typesetting, pagination and proofreading process, which may lead to differences between this version and the Version of Record.

Published: May 26, 2025
DOI: 10.36253/techne-17492

Abstract

Within the framework of technology transfer opportunities promoted by the third mission of research, this contribution 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: 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 digitalization of the construction sector.

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

Please cite this article as: Paris S., Gattulli V., Bianchi R., Pennacchia E., Rinaldi C., Crognale M. (2025) Digital Twins for the Monitoring and Management of the Built Environment: An Integrated Approach / Digital Twins per il Monitoraggio e la Gestione del Costruito: un approccio integrato. *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, Just Accepted.

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 centers, 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 of technology transfer and research valorization is also being applied to traditionally less innovation-prone sectors, such as construction, which in recent years has begun integrating technologically advanced digital solutions for built environment management (Carpo, 2017; Ortega, 2017). The introduction of Building Information Modeling (BIM) has served as a catalyst for the adoption of advanced digital paradigms, enabling cost optimization, the simplification of complex processes, and the provision of valuable tools for the entire construction supply chain as well as end users.

Digital technologies and their interactions are key drivers of the so-called Construction 4.0 paradigm (Bai et al., 2020; Ciribini et al., 2019; Grabowska et al., 2022; Ikudayisi et al., 2023; Mateev, 2020; X. Wang et al., 2023), offering significant advantages through the adoption of 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 emerging—a model that promotes information transparency, process inclusivity, decentralized decision-making, continuity in data flows, automation, interconnection, and interoperability among technologies (Ikudayisi et al., 2023; X. Wang et al., 2023). Addressing these challenges requires the development of innovative tools that guide the sector toward a digital transition capable of generating positive social and economic impacts. These tools should enhance infrastructure management and simulation, raise awareness of energy and safety issues, and provide practical solutions for end users.

In this context, the activities of the Sapienza start-up BEST Design S.r.l. aim to optimize the 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 start-up has focused its work on the development of BIM models, enabling the optimization of design and information management related to buildings, improving collaboration among stakeholders involved in projects, and minimizing errors during the construction phases. Moreover, BEST Design has carried out experimental activities essential for gaining a deeper understanding of existing buildings and infrastructures. These activities include experimental measurements, dynamic characterization tests, and operational modal analyses, which have provided crucial data for better understanding the structural and dynamic responses of constructions. By integrating these approaches with BIM modeling, the start-up has enhanced the knowledge and management of existing structures, offering a precise assessment 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). Through the optimization of built heritage management processes, these innovations 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 these 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) of the built environment, a crucial step for optimizing operational management and predictive maintenance of infrastructures (Davila Delgado and Oyedele, 2021; Mahmoodian et al., 2022).

The integration of real-time data with digital models enables a more dynamic and accurate view of the performance of structures and systems, paving the way for a new approach to built heritage management.

The start-up has progressively increased its commitment to research and development activities in this field, actively participating in calls for funding for projects at both the national and international levels. This strategy has led to the acquisition of funding for two significant projects, marking a key milestone in its growth and consolidation journey, with a strong focus on innovation and the integration of advanced technologies.

BEST Design distinguishes itself through its participation in the Sapienza Cascading Call for collaborative research projects within the Rome Technopole framework (Spokes 1 and 6), which provided funding for the TECNODIGIT project. This initiative, involving the universities of L'Aquila and Chieti-Pescara, as well as three companies under the coordination of BEST Design, seeks to develop a Digital Twin system aimed at optimizing the management of the built environment. The project focuses on enhancing the energy and environmental sustainability of buildings, monitoring the safety of structures in real-time, and offering dynamic analyses for operational management.

The project stands out for its integration of advanced sensors, Machine Learning (ML) algorithms, and Artificial Intelligence (AI), as well as the adoption of best practices in the construction and management sectors. Positioned within the framework of Industry 5.0, the system adopts a human-centric approach, designed to ensure interpretable, scalable, and adaptable solutions to meet the needs of end users, while maintaining high standards of physical and cybersecurity (Trombadore et al., 2023).

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 behavior and performance of buildings. The first phase involves the implementation of Building Information Modeling (BIM) methodology, which allows for the creation of a detailed virtual model of the building. This approach promotes optimized collaboration among design, construction, and management teams, enhancing information sharing and minimizing errors during the construction process.

The next phase is modeling, during which physical models are developed to simulate the building's behavior in real-time and assess various damage scenarios. Subsequently, the Internet of Things (IoT) is integrated, connecting 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 analyze the collected data, predict future performance, and implement predictive maintenance strategies. These advanced tools provide valuable insights to optimize 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 adapting the models to the actual conditions of the building. Finally, predictive analysis and optimization are used to test future scenarios, enabling proactive energy resource management and predictive maintenance of structures.

This virtual model also facilitates prefabrication, operation optimization, and automated maintenance. Supporting these phases, the use of Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), and Mixed Reality (MR) enables the development of immersive and interactive experiences that blend the virtual and physical worlds, enhancing project simulation, communication, and real-time information visualization. Finally, Robotics and Automation are integrated to support the decentralized and secure management of data, as well as to automate construction processes and maintenance operations, thereby increasing the efficiency and safety of operations. This integrated methodology enables the creation and monitoring of accurate virtual models of the built environment while also optimizing resource management and proactively preventing potential issues. It ensures the sustainable, efficient, and innovative management of infrastructure.

A Pilot Project

The TECNODIGIT project was co-financed with PNRR funds through participation in "Research and Development" calls for pilot projects. It was the only one selected among the 19 proposals for Rome Technopole in the fields of Civil Engineering and Architecture, having distinguished itself for its innovative application of Digital Twin (DT) technology to the built environment, combining advanced automation technologies for inspection, maintenance, and continuous monitoring of structures.

The project aims to develop a closely coordinated supply chain for the production of digital twins of the built environment, with the objective of optimizing inspections, maintenance, and monitoring of structures. The proposal focuses on the adoption of a high level of automation, capable of ensuring a significant improvement in the usage standards of the assets under study, through the application of innovative methodologies. The project is positioned within the context of the twin transition, both digital and energy-related, aiming to meet the needs of future generations, with a particular focus on optimizing strategic structures and safeguarding cultural heritage. The project seeks to refine laboratory-level technology, with an experimental Technology Readiness Level (TRL) of 3/4, by testing it under operational conditions on real-world case studies, TRL 5/6. This TRL demonstrates the project as an advanced initiative, ready for the validation and demonstration phase in real environments.

The aim of the project is to develop advanced solutions for the inspection, maintenance, and monitoring of building structures, with a particular focus on the integration of automated technologies and the improvement of structural and energy performance. The study examines tools for static and dynamic monitoring of infrastructures, delving into the use of metadata and digital architectures to optimize data analysis. It explores the potential of Digital Twin technology in civil and energy engineering, employing techniques such as finite element analysis, neural networks, and energy

consumption monitoring. The project involves the design of Digital Twin systems, data collection, BIM model development, and the integration of user requirements. Additionally, both hardware and software solutions are developed for analysis through machine learning. Finally, the systems are field-tested to assess their effectiveness and identify potential challenges.

The Digital Twin of the Exedra of Marcus Aurelius

The Exedra of Marcus Aurelius, located within the Capitoline Museums complex, is a site of immense historical and cultural value, housing the equestrian statue of the emperor. It is a modern steel and glass hall designed by Carlo Aymonino in the Palazzo dei Conservatori. Supported by six circular columns, it features a two-level glass dome, connected by glazed panels and supported by an elliptical beam. The project aims to equip the Exedra with an advanced structural monitoring system, integrating data within a BIM environment to enhance the analysis and management of cultural heritage. The Superintendence of the Capitoline Museums oversees the initiative, which seeks to experiment with digital technologies on complex historic buildings. For accurate geometric surveying, 3D laser scanning was used, generating a point cloud and an As-Built BIM model after careful planning of the data acquisition.

To monitor the structural response of the Exedra of Marcus Aurelius, a continuous system was installed with tri-axial MEMS accelerometers and inclinometers, transmitting data to a central gateway node. The data, remotely accessible via cloud, are processed to estimate the structural health using advanced techniques such as Data-Driven Stochastic Subspace Identification (SSI). Vibrational analysis enables the updating of a finite element digital model, identifying potential damage and predicting the evolution of the structure over time.

Additionally, an offline learning phase is planned to train data-driven models (based on machine learning) that handle structural health identification and control planning. Labeled data related to structural damage are generated using physics-based numerical models (M. Torzoni et al., 2024). The monitoring system of the Exedra integrates data into the BIM model, enabling precise visualization and continuous analysis of the structure. The digital update helps predict the structure's evolution and optimize maintenance. Modal clustering techniques allow for the automatic adjustment of damage identification thresholds, reducing manual interventions. The use of the IFC format ensures interoperability between systems, supporting a BIM-DT approach, where the digital model is dynamically updated. This advanced method enables predictive and efficient management of the structure, combining physical and digital data flows (Fig. 01).

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

The structural monitoring will enable the identification of tensile-deformative phenomena through the use of load cells, flat jacks, strain gauges, and biaxial inclinometers. The 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. The environmental monitoring will focus on analyzing 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, the 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 that transmit data to a control center, where the results are displayed in real time on a web platform. The supervision of the subsystems will be centralized in a SCADA system, which will integrate the collected data and be managed from two control rooms, located in a central office and at the entrance of the laboratories. Climate sensors will optimize environmental conditions, improving safety, comfort, and energy efficiency. In the management process, the sensors are integrated into the BIM model, with each sensor associated with a URL that allows real-time data visualization and control through an intuitive interface (Fig. 02). The data is transmitted to software for analysis, which processes and displays relevant information clearly, helping operators to promptly identify anomalies. The system uses Application Programming Interfaces (APIs) to connect and integrate various applications, enhancing interoperability and automating processes. The integration of IoT sensors and technologies such as BIM and Digital Twin enables real-time monitoring of infrastructures, with graphical visualizations of environmental conditions, such as temperature and monitoring of potential pollutants. Moreover, the tool is useful for the optimal management of tunnel operations through continuous evaluation of CO₂ emission levels, Life Cycle Assessment (LCA) parameters of components and the complex, with access to data 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 optimizing construction and maintenance processes. The integration of advanced technologies enables efficient data management, reducing operational costs and improving resource utilization. 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 optimize 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 the artworks, while simultaneously ensuring more effective protection of historical and museum heritage.

The digitalization of the construction sector enhances the 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.

Conclusions and future perspectives

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

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., Cartazzolo, G., Tagliabue, L. C., & 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(6), 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.jobbe.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 Publishers, New York, America.

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://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10194240> (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).

Images

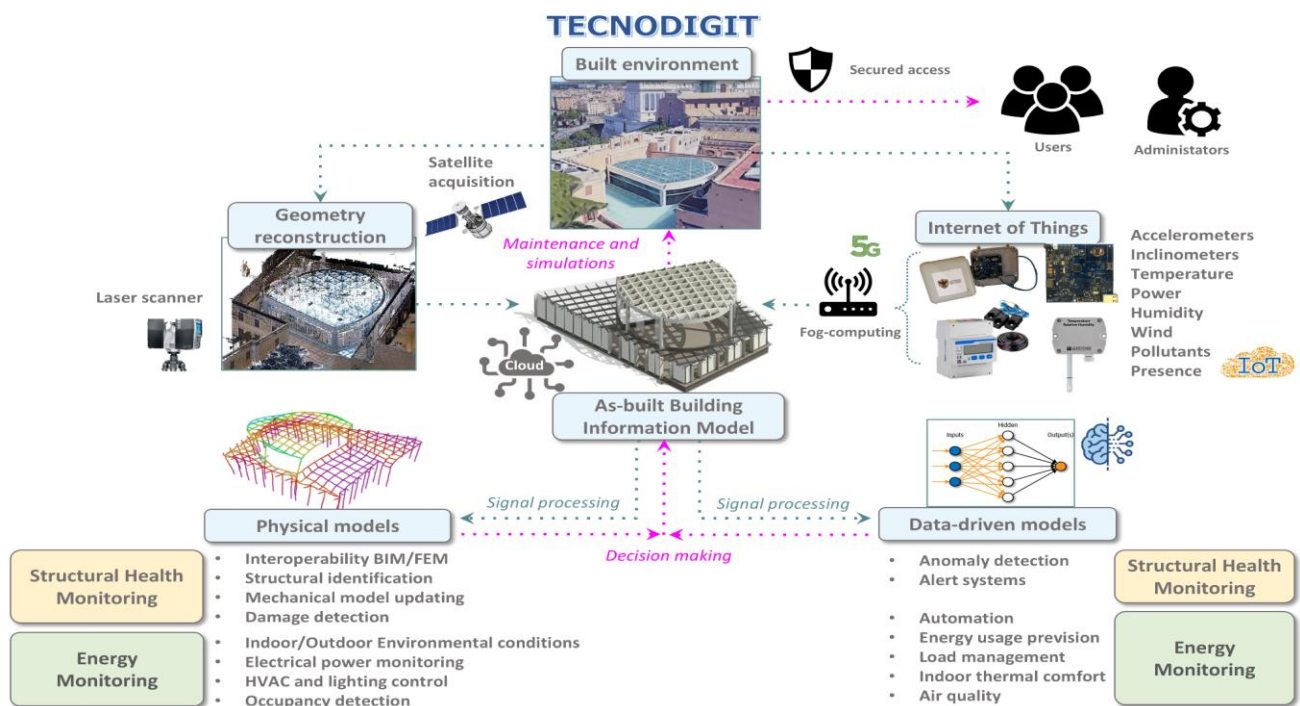


Fig. 01 – The Digital Twin for continuous monitoring of the Marcus Aurelius Esedra within the Capitoline Museums complex.

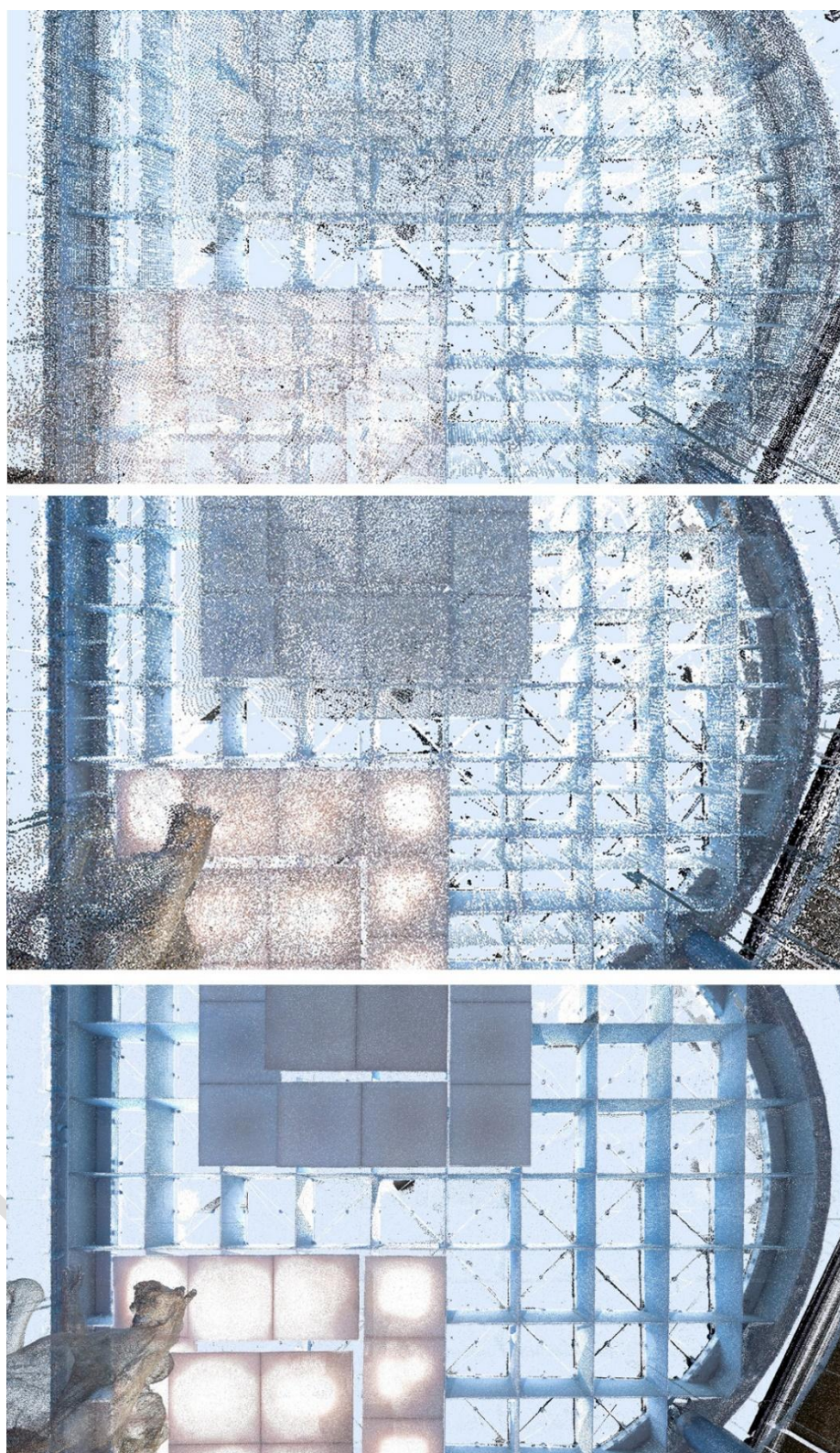


Fig. 02 – Sequence of images of the Esedra of Marcus Aurelius showing point cloud processing in digital modeling.



Fig. 03 – Real-time data visualization and control for monitoring the Gran Sasso National Laboratories.

Digital Twins per il Monitoraggio e la Gestione del Costruito: un approccio integrato

Spartaco Paris¹, Vincenzo Gattulli¹, Roberto Bianchi¹, Elisa Pennacchia², Cecilia Rinaldi¹, Marianna Crognale¹

¹ Department of Structural and Geotechnical Engineering, Sapienza University of Rome, Italy

² Department of Architecture and Design, Sapienza University of Rome, Italy

Primary Contact: Spartaco Paris, spartaco.paris@uniroma1.it

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.

Questa dinamica di trasferimento tecnologico e valorizzazione della ricerca 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. 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), portando significativi benefici grazie a 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 (Ikudayisi *et al.*, 2023; X. Wang *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. Questi strumenti devono migliorare la gestione e la simulazione delle infrastrutture, sensibilizzare sui temi dell'energia e della sicurezza e fornire soluzioni pratiche per gli utenti.

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 startup 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 queste attività, si annoverano le misure sperimentali, le prove di caratterizzazione dinamica e le analisi modali operazionali, che hanno permesso di raccogliere dati fondamentali per comprendere meglio le risposte strutturali e dinamiche delle costruzioni. Questi approcci, integrati con la modellazione 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 privati (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 (DT) del costruito, un passo fondamentale per l'ottimizzazione della gestione operativa e della manutenzione predittiva delle infrastrutture (Davila Delgado and

Oyedele, 2021; Mahmoodian *et al.*, 2022). L'integrazione dei dati in tempo reale con modelli digitali consente di ottenere una visione più dinamica e accurata delle performance delle strutture e degli impianti aprendo la strada a un nuovo approccio nella gestione del patrimonio costruito.

La start-up ha progressivamente intensificato il proprio impegno nelle attività di ricerca e sviluppo in questo ambito, partecipando attivamente a bandi per il finanziamento di progetti su scala nazionale e internazionale. Tale strategia ha portato all'ottenimento di finanziamenti per due progetti di rilievo, segnando una tappa significativa nel suo percorso di crescita e consolidamento, con un forte orientamento all'innovazione e all'integrazione di tecnologie avanzate.

BEST Design si distingue per la sua partecipazione al Bando a cascata Sapienza per progetti collaborativi di ricerca nell'ambito di Rome Technopole (Spoke 1 e 6), che ha finanziato il progetto TECNODIGIT. 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.

Il progetto si distingue per l'integrazione di sensori avanzati, algoritmi di Machine Learning (ML) e Intelligenza Artificiale (IA), oltre all'adozione delle migliori pratiche nel settore edilizio e gestionale. Collocandosi nell'ambito dell'Industria 5.0, il sistema adotta un approccio human-centric, progettato per garantire soluzioni interpretabili, scalabili e adattabili alle esigenze degli utenti finali, mantenendo alti standard di sicurezza fisica e informatica (Trombadore *et al.*, 2023).

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 anche la prefabbricazione, l'ottimizzazione delle operazioni e la manutenzione automatizzata. A supporto di queste fasi, l'uso di *Realtà Aumentata*, *Realtà Virtuale* e *Realtà Mista* consente di sviluppare esperienze immersive e interattive che uniscono il mondo virtuale con quello fisico, migliorando la simulazione dei progetti, la comunicazione e la visualizzazione delle informazioni in tempo reale. Infine, si integra la *Robotica* e l'*Automazione* per supportare la gestione decentralizzata e sicura dei dati, nonché per automatizzare processi di costruzione e operazioni di manutenzione, aumentando l'efficienza e la sicurezza delle operazioni. Questa metodologia integrata consente non solo di creare e monitorare modelli virtuali realistici dell'ambiente costruito, ma anche di ottimizzare la gestione delle risorse e di prevenire problemi prima che si verifichino, garantendo una gestione sostenibile, efficiente e innovativa delle infrastrutture.

Un progetto pilota

Il progetto TECNODIGIT è stato cofinanziato con fondi PNRR attraverso la partecipazione a bandi di "Ricerca e Sviluppo" per progetti pilota ed 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 tecnologie avanzate di automazione per ispezione, manutenzione e monitoraggio continuo delle strutture.

Il progetto mira a sviluppare una filiera strettamente coordinata per la produzione di gemelli digitali del costruito, con l'obiettivo di ottimizzare le ispezioni, la manutenzione e il monitoraggio 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, utilizzando metodologie innovative. Il progetto si inserisce nel contesto della *twin transition*, sia digitale che energetica, mirando a soddisfare le esigenze delle generazioni future, 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. Tale TRL attesta il progetto come un'iniziativa avanzata, pronta per la fase di validazione e dimostrazione in ambienti reali.

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.

Lo studio analizza strumenti per il monitoraggio statico e dinamico delle infrastrutture, approfondendo l'uso di metadati e architetture digitali per ottimizzare l'analisi dei dati. Esplora il potenziale dei Digital Twin nell'ingegneria civile ed energetica, utilizzando tecniche come analisi a elementi finiti, reti neurali e monitoraggio dei consumi. Il progetto prevede la progettazione di sistemi Digital Twin, la raccolta dati, lo sviluppo di modelli BIM e l'integrazione dei requisiti utente. Vengono inoltre sviluppate soluzioni hardware e software per l'analisi tramite machine learning. Infine, i sistemi vengono testati sul campo per valutarne efficacia e criticità.

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. 01). 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. 02).

Per monitorare la risposta strutturale della sala Esedra di Marco Aurelio, è stato installato un sistema continuo con accelerometri MEMS triassiali e inclinometri, che trasmettono dati a un nodo gateway centrale. I dati, accessibili via cloud da remoto, vengono elaborati per stimare la salute strutturale tramite tecniche avanzate come la *Data-Driven Stochastic Subspace Identification* (SSI). L'analisi vibrazionale consente di aggiornare un modello digitale agli elementi finiti, identificando eventuali danni e prevedendo l'evoluzione della struttura nel tempo.

Inoltre, una fase di apprendimento offline è prevista per addestrare modelli data-driven (basati su machine learning) che gestiscono l'identificazione della salute strutturale e la pianificazione del controllo da applicare. I dati etichettati relativi a danni strutturali vengono generati usando modelli numerici basati sulla fisica (M. Torzoni et al., 2024).

Il sistema di monitoraggio della sala Esedra integra i dati nel modello BIM, consentendo una visualizzazione precisa e un'analisi continua della struttura. L'aggiornamento digitale aiuta a prevedere l'evoluzione della struttura e ottimizzare la manutenzione. Tecniche di clustering modale permettono di adattare automaticamente le soglie di identificazione dei danni, riducendo interventi manuali. L'uso del formato IFC assicura interoperabilità tra sistemi, supportando un approccio BIM-DT, in cui il modello digitale si aggiorna dinamicamente. Questo metodo avanzato consente una gestione predittiva ed efficiente della struttura, combinando flussi di dati fisici e digitali.

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 potenziato 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 trasmettono i dati a un centro di controllo, dove i risultati sono 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.

Nel processo di gestione, i sensori vengono integrati nel modello BIM, associando ad ogni sensore un URL che consente di visualizzare e controllare i dati in tempo reale attraverso un'interfaccia intuitiva (Fig. 03). I dati vengono trasmessi a un software per l'analisi, che elabora e visualizza informazioni rilevanti in modo chiaro, aiutando gli operatori a identificare anomalie tempestivamente. Il sistema utilizza le Application Programming Interface (API) per connettere e integrare diverse applicazioni, migliorando l'interoperabilità e automatizzando i processi. L'integrazione di sensori IoT e tecnologie come BIM e Digital Twin permette il monitoraggio in tempo reale delle infrastrutture, con visualizzazioni grafiche delle condizioni ambientali, come temperatura e controllo di eventuali sostanze inquinanti. Inoltre, lo strumento è utile per la gestione ottimale delle operazioni in galleria attraverso una valutazione continua dei livelli di emissione di CO₂, dei parametri di LCA dei componenti e del complesso e con l'accesso ai dati tramite una piattaforma cloud.

Implicazioni culturali, pratiche e socio- economiche

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

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 architettura, 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.

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., Cartazzolo, G., Tagliabue, L. C., & 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(6), 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.jobbe.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 Publishers, New York, America.
- 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://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10194240> (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).