

ARTICLE INFO

Received 10 September 2025
Revised 22 October 2025
Accepted 23 October 2025
Published 30 December 2025

GEMELLO DIGITALE E PROCESSO EDILIZIO

Riflessioni su produttività, energia e salute

THE DIGITAL TWIN AND THE BUILDING PROCESS

Reflections on productivity, energy, and health

Alexandra Eika D'Amore

ABSTRACT

Il settore delle costruzioni, storicamente segnato da inefficienze e alti impatti ambientali, è al centro di una trasformazione digitale. In questo quadro il gemello digitale opera come piattaforma sistemica che integra dati, processi e attori lungo l'intero ciclo di vita, abilitando decisioni complesse e generando valore. Il saggio indaga come l'impiego del gemello digitale nelle diverse fasi del processo edilizio possa sostenere produttività, qualità del lavoro e sviluppo di nuove competenze e, al contempo, promuovere efficienza energetica, salute e benessere. L'analisi adotta una prospettiva umano-centrica, valutando in che misura il gemello digitale migliori l'esperienza della committenza, dei lavoratori e degli utenti finali e come contribuisca a una transizione equa e inclusiva, in linea con la visione dell'Industria 5.0 che assegna alla persona un ruolo decisionale centrale nel processo.

The construction sector, historically marked by inefficiencies and high environmental impacts, is at the centre of a digital transformation. Within this framework, the Digital Twin operates as a systemic platform that integrates data, processes, and stakeholders throughout the entire life cycle, enabling complex decision-making and generating value. The paper investigates how the use of the Digital Twin across the different phases of the building process can support productivity, work quality, and the development of new skills, while also promoting energy efficiency, health, and well-being. The analysis adopts a human-centred perspective, assessing the extent to which the Digital Twin improves the experience of clients, workers, and end users, and how it contributes to a fair and inclusive transition, in line with the vision of Industry 5.0, which places the human being at the centre of the decision-making process.

KEYWORDS

gemello digitale, processo edilizio, produttività, sviluppo sostenibile, industria 5.0

digital twin, building process, productivity, sustainable development, industry 5.0



Alexandra Eika D'Amore is an Engineer and PhD Candidate in Architectural Engineering at the Department DICEA, 'Sapienza' University of Rome (Italy). Her research focuses on technological and environmental design, particularly on methods and tools for meta-design, design, and construction at different scales, with a focus on technological innovation and the digitalisation of processes and projects. E-mail: alexandraeika.damore@uniroma1.it

Il settore delle costruzioni costituisce una delle principali fonti di emissioni di gas serra a livello globale, e il comparto AEC contribuisce in modo sostanziale agli impatti dell'ambiente costruito (Xu, Kim and Chen, 2025; Amarasinghe et alii, 2025), rappresentando uno dei principali responsabili delle emissioni di carbonio a livello globale, con circa il 40% delle emissioni energetiche complessive (World Green Building Council, 2024). Da iniziative globali, come l'Accordo di Parigi (UN, 2015b), alle strategie dell'Unione Europea, come il Green Deal Europeo (European Commission, 2019), l'edilizia emerge come leva chiave per la decarbonizzazione e la neutralità climatica. In Italia il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC; Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2023) allinea obiettivi e risorse per l'efficientamento del Patrimonio edilizio (Tab. 1).

Secondo lo studio del Buildings Performance Institute Europe (BPIE, 2024) in Italia le misure adottate hanno ridotto le emissioni di CO₂ e i consumi energetici degli edifici e hanno incrementato l'uso di rinnovabili; tuttavia tali progressi non sono ancora allineati agli obiettivi prefissati, rinviando oltre due terzi dello sforzo al 2050. In questa prospettiva il principio di sviluppo sostenibile assume un ruolo fondante per ripensare il settore delle costruzioni, orientandolo verso modelli capaci di coniugare crescita economica, tutela ambientale e benessere sociale, garantendo un utilizzo equilibrato, equo e duraturo delle risorse disponibili (Fig. 1; Holden et alii, 2014).

La transizione dall'Industria 4.0 a quella 5.0 rafforza questa visione, spostando l'attenzione dall'automazione e dall'efficienza dei processi verso un paradigma umano-centrico, in cui la sostenibilità, l'equità sociale e l'innovazione tecnologica si integrano per generare soluzioni resilienti e servizi di lungo periodo a beneficio della collettività (Fig. 2; Wang et alii, 2024). Tecnologie emergenti come il Digital Twin assumono un ruolo strategico nel tradurre la prospettiva umano-centrica dell'Industria 5.0 in applicazioni concrete per il settore delle costruzioni (Nava and Melis, 2024). Tale tecnologia si configura oggi come una delle innovazioni più rilevanti per l'ingegneria civile, trovando applicazione lungo le diverse fasi del processo edilizio, dalla programmazione, progettazione e costruzione fino alla gestione e manutenzione (Zhang et alii, 2023).

In questa cornice tematica il saggio intende inserirsi nel dibattito scientifico-disciplinare offrendo una lettura critica delle interconnessioni tra l'innovazione tecnologica e digitale e gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), supportata dalla disamina di casi di studio che affrontano il ruolo del Digital Twin applicato alle varie fasi del processo edilizio come leva per la trasformazione produttiva, ambientale e sociale. Attraverso un approccio interdisciplinare e multilivello il contributo evidenzia la complessità del tema rispetto alle sfide attuali, ai compromessi da affrontare e alle prospettive di applicazione futura, con il fine di orientare il settore delle costruzioni verso una trasformazione di impronta ambientale, economica e sociale effettiva.

L'obiettivo del saggio critico è riflettere sulle potenzialità del Digital Twin non solo come avanzamento tecnologico, ma come strumento di mediazione tra innovazione e responsabilità sociale che riconosce il valore dell'apporto umano in ogni fase del ci-

clo di vita edilizio, ponendo al centro le esigenze della committenza, dei lavoratori e degli utenti finali e contribuendo alla costruzione di nuovi paradigmi di benessere, sicurezza e professionalità. Tale prospettiva si distingue rispetto allo stato dell'arte che tende a privilegiare un'interpretazione prevalentemente tecnica e prestazionale del Digital Twin, proponendo invece una visione sistemica capace di integrare dimensioni tecnologiche, sociali e ambientali. La finalità del contributo è favorire una riflessione critica sulla transizione digitale del settore edilizio, orientandola verso modelli di sviluppo che coniughino innovazione tecnologica, qualità del lavoro e benessere delle persone, in linea con la visione umano-centrica dell'Industria 5.0.

Tale impostazione consente di ampliare il dibattito disciplinare sull'uso delle tecnologie digitali, offrendo spunti per la definizione di nuovi modelli di valutazione del benessere e della produttività, nonché per l'elaborazione di strategie di governance più inclusive e sostenibili. Tale contributo infatti si rivolge in primis alla comunità scientifica, nonché ai decisori pubblici, ai professionisti del settore delle costruzioni, ai soggetti coinvolti nella gestione e nella trasformazione dell'ambiente costruito e agli utenti finali, proponendo spunti utili per orientare politiche, strategie e pratiche verso una transizione digitale etica, equa e sostenibile. L'ambito di riferimento è quello della ricerca architettonica e tecnologica contemporanea, con particolare attenzione alle trasformazioni digitali dei processi edilizi e ai loro impatti sociali e ambientali. L'elemento di originalità del presente contributo risiede nell'adozione di una prospettiva critica e sistemica che interpreta il Digital Twin non soltanto come strumento tecnologico, ma come leva di trasformazione produttiva, sociale e ambientale, mantenendo al contempo la centralità della persona.

Il saggio è strutturato in sei sezioni principali, la prima delle quali ripercorre l'evoluzione del concetto di Digital Twin e le sue applicazioni, fino al settore delle costruzioni, introducendo le tecnologie abilitanti di cui fa uso e gli ambiti di applicazione all'interno del processo edilizio. La sezione metodologica adotta un approccio di analisi critica e argomentativa, volto a sistematizzare le modalità di adozione del Digital Twin nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione di un'opera, evidenziando le potenzialità, i limiti e le barriere all'adozione. Successivamente il saggio attiva delle riflessioni sulla letteratura e i casi studio selezionati, sintetizzando le evidenze teoriche e applicative e mettendo in relazione le trasformazioni tecnologiche con gli aspetti organizzativi, sociali ed etici coerenti con la visione umano-centrica dell'Industria 5.0. Una sezione dedicata alla sintesi dei risultati trasversali analizza le sinergie tra il Digital Twin ed SDG, approfondendo in particolare i nessi con gli Obiettivi 8, 7 e 3 e offrendo al contempo una visione complessiva sugli effetti sinergici o di compromesso che la sua adozione può generare rispetto all'intero quadro dell'Agenda 2030. Le conclusioni ripercorrono criticamente le evidenze emerse per ciascuna fase del processo edilizio, mettendo in luce come il Digital Twin possa rafforzare la centralità della persona nei momenti di progettazione, costruzione e gestione, ma anche i principali limiti dello studio e le possibili direzioni di sviluppo futuro orientate a un uso più consapevole, inclusivo e umano-centrico della tecnologia.

Origine e sviluppi applicativi del Digital Twin nel ciclo di vita dell'edilizia | Il saggio, di taglio narra-

tivo-critico e multidisciplinare, si fonda su una selezione qualitativa di articoli scientifici che analizzano l'applicazione del Digital Twin alle fasi del processo edilizio di progettazione, costruzione e gestione / manutenzione.

La selezione delle fonti è stata guidata da un criterio qualitativo e interpretativo, finalizzato a individuare contributi capaci di rappresentare in modo significativo l'evoluzione del paradigma del Digital Twin nel settore delle costruzioni. Ciascuna fase è stata esaminata attraverso casi di studio rappresentativi, scelti per la loro capacità di evidenziare relazioni con gli SDG e in particolare con la produttività (SDG 8), l'efficienza energetica (SDG 7) e la salute e il benessere (SDG 3). Le fonti sono state selezionate in base alla loro rilevanza concettuale e interdisciplinare e sottoposte a una lettura critica volta a evidenziarne limiti, bias e potenzialità; molti studi infatti tendono a privilegiare una visione tecnologico-prestazionale del Digital Twin, trascurando le dimensioni organizzative, sociali e di governance che ne condizionano l'adozione: questa riflessione di meta-analisi costituisce il punto di partenza per la costruzione della presente lettura critica.

L'analisi dei casi applicativi così selezionati consente di mettere in luce lacune e opportunità di approfondimento, ponendo le basi per una discussione orientata ai principi dell'Industria 5.0 e agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile. Per ciascuna fase sono riportati gli articoli che presentano applicazioni del Digital Twin, evidenziando la corrispondenza tra i contributi e i principali ambiti tematici di riferimento: produttività, qualità ed efficienza energetica, salute e benessere (Tab. 2).

Il concetto di Digital Twin trova le sue origini nei primi anni duemila in ambito manifatturiero e aerospaziale, con l'obiettivo di sviluppare una copia digitale di un sistema fisico finalizzata al monitoraggio e all'ottimizzazione delle prestazioni (Iliuta et alii, 2024). Il sistema del Digital Twin è articolato in tre componenti fondamentali (Fig. 3): lo spazio fisico reale, la sua controparte virtuale, in grado di rispecchiare fedelmente le caratteristiche della realtà fisica, e un ponte bidirezionale che connette i due domini consentendo lo scambio continuo di dati e informazioni (Wang, 2020).

Tale tecnologia si è progressivamente affermata come strumento trasversale in numerosi ambiti applicativi: dall'aerospaziale, dove abilita la manutenzione predittiva e il supporto decisionale, al settore dell'energia, per l'ottimizzazione dei sistemi e delle infrastrutture; dalla manifattura, in cui consente la simulazione dell'intero ciclo di vita del prodotto e promuove pratiche sostenibili, ai trasporti intelligenti, favorendo il monitoraggio dinamico delle infrastrutture e l'efficienza della mobilità (Mousavi et alii, 2024). Il trasferimento del Digital Twin al settore delle costruzioni è più recente: si è affermato con la diffusione del BIM e di altri strumenti digitali, alimentando la trasformazione del comparto e offrendo un approccio integrato alla gestione dell'intero ciclo di vita dell'opera (Yang et alii, 2024).

Il settore delle costruzioni si trova oggi immerso in un contesto globale fortemente competitivo (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023); storicamente caratterizzato da una lenta adozione delle innovazioni digitali, il comparto AEC manifesta oggi un bisogno crescente di strumenti in grado di favorire pratiche più ecologiche, efficienti e sicure (Zhang et alii, 2023). In tale scenario l'introduzione di tecnologie digitali avanzate e sistemi intelligenti, supportati

da infrastrutture di connettività e da ecosistemi integrati di dati, ha favorito l'adozione di nuovi strumenti e metodologie, innescando una trasformazione profonda del settore delle costruzioni.

Secondo quanto indicato dalla norma UNI 10838:1999 il processo edilizio può essere inteso come una sequenza organizzata e strutturata di fasi che prende avvio dal rilevamento delle esigenze espresse dalla committenza-utenza, per giungere al loro soddisfacimento attraverso un percorso che comprende la progettazione, la produzione, la realizzazione e la gestione dell'opera stessa (Fig. 4).

In ambito internazionale il processo edilizio è comunemente inquadrato all'interno del più ampio concetto di ciclo di vita del progetto; l'Istituto statunitense Project Management Institute e l'Istituto inglese Association for Project Management individuano nel ciclo di vita di un progetto una sequenza di quattro fasi dall'avvio alla conclusione (Wang and Chen, 2023). In tale contesto il processo edilizio si configura come un sistema intrinsecamente complesso, chiamato oggi a confrontarsi con le pressanti sfide poste dagli obiettivi di sostenibilità ambientale, economica e sociale.

L'innovazione tecnologica assume un ruolo strategico quale fattore abilitante della transizione verso pratiche più sostenibili, poiché consente la generazione di prodotti e servizi capaci di rispondere con maggiore efficacia e tempestività alla crescente complessità dei bisogni contemporanei (Weichbroth, Jandy and Zurada, 2024). Dall'analisi della letteratura scientifica emerge una prevalente concentrazione degli studi sull'applicazione del Digital Twin alle fasi di progettazione, costruzione e gestione del ciclo di vita dell'opera (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023; Cumo et alii, 2025; Zhang et alii, 2023), le quali saranno anche le fasi analizzate nel presente contributo.

L'aspetto innovativo del Digital Twin risiede nella capacità di operare su processi e scale diverse: dalla visualizzazione progettuale alla simulazione dei processi costruttivi, dal monitoraggio in tempo reale delle prestazioni all'ottimizzazione dei consumi energetici fino alla pianificazione della manutenzione, della riqualificazione e dell'assetto urbano, dal singolo edificio al quartiere e alla città (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023; Longo et alii, 2024; Yang et alii, 2024).

Oltre a tali applicazioni una parte crescente della letteratura evidenzia l'integrazione del Digital Twin con l'Intelligenza Artificiale e agenti autonomi, capaci di assumere decisioni operative e di interagire in logiche machine-to-machine: ciò sposta l'attenzione dal mero monitoraggio al decision-making automatizzato e ridefinisce ruoli, responsabilità e competenze nei processi di progetto e gestione (Celaschi, Casoni and Fomia, 2024). A fronte della molteplicità d'uso del Digital Twin, viene adottato un quadro di riferimento delle componenti essenziali, che guida i paragrafi successivi.

Applicazione in fase di progettazione | Nella fase di progettazione l'adozione del Building Information Modeling (BIM) è in grado di generare modelli digitali integrati, che racchiudono informazioni geometriche, prestazionali e funzionali dell'opera (Yang et alii, 2024), e di ridurre conflitti progettuali e discrepanze documentali, garantendo un controllo più accurato sulle decisioni progettuali (Nguyen and Adhikari, 2023).

In fase di progettazione il Digital Twin si configura come un'evoluzione del BIM, trasformandolo in un modello dinamico e continuamente aggiornato grazie all'integrazione con sensori IoT e tecniche di intelligenza artificiale (Lee et alii, 2021). L'integrazione dell'Intelligenza Artificiale nei processi di pro-

gettazione consente poi di affiancare alla produzione di immagini la capacità di prevedere prestazioni ambientali, comportamenti degli utenti e risposte dei materiali, divenendo un supporto esplorativo e comunicativo (Nava and Melis, 2024).

Un esempio di applicazione integrata di BIM, Digital Twin e Intelligenza Artificiale è offerto dallo studio sulla rifunionalizzazione dell'ex Manifattura Tabacchi di Torino, dove viene sperimentata la progettazione di una smart library capace di connettere in tempo reale dati fisici e digitali (Ugliotti, D'Addetta and Fabbriatore, 2024). L'oggetto della ricerca è la creazione di un sistema digitale multilivello capace di integrare dati e processi provenienti da domini diversi in un unico ambiente coerente.

Al livello più basso il BIM fornisce la struttura informativa statica dell'edificio, su cui si innesta un secondo livello costituito da una rete di sensori IoT e telecamere intelligenti, deputata alla raccolta in tempo reale di dati ambientali. Il terzo livello, dedicato all'elaborazione, utilizza algoritmi di Intelligenza Artificiale per interpretare le informazioni acquisite, rilevare schemi di comportamento e generare risposte automatiche del sistema. La metodologia, basata su una matrice spaziale automatizzata (Fig. 5), permette di monitorare parametri ambientali come luminosità, temperatura e presenza, attivando risposte automatiche per ottimizzare comfort, sicurezza ed efficienza energetica.

Il principale punto di forza, che determina anche la scelta di questo caso studio, risiede proprio nell'integrazione effettiva e sinergica delle tre tecnologie, che rende il gemello digitale uno strumento operativo, dinamico e progressivamente adattivo. Inoltre la valutazione delle esigenze degli utenti introduce la visione adattiva e predittiva che eleva il Digital Twin da semplice strumento di monitoraggio a sistema operativo capace di decisioni auto-

Tab. 1 | Climate agreements and policies: objectives for the construction industry (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Name	Classification	Year	Level	Specific Objectives in the Construction Sector	Additional Notes
Kyoto Protocol	Global treaty	1997	International (UN/UNFCCC)	First legally binding reduction of greenhouse gas emissions; initial push for building energy efficiency	Established the basis for future energy-saving regulations
2030 Agenda	Reference framework	2015	International (UN)	Goals 7, 11, and 13 include targets for the building sector	Global policy framework
Paris Agreement	Global treaty	2015	International (UN/UNFCCC)	Global emission reduction to limit temperature rise below 1.5-2 °C; construction identified as a key sector	Foundation for EU and national strategies
European Green Deal	EU strategic framework	2019	European	Climate neutrality by 2050; decarbonisation of the building sector as a pillar of the transition	Includes the Renovation Wave principle
Renovation Wave	EU sectoral initiative	2020	European	Doubling renovation rates; energy efficiency and decarbonisation of the European building stock	Focus on residential and public buildings
Fit for 55	Legislative package	2021	European	55% emission reduction by 2030; reinforcement of building-related directives (EPBD, RED III)	Introduces stricter obligations for the construction sector
Energy Performance of Buildings Directive (recast)	EU directive	2024	European	Zero-emission buildings (ZEB) by 2030 for new stock; by 2050 for existing stock	Requires national renovation plans
Integrated National Energy and Climate Plan	National plan	2024 (update)	Italy	Energy efficiency, decarbonisation, renewables; specific targets for the building stock and deep renovations	Main Italian instrument for implementing the EPBD and Green Deal

Next page

Fig. 1 | The three dimensions of sustainable development (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Fig. 2 | Timeline of the Industrial Revolutions (credit: A. E. D'Amore, 2025).

me, orientato alla qualità della vita degli utenti e alla sostenibilità del costruito. Esistono evidenze applicative che mostrano come BIM e Digital Twin possano supportare anche simulazioni e analisi di scenari per decisioni più consapevoli e sostenibili (Kawunruen, Rungskunroch and Welsh, 2019), ridefinendo anche i profili professionali: Zannoni et alii (2024) infatti introducono la figura del Transitional Industrial Designer, con il compito di anticipare scenari, mediare tra attori e governare processi complessi.

Tuttavia si riscontrano criticità legate alla complessità tecnologica e infrastrutturale, alla necessità di competenze specialistiche e ai delicati aspetti etici e di privacy derivanti dall'uso di dati sensibili. Il carattere ancora sperimentale della ricerca e la dipendenza da infrastrutture tecnologiche avanzate ne riducono per ora la piena applicabilità, ma l'impianto metodologico mostra una notevole potenzialità evolutiva, aprendo prospettive concrete per la diffusione di modelli di progettazione più intelligenti, sostenibili e inclusivi, soprattutto laddove BIM / Digital Twin / Intelligenza Artificiale si integrano per rendere la progettazione più informata e verificabile, riducendo rischi a valle e preparando dati e decisioni per cantiere e gestione (Fig. 6).

Applicazione in fase di costruzione | All'interno del ciclo di vita di un progetto edilizio la fase di costruzione implica una complessa attività di coordinamento di risorse per ottimizzare tempi e costi, tutti elementi determinanti per il conseguimento del successo complessivo dell'opera. I casi di studio selezionati per questa fase documentano come il Digital Twin può garantire una gestione più consapevole del rischio e una maggiore qualità del lavoro attraverso l'uso di piattaforme immersive e sistemi di realtà aumentata o virtuale, capaci di migliorare la visualizzazione delle attività di cantiere, il coordinamento tra gli operatori e la formazione del personale.

Il caso di studio analizzato da Chacón et alii (2024) riguarda un edificio in cemento armato gettato in opera, situato nel quartiere di Poble Nou a Barcellona. L'obiettivo era verificare come l'integrazione tra BIM, IoT e simulazioni potesse migliorare la produttività, la sicurezza e l'efficienza delle risorse in un contesto reale di cantiere. Il progetto si basa su un modello geometrico BIM collegato, tramite una piattaforma IoT, a una piattaforma digitale interattiva che integra un kit di applicazioni utilizzabili nelle diverse fasi del ciclo edilizio (Fig. 7), attraverso la quale è possibile simulare le attività di cantiere,

pianificare e tracciare le lavorazioni, nonché gestire la sicurezza e l'analisi dei rischi.

L'aspetto innovativo risiede nell'approccio integrato e modulare della piattaforma, che consente di migliorare il processo decisionale e la trasparenza gestionale; l'impiego di una rete di sensori permette inoltre un monitoraggio costante del cantiere, riducendo i tempi di intervento per la risoluzione delle criticità. L'interoperabilità tra i diversi sistemi (modello BIM, sensori e piattaforma) garantisce il rispetto delle tempistiche previste e una gestione più efficiente delle informazioni.

Tuttavia la piattaforma si fonda su un ampio ecosistema di software e strumenti eterogenei che richiede competenze tecniche avanzate e una gestione complessa dei flussi informativi; tale aspetto riduce la scalabilità del modello e ne limita l'adozione in contesti caratterizzati da una bassa maturità digitale, configurandosi come un bias tecnologico rilevante. Inoltre l'implementazione universale del Digital Twin nei cantieri è ancora in una fase iniziale; la variabilità delle attività, la presenza simultanea di molteplici stakeholder e la mole consistente di dati prodotti rappresentano una sfida per la qualità dei risultati generati dalla piattaforma. Nel complesso il progetto rappresenta un approccio innovativo alla digitalizzazione del settore delle costruzioni, offrendo una visione integrata e predittiva della fase di cantiere, ma per raggiungere il livello di maturità tecnologica auspicato, sarà necessario intensificare la ricerca e promuovere modelli di interoperabilità più accessibili e sostenibili.

Nel progetto dello Shanghai East Hospital il Digital Twin ha operato in cantiere come piattaforma fisico-digitale, sincronizzando fornitori e attività, integrando sensori geolocalizzati, centralizzando dati in tempo reale per analisi con Intelligenza Artificiale, verificando l'allineamento tra il modello e il costruito, riducendo errori e tempi decisionali e abilitando una gestione più efficiente (Fig. 8; Peng et alii, 2020). Inoltre lo studio introduce un nuovo sviluppo della figura dell'appaltatore, il quale assume il ruolo di coordinatore digitale, guidando in cantiere l'installazione e la mappatura dei sensori e garantendo l'allineamento continuo tra modello e realtà.

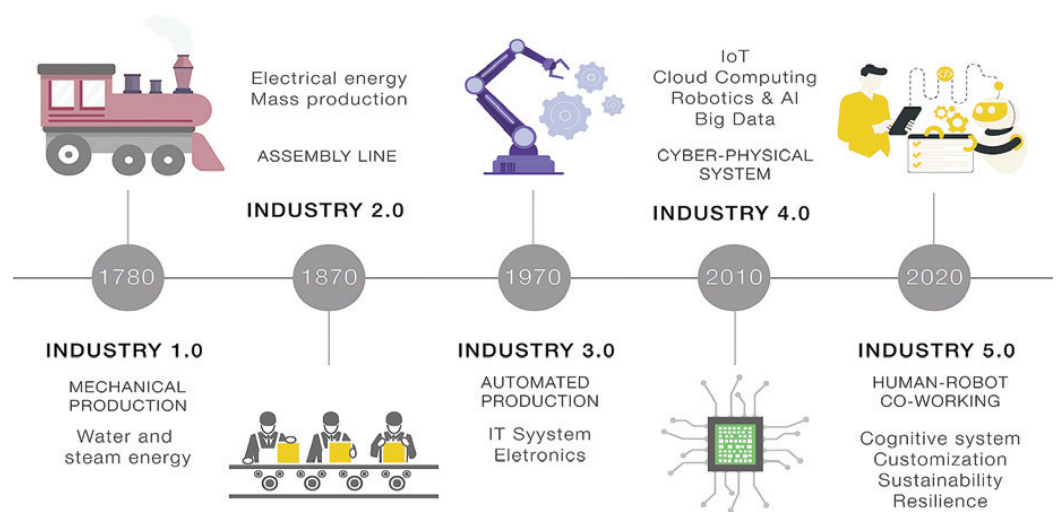
La possibilità di monitorare in tempo reale le prestazioni di cantiere e di connettere più sistemi informativi rappresenta un'evoluzione significativa rispetto alle modalità tradizionali di controllo, migliorando la tracciabilità e la qualità dei dati e favorendo una maggiore predittività decisionale. Allo stesso tem-

po l'adozione di un sistema così complesso richiede una struttura tecnologica avanzata, competenze digitali altamente specializzate e investimenti economici rilevanti, elementi che ne limitano l'applicabilità diffusa. Per tali ragioni l'approccio risulta più adatto a contesti di alta complessità funzionale, come quelli ospedalieri, piuttosto che a edifici residenziali o di piccola scala. Questa esperienza evidenzia il potenziale di una gestione integrata dei flussi informativi complessi, che tuttavia richiede l'elaborazione di politiche e strategie di sostegno capaci di garantire un'adozione sostenibile e diffusa.

Infine nel progetto di costruzione di un'infrastruttura autostradale nel Regno Unito il Digital Twin è stato sperimentato come piattaforma interattiva per il monitoraggio del cantiere e la gestione della sicurezza, integrando dati BIM, rilievi tridimensionali e informazioni ambientali in tempo reale attraverso il motore Unreal Engine 5, utilizzando un approccio 'no-code' (Ellul et alii, 2024; Fig. 9). Tale caratteristica rappresenta un'evoluzione significativa nel campo del Digital Twin per la costruzione, poiché offre un'interfaccia intuitiva e un'esperienza visiva realistica, permettendo ai lavoratori di comprendere in modo immediato le situazioni di pericolo, migliorando la consapevolezza dei rischi e supportando attività di formazione mirata.

Tuttavia la scelta di una piattaforma originariamente concepita per il gioco comporta anche limiti strutturali; infatti alcune funzioni del Digital Twin non sono integrate in Unreal Engine 5 e il caricamento dei dati deve essere fatto manualmente, sottolineando il carattere ancora sperimentale del progetto che riproduce le logiche del Digital Twin senza realizzare una piena connessione fisico-digitale. Proprio queste difficoltà rendono evidente la necessità di continuare la ricerca verso sistemi più interoperabili e automatizzati, capaci di connettere in modo nativo ambienti di progettazione e ambienti di simulazione. Nonostante tali criticità l'esperienza inglese mette in luce il potenziale di questi ambienti digitali che si configurano come strumenti accessibili anche alle figure operative, rappresentando una nuova forma di innovazione per il settore delle costruzioni (Fig. 10).

Applicazione in fase di gestione e manutenzione | I Digital Twin stanno trasformando le fasi di gestione e manutenzione, offrendo agli operatori e ai manutentori una visione chiara delle attività necessarie grazie alla disponibilità di dati prestazionali raccolti attraverso sensori fisici integrati con sistemi per



la visualizzazione e il monitoraggio delle performance (Yang et alii, 2024). I casi studio selezionati per la fase di gestione e manutenzione sono stati individuati in base alla loro capacità di dimostrare come l'applicazione del Digital Twin possa ridurre tempi e costi delle attività manutentive, migliorando l'efficienza operativa e la pianificazione degli interventi. La scelta è inoltre motivata dalla volontà di evidenziare la scalabilità del modello digitale che si dimostra applicabile tanto ai contesti edilizi di piccola scala quanto alle realtà urbane più estese.

Nel caso del Manage5.0 la metodologia è orientata alla costruzione del Digital Twin di uno stabilimento industriale come leva per l'Industria 5.0 e per una transizione umano-centrica (Fig. 11; Osello et alii, 2024a). Lo studio introduce l'uso di cruscotti e sistemi di 'realtà estesa' per l'interazione con la replica digitale: le squadre di manutenzione monitorano i componenti, selezionano strategie d'intervento adeguate e riducono tempi e rischi, generando valore per l'immobile. In questo assetto il facility manager pianifica e comunica in sicurezza le attività, ottimizza risorse e materiali e riduce le emissioni legate a pratiche manutentive inefficienti.

L'interpretazione uomo-macchina del sistema valorizza la partecipazione attiva dell'utente nei pro-

cessi di gestione supportando il facility manager e gli operatori tecnici nella pianificazione e nella comunicazione degli interventi manutentivi, agevolati anche dall'uso di sistemi di realtà virtuale, garantendo il ruolo centrale della figura umana nella gestione del ciclo di vita dell'edificio (Fig. 12).

Il progetto definisce in modo esemplare un Digital Twin dinamico, in cui il modello BIM e i dati provenienti dai sensori in situ si integrano per produrre simulazioni energetiche visualizzate tramite un cruscotto digitale e ambienti immersivi, creando una connessione costante tra realtà fisica e gemello digitale. Tuttavia il sistema mostra ancora difficoltà nella comunicazione tra i diversi software e formati utilizzati, in quanto la conversione dei modelli tra file di origine diversa può determinare la perdita di dati e informazioni che compromettono la coerenza del modello e la corretta interoperabilità del Digital Twin. Queste discontinuità rendono necessario un lavoro costante di verifica e calibrazione, rallentando il processo e aumentando il rischio di errori. Nonostante ciò il progetto si distingue per l'utilizzo di software e tecnologie ampiamente diffuse, facilmente accessibili e già note agli operatori del settore, condizione che ne favorisce la trasferibilità sia rispetto al tipo di edificio analizzato sia per l'adozione di un sistema

informativo realistico e replicabile. Un altro esempio, questa volta a scala urbana, è quello della Città di Bologna in cui il Digital Twin energetico riesce a supportare pianificazione e decisioni attraverso un sistema capace di operare efficacemente anche in condizioni di carenza o incompletezza dei dati (Longo et alii, 2024). Ciò è particolarmente rilevante nel contesto urbano, dove la disponibilità e la qualità delle informazioni sugli edifici risultano spesso frammentarie, non aggiornate o soggette a restrizioni legate alla privacy. L'intero processo, per quanto costruito su dati minimi, mira a generare un modello urbano energetico coerente, capace di descrivere lo stato attuale e di simulare scenari di retrofit e decarbonizzazione (Fig. 13).

Il Digital Twin non è infatti inteso soltanto come strumento tecnico di simulazione, ma come dispositivo di governance urbana orientato al miglioramento della qualità della vita dei cittadini, ponendo al centro le loro esigenze e la sostenibilità del contesto abitativo. Tale prospettiva umano-centrica, che riconosce il valore del gemello digitale come mediatore tra dati, processi decisionali e bisogni sociali, rappresenta uno dei principali punti di forza del progetto. Bisogna tuttavia riconoscere il limite dei sistemi di Digital Twin urbani che si trovano ancora in

Building process phase	Articles	Productivity	Quality and Energy efficiency	Health and Safety
Design phase	Yang et alii, 2024	✓	✓	
	Nguyen and Adhikari, 2023	✓		
	Lee et alii, 2021	✓		
	Nava and Melis, 2024		✓	✓
	Kaewunruen, Rungskunroch and Welsh, 2019		✓	
	Ugliotti, D'Addetta and Fabbricatore, 2024		✓	✓
	Zannoni et alii, 2024	✓		
Construction phase	Chacón et alii, 2024	✓		✓
	Peng et alii, 2020	✓	✓	✓
	Ellul et alii, 2024	✓		✓
Management / Maintenance phase	Osello et alii, 2024a	✓	✓	✓
	Longo et alii, 2024	✓		
	Osello et alii, 2024b	✓	✓	

Tab. 2 | Quantitative distribution of publications by project phase and thematic area (credit: A. E. D'Amore, 2025).

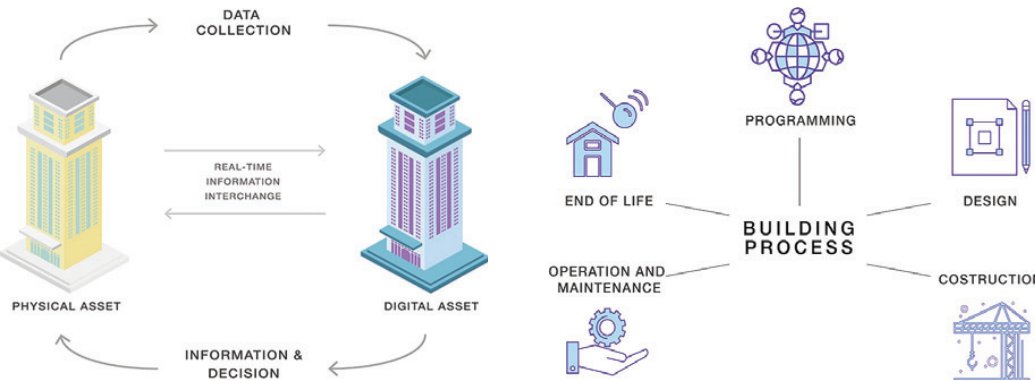
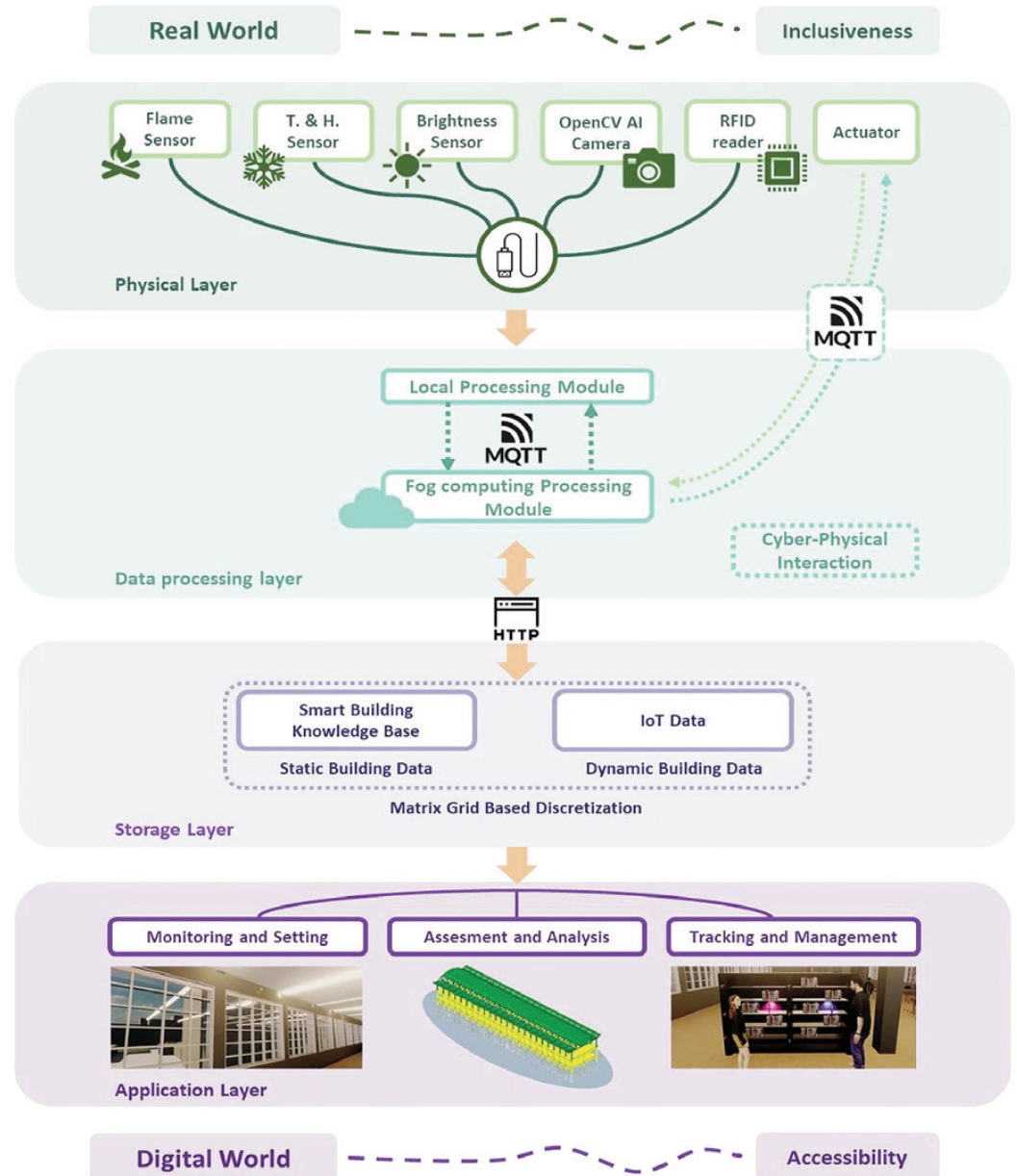


Fig. 3 | Digital Twin architecture schematic (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Fig. 4 | The phases of the building process (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Fig. 5 | Methodological research framework (source: Uglioti, D'Addetta and Fabbriatore, 2024).



una fase di maturità iniziale, caratterizzata da forti disomogeneità negli standard, dalla frammentazione delle fonti e dalla complessità di garantire continuità e aggiornamento del modello nel tempo.

Il valore del progetto risiede nel tentativo di colmare il divario di maturità dei Digital Twin, sperimentando approcci innovativi e costruendo un framework urbano digitale condiviso, in cui tecnologia, dati e governance si uniscono per favorire una manutenzione più consapevole, efficiente e sostenibile delle città, offrendo al tempo stesso nuove prospettive di ricerca.

Una prospettiva diversa viene affrontata nel caso del Palazzo Unico della Regione Piemonte, considerato un sistema complesso e sul quale viene adottato un linguaggio grafico innovativo e una metodologia in tre fasi (analisi, decodifica e sintesi; Fig. 14), che integra rilievi e documentazione in un BIM computazionale, riorganizza i dati e li restituisce tramite dashboard, diventando banco di prova per metodologie innovative di manutenzione e gestione (Osello et alii, 2024b). Tale metodologia, che integra pensiero computazionale e rappresentazione grafica, mira a trasformare la complessità in risorsa cognitiva, rendendo interpretabili i dati e migliorando il processo decisionale in ambito manutentivo.

Uno dei principali punti di forza del lavoro consiste nella capacità di rendere accessibili e comprensibili le informazioni tecniche, favorendo una gestione del Patrimonio edilizio più trasparente e partecipata. Un aspetto distintivo del progetto è la scalabilità della metodologia che ne permette l'applicazione anche in altri contesti con Patrimoni edili complessi o di grandi dimensioni. L'integrazione tra modelli BIM e algoritmi di analisi introduce un approccio innovativo nella gestione e manutenzione degli edifici, pur non potendo essere ancora definito un Digital Twin pienamente operativo e dinamico ma con basi per sviluppi futuri.

Tuttavia l'elevato livello di competenze tecniche richiesto per l'elaborazione dei modelli e per la gestione dei dati rappresenta una barriera d'accesso per le Pubbliche Amministrazioni, spesso prive di risorse e personale adeguatamente formato. Sul piano epistemologico inoltre permane la difficoltà di bilanciare la dimensione quantitativa dei dati con la valutazione qualitativa delle caratteristiche architettoniche e d'uso, che resta essenziale per una comprensione piena del comportamento del sistema edificio. In conclusione il caso del Palazzo della Regione Piemonte, pur con i limiti propri di un approccio ancora in fase di consolidamento, offre un con-

tributo rilevante nel delineare un nuovo paradigma di 'gestione digitale', in cui algoritmi, rappresentazione grafica e pensiero sistemico si fondono per supportare decisioni più informate, trasparenti e orientate alla sostenibilità (Fig. 15).

Criticità, compromessi e fattori abilitanti | Dall'analisi della letteratura emerge che l'adozione dei Digital Twin nel processo edilizio comporta insieme potenzialità e frizioni. Gli studi teorici (Peng et alii, 2020; Wang et alii, 2024; Mousavi et alii, 2024) evidenziano come le principali criticità riguardino la governance dei dati e il coordinamento tra stakeholder, con negoziazioni su accessi, responsabilità e riuso delle informazioni lungo il ciclo vita. Nei contesti complessi persistono timori legati all'automazione e alla fiducia, poiché il Digital Twin opera per lo più in modalità diagnostica senza controllo automatico, mantenendo un presidio umano nelle decisioni (Peng et alii, 2020).

Secondo la letteratura più recente la capacità e il livello di dettaglio a cui è possibile adottare tecnologie avanzate come il Digital Twin dipendono anche dalla complessità dell'opera e dal grado di maturità digitale dell'organizzazione. L'automazione e il controllo offrono opportunità ma sollevano que-

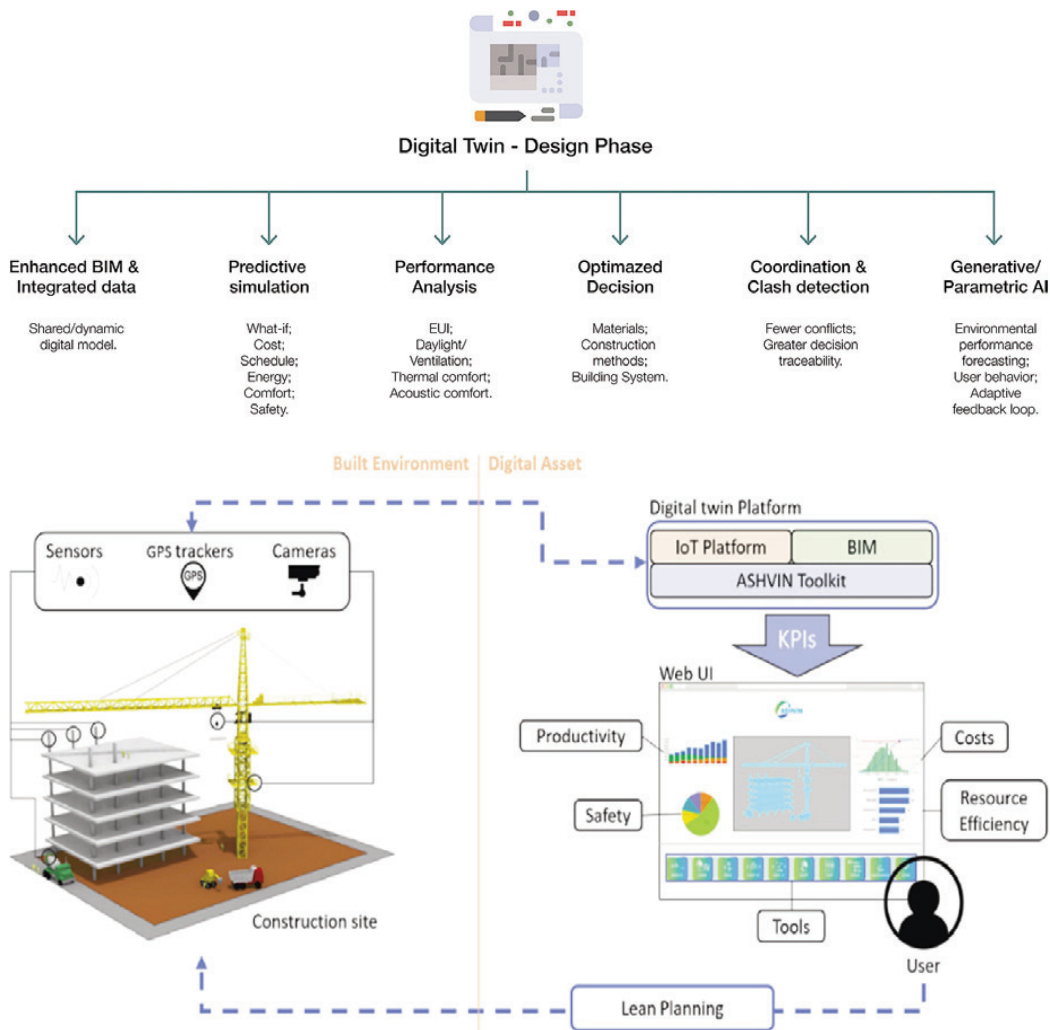


Fig. 6 | Application of Digital Twin in design phase (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Fig. 7 | Information flow from data-collection to performance indicators (source: Chacón et alii, 2024).

stioni operative e di responsabilità; nel contesto attuale di riferimento i modelli decisionali basati sulla supervisione dell'essere umano bilanciano ambizione tecnologica e sostenibilità organizzativa, garantendo una gestione controllata dei processi (Nguyen and Adhikari, 2023; Weichbroth, Jandy and Zurada, 2024).

I casi studio analizzati confermano e concretizzano queste evidenze, mostrando come nella pratica il potenziale del Digital Twin si confronti con la complessità del coordinamento multi-attore e con la necessità di standardizzare i dati per garantire scalabilità e riuso. Nella fase di costruzione, ad esempio, il caso di Barcellona (Chacón et alii, 2024) mostra come la digitalizzazione sia ancora disomogenea e richieda un quadro chiaro di ruoli, diritti e doveri sul dato, formalizzato in policy operative; allo stesso modo il caso dello Shanghai East Hospital (Peng et alii, 2020) conferma la necessità di competenze specialistiche e di infrastrutture tecnologiche avanzate la cui carenza riduce la trasferibilità del modello in contesti a bassa maturità digitale.

Inoltre nella fase di gestione e manutenzione studi come quelli di Longo et alii (2024) e Osello et alii (2024b) mettono in luce che l'assenza di software pienamente interoperabili e l'uso di linguaggi grafici innovativi, pur utili alla lettura sistemica, possono produrre semplificazioni eccessive e richiedere competenze avanzate non sempre disponibili: queste evidenze applicative riflettono i limiti già individuati in letteratura, traducendoli in difficoltà operative e gestionali. Accanto agli aspetti tecnici e infrastrutturali sia gli studi teorici che i casi studio im-

pongono una dimensione etica decisiva relativa alla privacy, alla sicurezza informatica e alla governance dei dati. L'interoperabilità incompleta dei dati, se non adeguatamente governata, ne limita l'impiego (Longo et alii, 2024), generando compromessi tra rapidità di sperimentazione e solida governance dei dati, tra apertura e tutela della riservatezza. L'assenza di policy unitarie e di norme di sicurezza adeguate riduce l'uso di dati sensibili e lascia funzioni incomplete (Peng et alii, 2020), imponendo di bilanciare innovazione e controllo degli impatti socio-etici.

Infine la convergenza tra letteratura e casi studio è evidente nella riflessione su nuove figure professionali e modelli organizzativi emergenti che redistribuiscono responsabilità lungo la filiera e garantiscano coerenza di processi e capacità di guidare il cambiamento tecnologico, organizzativo e culturale indotto dalla transizione digitale (Zannoni et alii, 2024). In sintesi, se il superamento delle criticità richiede compromessi espliciti e tracciabili, il prossimo passo è consolidare fiducia e responsabilità per abilitare gradi crescenti di automazione in sicurezza e benefici misurabili nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione (Tab. 3).

In tale scenario il superamento delle criticità non può essere letto unicamente in chiave tecnologica o gestionale, ma richiede un allargamento del quadro interpretativo capace di includere dimensioni sociali e organizzative. Da questa prospettiva emerge un salto disciplinare che riconosce come l'efficacia del gemello digitale dipenda anche dalla sua capacità di generare valore umano: il benessere si

misura nella capacità del sistema di migliorare salute, sicurezza e comfort ambientale; la formazione nella possibilità di trasferire competenze e apprendimento digitale; il lavoro dignitoso nella promozione di condizioni operative sicure, trasparenti e partecipative. Questa lettura interdisciplinare amplia il significato del gemello digitale, ponendolo come strumento di mediazione tra innovazione tecnologica e qualità della vita lavorativa, in coerenza con il paradigma umano-centrico dell'Industria 5.0.

Risultati trasversali: sinergie e compromessi con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile | In riferimento all'SDG 8 il Digital Twin contribuisce a una crescita produttiva e di qualità rendendo le fasi del processo edilizio più rapide, prevedibili e meno dispendiose. In progettazione flussi BIMtoBEM accelerano le analisi e riducono lavorazioni e tempi di coordinamento, con ricadute dirette su produttività ed efficienza nell'uso delle risorse (Osello et alii, 2024a); in cantiere e negli asset complessi monitoraggi in tempo reale, ispezioni virtuali e avvisi contestuali sostengono prevenzione e risposta rapida ai rischi, innalzando gli standard di sicurezza e riducendo i fermi produttivi (Chacón et alii, 2024; Peng et alii, 2020); in gestione interfacce e algoritmi collegati ai modelli informativi permettono di governare migliaia di ambienti in grandi strutture pubbliche, comprimendo i tempi decisionali del facility management e migliorando la qualità del servizio (Osello et alii, 2024a). L'ecosistema Digital Twin inoltre abilita acquisizione di competenze e nuove professionalità lungo la filiera, come il Transitional Industrial Desi-

gner che integra responsabilità economiche, sociali e ambientali lungo l'intero ciclo di vita dell'opera (Zannoni et alii, 2024) e crea spazi per servizi digitali e imprenditorialità, grazie a strumenti interoperabili e accessibili che facilitano adozioni graduali (Osello et alii, 2024b; Chacón et alii, 2024). In sintesi il Digital Twin riduce sprechi e tempi morti e amplia le competenze richieste dal mercato, favorendo occupazione qualificata, crescita inclusiva, nuovi ruoli e competenze lungo l'intero ciclo vita del costruito.

In riferimento all'SDG 7 il Digital Twin fa da ponte tra progetto e gestione per ampliare l'accesso a servizi energetici affidabili e a costi sostenibili, accelerare l'integrazione delle rinnovabili, migliorare l'efficienza e rafforzare infrastrutture e competenze. Sul fronte dell'efficienza, lo scambio di dati tra modello informativo e modello energetico in fase di progetto consente di comparare rapidamente alternative d'involucro e impianto (Osello et alii, 2024a): in esercizio il Digital Twin collegato a sensori abilita monitoraggi continui, rileva anomalie e simula previsioni, con risparmi misurabili e riduzione di guasti / ripari evitati (Peng et alii, 2020).

A scala urbana il Digital Twin supporta la configurazione di Comunità Energetiche e PED con valutazioni dei costi e dei benefici (Longo et alii, 2024). L'accessibilità economica è favorita dalla riduzione di sprechi e rilavorazioni lungo il ciclo vita e dalla ge-

stione dei picchi energetici, con effetti su bollette e continuità del servizio (Peng et alii, 2020). Nel complesso il Digital Twin rende trasparenti le prestazioni, accelera le decisioni progettuali a bassa intensità energetica e coordina l'operazione efficiente dei sistemi contribuendo in modo concreto al raggiungimento dell'SDG 7.

In riferimento all'SDG 3 il Digital Twin contribuisce alla tutela della salute e alla riduzione dei rischi lungo l'intero ciclo vita dell'opera; sul versante prevenzione degli infortuni e sicurezza del lavoro il Digital Twin in cantiere abilita monitoraggio situazionale e allerta proattiva: nel caso autostradale l'integrazione di modelli 3D, flussi di dati e software di simulazione immersiva consente ispezioni virtuali, con effetti diretti sulla riduzione degli infortuni, e una migliore prontezza decisionale sul campo (Chacón et alii, 2024).

Inoltre l'uso di processi informativi, come il BIM e il CoSIM, e tecnologie digitali come la realtà virtuale adottate ai fini della pianificazione per fasi e addestramento immersivo su procedure critiche, trasferisce competenze in ambiente sicuro e riduce esposizione a scenari pericolosi; la stessa impostazione quantifica anche costi e misure anti-contagio, collegando la sicurezza organizzativa alla protezione della salute nei luoghi di lavoro (Luiso, 2021). Infine sul piano della salute ambientale e della qualità del-

l'aria i Digital Twin orientati all'energia supportano strategie di ventilazione e controllo microclimatico, manutenzione predittiva delle UTA e ottimizzazione dei consumi / emissioni; a scala urbana gemelli energetici semplificati consentono scenari di decarbonizzazione che riducono l'esposizione della popolazione a inquinanti e picchi termici (Osello et alii, 2024a; Longo et alii, 2024). In sintesi, tra cantiere edificio in esercizio e distretto, il Digital Twin riduce incidenti e condizioni nocive, tramite diagnosi e simulazione, e migliora il benessere di tutti gli attori coinvolti (Fig. 16).

Oltre ai risultati già discussi, i casi analizzati mostrano che il Digital Twin opera come 'infrastruttura abilitante' capace di connettere innovazione industriale e infrastrutturale, città sostenibili, cicli di consumo più sobri e traiettorie di decarbonizzazione, generando sinergie significative anche con altri SDG. In ambito produttivo e delle grandi infrastrutture, il Digital Twin consolida processi decisionali informati e introduce competenze e ruoli ad alto valore (Zannoni et alii, 2024; Chacón et alii, 2024).

A scala urbana la modellazione integrata di edifici, reti e flussi rende più leggibili le prestazioni dei distretti e supporta una regia coordinata di trasformazioni energetiche, mobilità e servizi, con effetti concreti su vivibilità e sicurezza (Longo et alii, 2024; Peng et alii, 2020; Gausa, 2024). Sul versante del-

Fig. 8 | Main stages of a Digital Twin for the hospital building (source: Peng et alii, 2020).

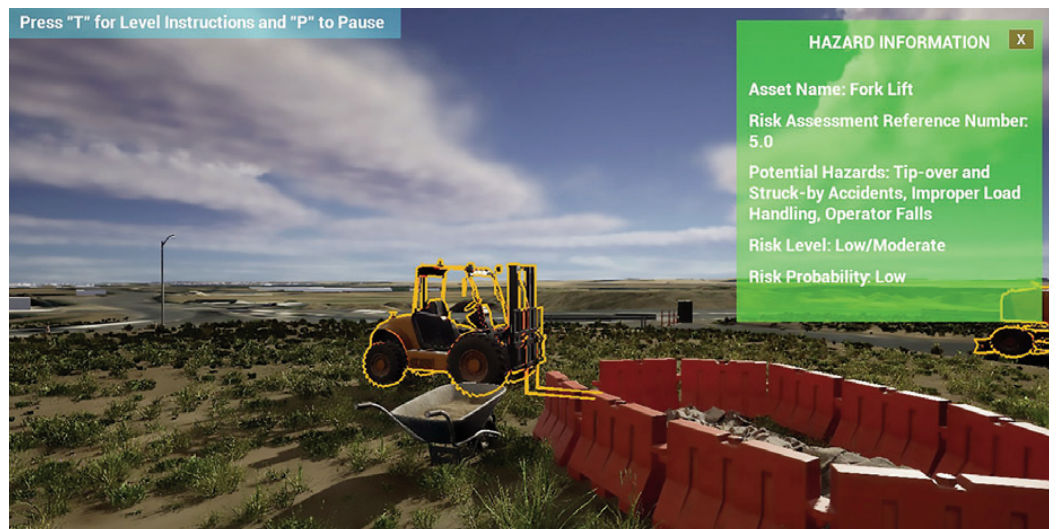
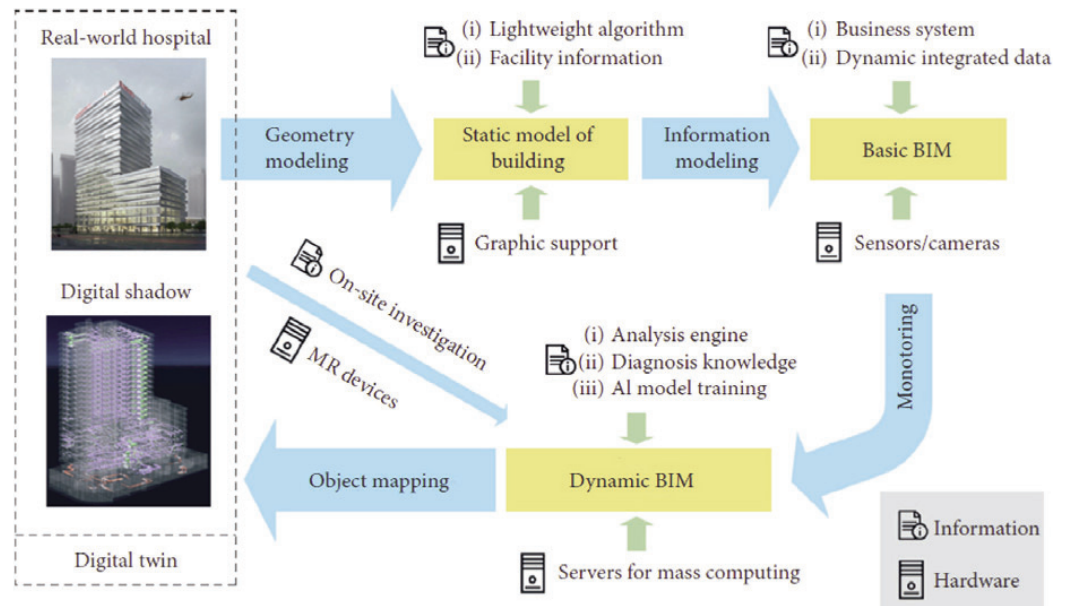
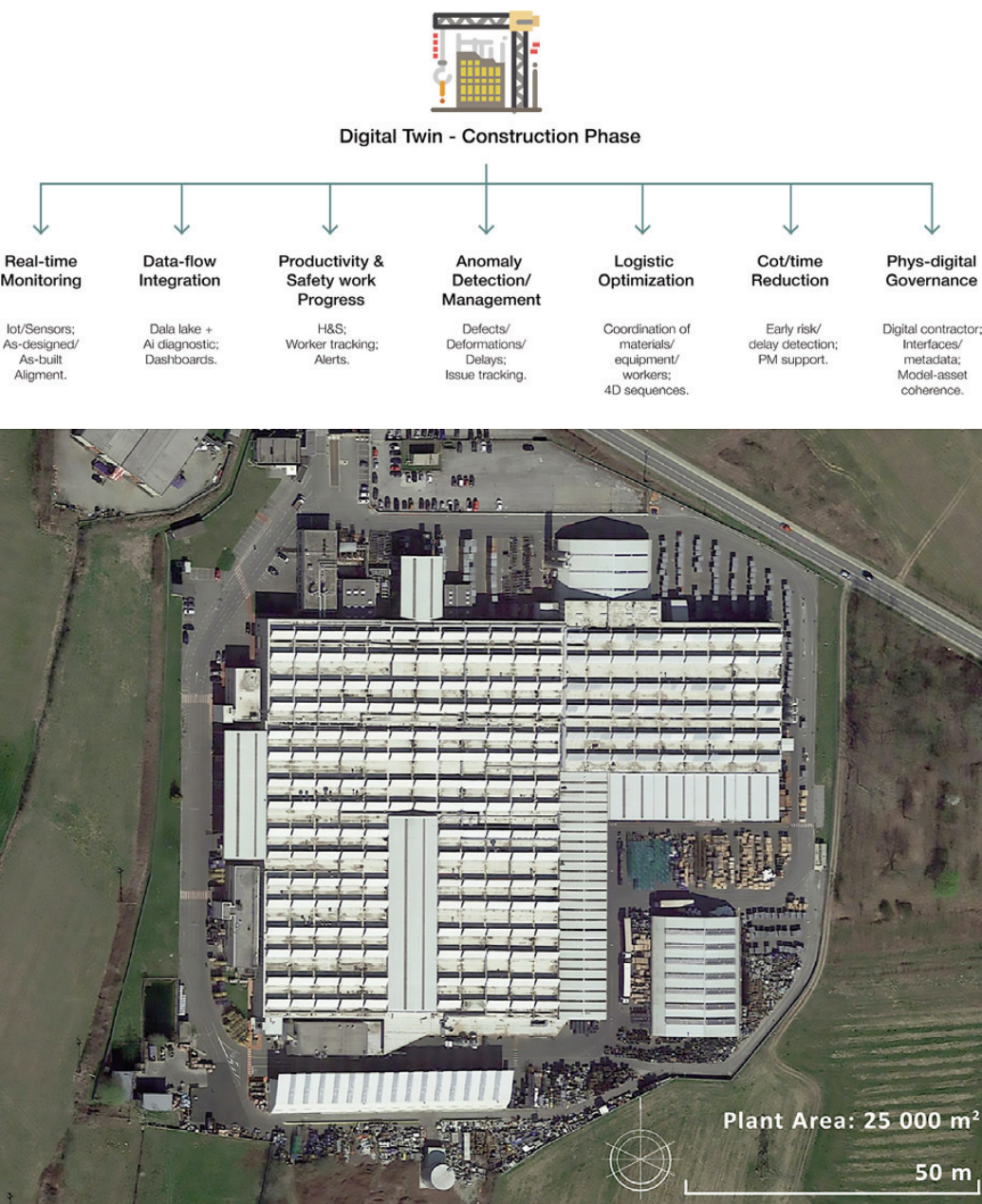


Fig. 9 | User interface with information on hazards and risks in the workplace (source: Ellul et alii, 2024).



le risorse il Digital Twin rende visibili inefficienze e opportunità lungo il ciclo di vita, orientando scelte di progetto, approvvigionamento e gestione verso minori sprechi e maggiore circolarità (Osello et alii, 2024a). In questo quadro la capacità del gemello di collegare simulazione e monitoraggio apre margini reali per ridurre consumi ed emissioni e pianificare percorsi di decarbonizzazione coerenti con i vincoli locali (Longo et alii, 2024).

Tuttavia l'adozione del Digital Twin comporta anche alcuni compromessi che incidono, in diversa misura, sul raggiungimento dei 17 SDG. Sul piano economico e occupazionale l'automazione e la digitalizzazione dei processi introdotte dal Digital Twin possono accentuare squilibri nel mercato del lavoro, riducendo la domanda di manodopera tradizionale e creando nuove barriere di accesso per operatori e imprese meno digitalizzate. L'aumento della complessità tecnologica richiede competenze avanzate e specialistiche che possono compromettere la crescita inclusiva e la qualità del lavoro.

Dal punto di vista energetico e ambientale i vantaggi in termini di efficienza operativa possono essere parzialmente compromessi dall'elevato fabbisogno di risorse necessario per alimentare l'infrastruttura digitale. I flussi di dati generati dai gemelli richiedono reti di sensori, server e data center di grandi dimensioni, con consumi elettrici significativi e impatti legati alla produzione, al raffreddamento e alla manutenzione delle apparecchiature. La gestione e l'approvvigionamento delle materie prime rappresentano un ulteriore punto critico che rende le filiere più vulnerabili e sollecita strategie di economia circolare per la gestione del ciclo vita delle tecnologie. Sul piano sociale l'evoluzione digitale che accompagna l'implementazione dei Digital Twin evidenzia il rischio di ampliamento del digital divide per imprese e comunità. Le categorie più vulnerabili, in particolare quelle con minori risorse economiche o competenze digitali, possono essere escluse dai benefici informativi e dai processi partecipativi, compromettendo il principio di equità e inclusione che sottende l'Agenda 2030. L'adozione del Digital Twin urbano è inoltre costosa e complessa, poiché ri-

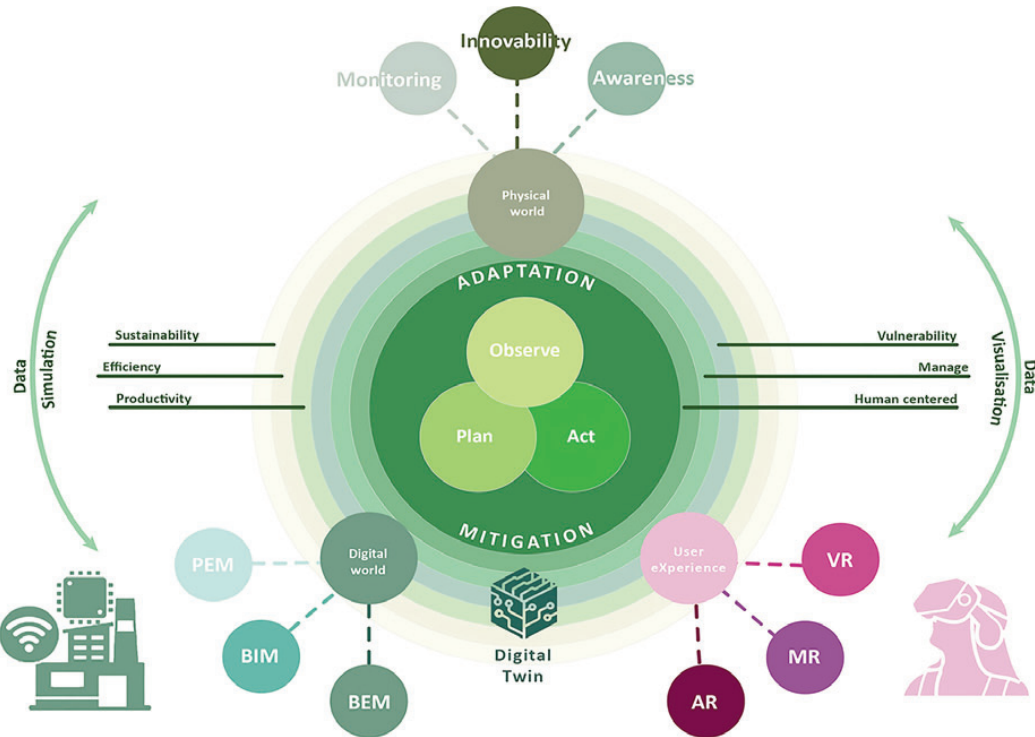


Fig. 10 | Application of Digital Twin in construction phase (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Fig. 11 | Overview of the case study in Google Earth (source: Osello et alii, 2024a).

Fig. 12 | Centrality of human action in the physical-digital interaction (source: Osello et alii, 2024a).

chiede capacità di investimento, competenze e infrastrutture che non tutti i territori possiedono, con il rischio di ampliare il divario tra grandi città e realtà minori, creando disuguaglianze nella capacità di innovazione e nella qualità dei servizi urbani, in contrasto con gli obiettivi di città sostenibili e inclusive.

Dal punto di vista etico, sebbene il Digital Twin offra strumenti avanzati di prevenzione, monitoraggio e controllo dei rischi, la raccolta e la gestione di dati sensibili introducono criticità legate alla privacy, alla cybersicurezza e all'uso etico delle informazioni. Inoltre la crescente fiducia nei modelli digitali potrebbe compromettere la percezione diretta del rischio e la capacità decisionale autonoma degli operatori. Questi elementi richiedono un bilanciamento

tra controllo tecnologico, tutela dei diritti individuali e valorizzazione della competenza umana, affinché il progresso digitale non comprometta il ruolo decisionale dell'essere umano.

Sul piano istituzionale e normativo l'attuale frammentazione degli standard, la mancanza di un quadro normativo unitario e la disomogeneità nelle politiche di gestione dei dati rendono difficile un'applicazione coordinata tra imprese, Enti pubblici e territori. L'assenza di linee guida comuni su interoperabilità, privacy, sicurezza e responsabilità rischia di rallentare l'innovazione e di generare disuguaglianze nell'accesso alle tecnologie. Una governance efficace del gemello digitale richiede dunque una cornice regolativa che armonizzi le pratiche e renda

possibile un'azione integrata e trasparente (Fig. 17).

Conclusioni e prospettive future | La rassegna evidenzia come l'evoluzione tecnologica e digitale stia assumendo un ruolo sempre più centrale nel settore delle costruzioni, migliorando l'efficienza delle diverse fasi del ciclo vita dell'opera. I casi esaminati mostrano come il Digital Twin favorisca una crescita produttiva e di qualità, rendendo le fasi del processo edilizio più rapide, prevedibili e meno onerose, ottimizzando l'efficienza energetica, rafforzando la tutela della salute e del benessere, contribuendo allo sviluppo dell'economia circolare e alla mitigazione dei cambiamenti climatici (Sharma and Gupta, 2024).

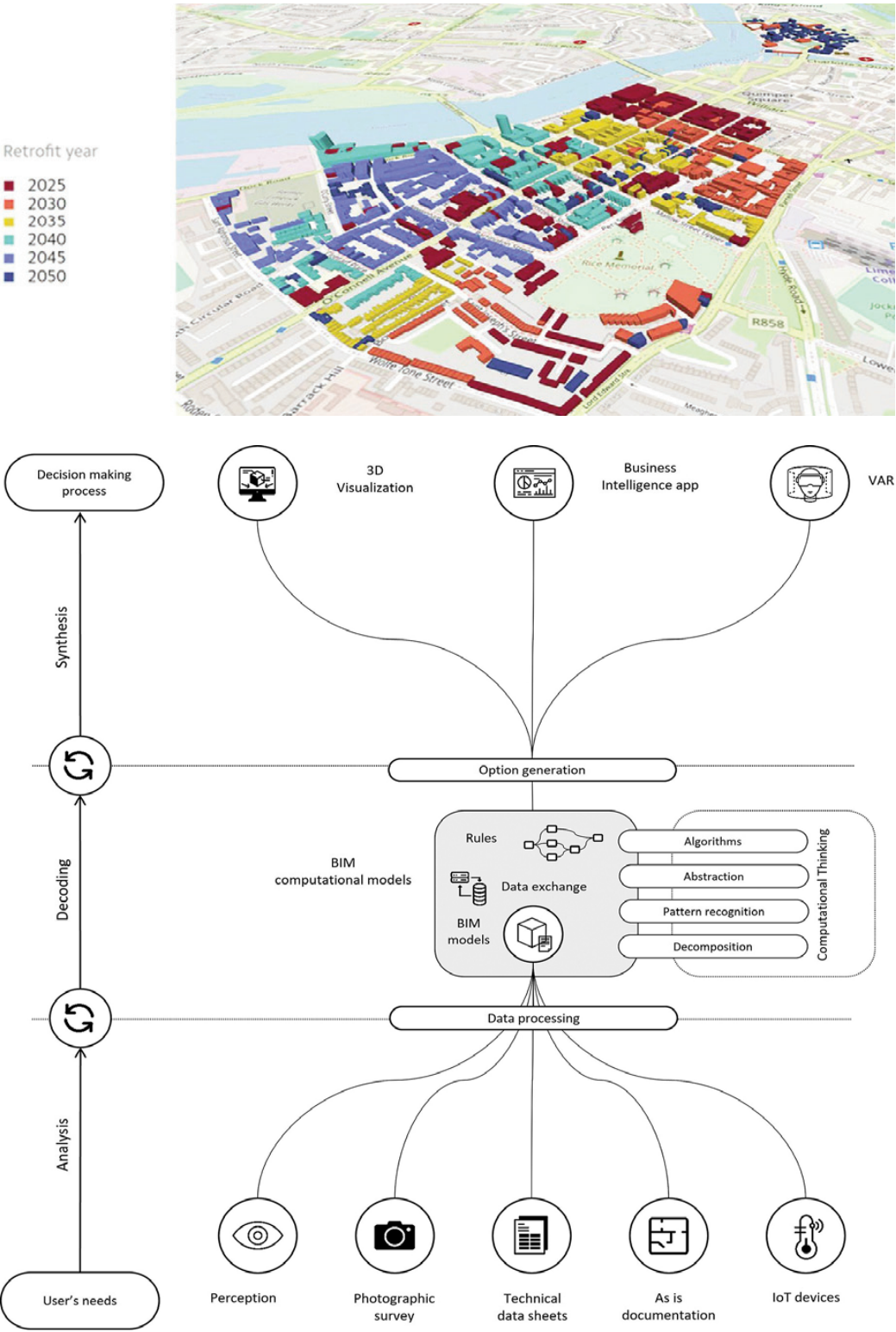


Fig. 13 | Decarbonisation roadmap (source: Longo et alii, 2024).

Fig. 14 | Informative decision-making process (source: Osel-lo et alii, 2024b).

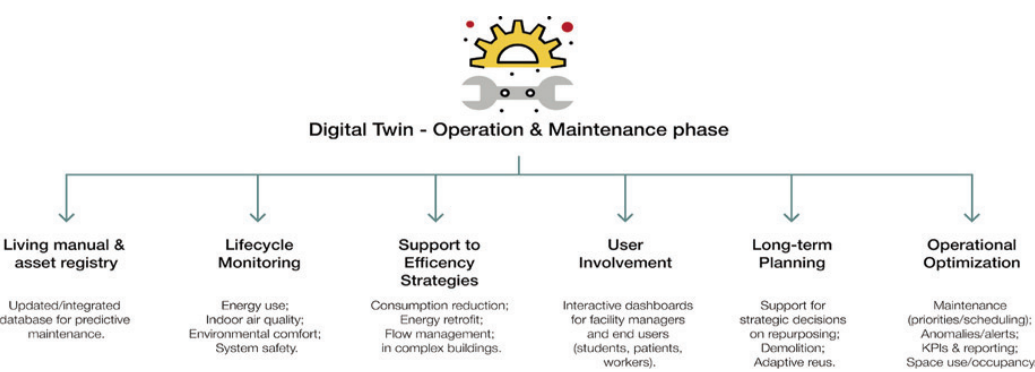


Fig. 15 | Application of Digital Twin in O&M phase (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Domain	Key issues	Trade-offs	Enablers / Actions
Governance and Stakeholders	Unclear access, responsibilities, and data reuse; DT often remains diagnostic-only (Peng et alii, 2020)	Experiment Speed ↔ Solid Data Governance	Data policies and contractual clauses; RACI roles; SLAs; audit logs and traceability
Data and Interoperability	Heterogeneous sources; incomplete standards; ethics / privacy constraints (Longo et alii, 2024)	Openness ↔ Privacy; Data Granularity ↔ Sustainability	Open standards (IFC / ontologies / APIs); metadata catalogues; role-based access; privacy-by-design / DPIA
Automation and Safety-critical	Limited automatic actuation; manual fallback required	Decision Speed ↔ Validation / Safety	Human-in-the-loop; explainable AI; safety controls; fail-safe / circuit-breaker procedures
Model Fidelity and Reliability	Simplifications to cut time / costs risk reliability (Osello et alii, 2024)	Accuracy ↔ Resources	Validation metrics; M&V with real data; purpose-fit LOD / LOI; specialist software
Visualisation and Skills	Innovative visuals risk oversimplification; skills gaps	Clarity ↔ Information Richness	Visual analytics guidelines; training / upskilling; data stewardship
Infrastructure and Scalability	High CapEx / OpEx; retrofit on as-built; continuity of data flows/storage (Peng et alii, 2020)	Performance ↔ Cost; Cloud ↔ On-prem	Modular architectures; hybrid edge+cloud; CapEx / OpEx planning; sensor prioritisation
Organization and Market	Fragmented processes; uneven maturity; need for pilots (Chacón et alii, 2024)	Standardisation ↔ Local Adaptation	Pilot projects with KPIs; scalability roadmaps; operational guidelines
Ethics, Trust, and Adoption	Public / worker distrust; socio-ethical implications (Nava and Melis, 2024)	Radical Innovation ↔ Impact Control	Stakeholder engagement; algorithmic transparency; communication and training
Professional Roles (TID/DER)	Hard to operationalise in multi-actor ecosystems (Zannoni et alii, 2024)	Central Governance ↔ Actor Autonomy	Information requirements; interoperability standards; metrics; change management
Responsibility (accountability)	Weak reporting / traceability	Speed ↔ Auditability	KPIs and reporting; audit trails; clear 'duty to account' rules

Tab. 3 | Challenges, trade-offs, and enabling conditions of the Digital Twin in the building process (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Tuttavia l'analisi critica svolta mostra come le principali revisioni tecniche tendano a trascurare le implicazioni umane, etiche e di giustizia sociale introdotte dal paradigma 5.0, riducendo il gemello digitale a strumento prestazionale e non a dispositivo relazionale e cognitivo. In questo senso il contributo propone uno scarto interpretativo che restituisce alla persona, come progettista, lavoratore e utente, un ruolo centrale nel processo di digitalizzazione edilizia, valorizzandone competenze, responsabilità e capacità decisionale.

Nella fase di progettazione la centralità della persona si esprime nella capacità del progetto di tradurre bisogni, abitudini e aspettative in soluzioni spaziali e tecnologiche. Il caso esaminato mostra come il Digital Twin consenta di simulare diversi scenari d'uso e di verificare in tempo reale il livello di comfort ambientale, la qualità dell'aria, la luminosità o la percezione acustica, orientando così le decisioni progettuali verso il benessere dell'utente finale. Questa possibilità di osservare, prevedere e adattare le prestazioni dell'edificio, già in fase di ideazione,

rappresenta uno dei contributi più significativi del gemello digitale che diventa strumento di ascolto e mediazione tra la dimensione tecnica e quella umana: il progettista non è sostituito dall'automazione, ma ne guida l'uso critico, interpretando i dati per restituire valore sociale e culturale al progetto.

Nella fase di costruzione i casi analizzati mostrano un forte carattere sperimentale: vengono utilizzati sistemi e piattaforme digitali provenienti da settori diversi rispetto a quello delle costruzioni, come motori di simulazione o ambienti di realtà virtuale, nel tentativo di migliorare la pianificazione, il monitoraggio e la sicurezza in cantiere. Queste sperimentazioni aprono nuove possibilità, ma evidenziano anche limiti di trasferibilità e difficoltà di applicazione diffusa, poiché la fase di costruzione è la più articolata e complessa del processo edilizio.

In cantiere si intrecciano attività molteplici, competenze specialistiche e responsabilità condivise che rendono indispensabile una gestione coordinata e una comunicazione efficace tra tutti gli attori coinvolti. In questo scenario il Digital Twin può di-

ventare uno strumento prezioso per connettere persone, mezzi e informazioni, migliorando l'efficienza delle operazioni e, allo stesso tempo, garantendo la salvaguardia dei lavoratori. L'introduzione di nuove figure professionali legate alla digitalizzazione può avere un impatto decisivo nel migliorare la qualità, la sicurezza e la sostenibilità del cantiere. La vera innovazione non risiede dunque solo negli strumenti digitali, ma nella capacità di mantenere la persona al centro del processo, riconoscendone il ruolo di protagonista e di beneficiario della trasformazione.

Nella fase di gestione e manutenzione la centralità della persona assume un significato ancora più concreto, perché è in questa fase che il rapporto tra tecnologia e vita quotidiana si manifesta pienamente. I casi analizzati mostrano come il Digital Twin possa supportare le attività di manutenzione prevedendo guasti, ottimizzando gli interventi e migliorando l'efficienza energetica, ma il suo valore più profondo risiede nella capacità di mettere in connessione le persone con gli spazi che abitano e gestiscono: tecnici, facility manager e utenti finali di-

ventano parte attiva del sistema, contribuendo con i loro comportamenti e le loro decisioni ad aggiornare e migliorare il modello digitale.

In questa prospettiva il gemello digitale non è solo uno strumento di controllo, ma un ambiente collaborativo che rafforza la consapevolezza, la partecipazione e la responsabilità condivisa nella cura dell'edificio o della città. La possibilità di visualizzare in tempo reale lo stato di un impianto o di un ambiente non solo semplifica le operazioni, ma rende più trasparente la gestione, permettendo a chi utilizza gli spazi di comprenderne il funzionamento e di contribuire al loro miglioramento; è in questo dialogo continuo tra dato e esperienza che il Digital Twin diventa realmente umano-centrico.

Il contributo si è concentrato sulle fasi di progettazione, costruzione, gestione e manutenzione e ha tralasciato altre due fasi fondamentali del ciclo vita dell'opera, la programmazione e la dismissione o fine vita. Tale scelta – sebbene sia motivata dal fatto che la sperimentazione del Digital Twin in queste fasi risulta ancora limitata – costituisce il limite principale del contributo, pur nella consapevolezza che il gemello abbia un elevato potenziale strategico per la gestione sostenibile delle risorse, la pianificazione preventiva e la valutazione dell'impatto ambientale dell'opera nel lungo periodo. In tale prospettiva la ricerca potrà estendere l'osservazione oltre le fasi considerate, adottando una visione lungo l'intero ciclo vita e integrando approcci valutativi trasversali che si estendano anche a target di sostenibilità più ampi, ad esempio quelli relativi al sociale.

Alla luce di quanto esposto si ritiene necessario un ulteriore sforzo collaborativo tra comunità scientifica, governance e società civile che da un lato prosegue nell'affrontare le questioni tecniche e tecnologiche, dall'altro adotti modalità di ricerca centrate sulla persona, riconoscendone il ruolo sia di decisore che di utente finale. Al contempo la trasferibilità in altri settori affini che similmente richiedono lo sviluppo di modelli digitali complessi finalizzati alla gestione di asset contribuirebbe a una maggiore comprensione dei flussi metodologici attraverso lo scambio di informazioni e conoscenze.

Da questa prospettiva il Digital Twin può essere letto come piattaforma di convergenza fra saperi tecnici e discipline sociali, aprendo scenari di ricerca applicata che includono economia circolare, etica dei dati, formazione digitale e nuovi modelli di governance collaborativa. La trasferibilità dei risultati ad ambiti come la gestione urbana, l'industria e le infrastrutture suggerisce la possibilità di costruire un linguaggio metodologico condiviso per l'analisi dei processi complessi e delle loro ricadute sui contesti di vita.

In tale ottica l'originalità del presente contributo risiede nel porre questa traiettoria entro la cornice umano-centrica dell'Industria 5.0: l'avanzamento del Digital Twin non viene letto solo come maturazione tecnologica o infrastrutturale, né soltanto come leva di nuove professionalità, ma come capacità di rispondere ai bisogni degli utenti (Nava and Melis, 2024). In questo scenario l'innovazione trova terreno fertile per espandersi ed evolvere, a condizione che mantenga la persona e i suoi bisogni al centro delle proposte di valore. In tale accezione l'innovazione sostenibile pone congiuntamente al primo piano benessere sociale e ambientale, favorendo una transizione etica a beneficio della collettività (Sposito and Scalisi, 2024). Le implicazioni culturali e pratiche sono evidenti: un Digital Twin con-

cepito per le persone e non solo sui dati, può sostenere crescita qualificata e aggiornamento di professionalità, ridurre sprechi ed esternalità lungo la filiera e migliorare salute e sicurezza, traducendo l'innovazione digitale in valore sociale ed economico condiviso. In prospettiva la ricerca dovrà indagare nuovi modelli di valutazione multidimensionale del gemello digitale, capaci di coniugare indicatori tecnici e metriche di benessere, promuovendo un quadro di politiche per l'adozione consapevole e inclusiva di tali strumenti. Ciò implica un cambio di paradigma dal gemello come 'replica tecnologica' al gemello come 'ecosistema cognitivo e sociale', fondato su responsabilità, equità e cooperazione, secondo una visione in cui il progresso digitale si misura nella sua capacità di potenziare l'opera umana e non di sostituirla.

The construction sector represents one of the main sources of greenhouse gas emissions worldwide and the AEC industry contributes substantially to the impacts of the built environment (Xu, Kim and Chen, 2025; Amarasinghe et alii, 2025), standing among the primary contributors to global carbon emissions, with approximately 40% of total energy-related emissions (World Green Building Council, 2024). From global initiatives such as the Paris Agreement (UN, 2015b) to the strategies of the European Union, including the European Green Deal (European Commission, 2019), the construction industry emerges as a key lever for decarbonisation and climate neutrality. In Italy, the Integrated National Energy and Climate Plan (Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2023) aligns objectives and resources to improve the energy performance of the building stock (Tab. 1).

According to the study conducted by the Buildings Performance Institute Europe (BPIE, 2024), measures adopted in Italy have reduced CO₂ emissions and the energy consumption of buildings and increased the use of renewables; however, these advances are still not aligned with the set objectives, postponing over two-thirds of the effort until 2050. In this perspective, the principle of sustainable development assumes a foundational role in rethinking the construction sector, orienting it toward models capable of combining economic growth, environmental protection, and social well-being, ensuring a balanced, equitable, and lasting use of available resources (Fig. 1; Holden et alii, 2014).

The transition from Industry 4.0 to Industry 5.0 reinforces this vision, shifting the focus from automation and process efficiency to a human-centred paradigm in which sustainability, social equity, and technological innovation integrate to generate resilient solutions and long-term services for the benefit of society (Fig. 2; Wang et alii, 2024). Emerging technologies such as the Digital Twin play a strategic role in translating the human-centred perspective of Industry 5.0 into concrete applications for the construction sector (Nava and Melis, 2024). Today, this technology represents one of the most significant innovations in civil engineering, finding application throughout the different stages of the building process, from planning, design, and construction to management and maintenance (Zhang et alii, 2023). Within this thematic framework, the paper aims to

contribute to the scientific and disciplinary debate by offering a critical interpretation of the interconnections between technological and digital innovation and the Sustainable Development Goals (SDGs), supported by an examination of case studies addressing the role of the Digital Twin applied to various stages of the building process as a lever for productive, environmental, and social transformation. Through an interdisciplinary and multilevel approach, the contribution highlights the complexity of the topic in relation to current challenges, trade-offs, and future application perspectives, aiming to guide the construction sector toward an effective transformation with environmental, economic, and social impacts.

The objective of this critical essay is to reflect on the potential of the Digital Twin not only as a technological advancement but as a mediation tool between innovation and social responsibility, recognising the value of human contribution in every stage of the building life cycle. It focuses on the needs of clients, workers, and end users, contributing to the development of new paradigms for well-being, safety, and professionalism. This perspective differs from the current state of the art, which tends to privilege a mainly technical and performance-oriented interpretation of the Digital Twin, proposing instead a systemic vision capable of integrating technological, social, and environmental dimensions. The purpose of the contribution is to foster a critical reflection on the digital transition of the construction sector, guiding it toward development models that combine technological innovation, work quality, and people's well-being, in line with the human-centred vision of Industry 5.0.

This approach broadens the disciplinary debate on the use of digital technologies, offering insights into the development of new models for evaluating well-being and productivity, as well as fostering more inclusive and sustainable governance strategies. This contribution mainly targets the scientific community, public decision-makers, construction sector professionals, stakeholders involved in managing and transforming the built environment, and end users, providing valuable perspectives to inform policies, strategies, and practices towards an ethical, fair, and sustainable digital transition.

The reference framework is that of contemporary architectural and technological research, with particular attention to the digital transformations of building processes and their social and environmental impacts. The originality of this contribution lies in adopting a critical and systemic perspective that interprets the Digital Twin not only as a technological tool but also as a driver of productive, social, and environmental transformation, while maintaining the centrality of the human being.

The paper is structured into six main sections, the first of which traces the evolution of the concept of the Digital Twin and its applications up to the construction sector, introducing the enabling technologies associated with it and the areas of application within the construction process. The methodological section adopts a critical, argumentative, and analytical approach, aimed at systematising the adoption methods of the Digital Twin across the design, construction, and management phases of a project, highlighting its potential, limitations, and barriers to adoption. Subsequently, the paper presents reflections on the selected literature and case studies, synthesising the theoretical and practical evidence

and linking technological transformations with organisational, social, and ethical aspects consistent with the human-centred vision of Industry 5.0.

A section dedicated to the synthesis of cross-cutting results analyses the synergies between the Digital Twin and the SDGs, focusing particularly on the connections to Goals 8, 7, and 3, while also providing an overall view of the synergistic or trade-off effects that its adoption may generate with respect to the entire framework of the 2030 Agenda. The conclusions critically review the findings that emerged in each phase of the building process, highlighting how the Digital Twin can reinforce the centrality of the human being during design, construction, and management stages, as well as identifying the main limitations of the study and possible future development directions aimed at a more conscious, inclusive, and human-centred use of technology.

Origin and application developments of the Digital Twin in the building life cycle | The essay, characterised by a narrative-critical and multidisciplinary approach, is based on a qualitative selection of scientific articles analysing the application of the Digital Twin to the design, construction, and management / maintenance phases of the building process.

The selection of sources was guided by a qualitative and interpretative criterion aimed at identifying contributions that meaningfully represent the evolution of the Digital Twin paradigm in the construction sector. Each phase was examined through representative case studies chosen for their ability to highlight their relationships with the SDGs, particularly with productivity (SDG 8), energy efficiency (SDG 7), and health and well-being (SDG 3). The sources were selected based on their conceptual and interdisciplinary relevance and subjected to a critical reading aimed at revealing their limitations, biases, and potential. Indeed, many studies tend to favour a technology- and performance-oriented vision of the Digital Twin, neglecting the organisational, social, and governance dimensions that influence its adoption. This meta-analytical reflection serves as the starting point for this critical interpretation.

The analysis of the selected application cases enables the identification of existing gaps and opportunities for further investigation, laying the foundation for a discussion oriented toward the principles of Industry 5.0 and the Sustainable Development Goals. For each phase, the articles presenting Digital Twins applications are examined, demonstrating the connections between contributions and the main thematic areas of reference: productivity, quality and energy efficiency, health, and well-being (Tab. 2).

The concept of the Digital Twin originated in the early 2000s in the manufacturing and aerospace fields, aiming to develop a digital copy of a physical system for performance monitoring and optimisation (Iliuta et alii, 2024). The Digital Twin system is structured into three fundamental components (Fig. 3): the real physical space; its virtual counterpart, which faithfully mirrors the characteristics of physical reality; and a bidirectional bridge connecting the two domains, enabling continuous exchange of data and information (Wang, 2020).

This technology has progressively become a cross-sectoral tool in numerous application areas: from aerospace, where it enables predictive maintenance and decision support; to the energy sector, where it optimises systems and infrastructures;

from manufacturing, where it allows the simulation of the entire product life cycle and promotes sustainable practices; to smart transport, where it enhances the dynamic monitoring of infrastructures and the mobility efficiency (Mousavi et alii, 2024). The adoption of the Digital Twin in the construction sector is more recent, emerging alongside the spread of BIM and other digital tools, fuelling the transformation of the industry and offering an integrated approach to managing the entire life cycle of a built asset (Yang et alii, 2024). The construction sector is currently facing a highly competitive global context (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023). Historically characterised by slow adoption of digital innovations, the AEC industry now shows a growing need for tools capable of supporting more ecological, efficient, and safe practices (Zhang et alii, 2023). In this scenario, the introduction of advanced digital technologies and intelligent systems, supported by connectivity infrastructures and integrated data ecosystems, has fostered the adoption of new tools and methodologies, triggering a profound transformation of the construction sector.

According to the UNI 10838:1999 standard, the building process is defined as an organised and structured sequence of phases that begins with the identification of the needs expressed by clients and users and leads to their fulfilment through a pathway that includes the design, production, construction, and management of the built asset itself (Fig. 4).

In the international context, the building process is commonly framed within the broader concept of the project life cycle. The U.S. Project Management Institute and the UK Association for Project Management identify the project life cycle as a sequence of four phases, from initiation to conclusion (Wang and Chen, 2023). Within this context, the building process functions as an intrinsically complex system that currently faces pressing challenges related to environmental, economic, and social sustainability goals.

Technological innovation plays a strategic role as an enabling factor in the transition toward more sustainable practices, as it enables the generation of products and services that respond more effectively and promptly to the growing complexity of contemporary needs (Weichbroth, Jandy and Zurada, 2024). The analysis of the scientific literature reveals a predominant concentration of studies on the application of the Digital Twin to the design, construction, and management phases of the life cycle of built assets (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023; Cumo et alii, 2025; Zhang et alii, 2023), which are also the phases analysed in the present contribution.

The innovative aspect of the Digital Twin lies in its ability to operate across different processes and scales: from design visualisation to the simulation of construction processes, from real-time performance monitoring to energy consumption optimisation, up to the planning of maintenance, renovation, and urban layout – from individual buildings to districts and cities (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023; Longo et alii, 2024; Yang et alii, 2024).

In addition to these applications, a growing body of literature highlights the integration of the Digital Twin with Artificial Intelligence and autonomous agents capable of making operational decisions and interacting via machine-to-machine logic. This shifts the focus from mere monitoring to automated decision-making and redefines roles, responsibilities, and competencies within design and man-

agement processes (Celaschi, Casoni and Formia, 2024). Given the multiple uses of Digital Twin, this paper adopts a reference framework of its essential components to guide the following sections.

Application in the design phase | In the design phase, the adoption of Building Information Modeling (BIM) enables the creation of integrated digital models that incorporate geometric, performance, and functional information about the asset (Yang et alii, 2024), while reducing design conflicts and documentation discrepancies and ensuring more accurate control over design decisions (Nguyen and Adhikari, 2023). At this stage, the Digital Twin represents an evolution of BIM, transforming it into a dynamic and continually updated model by integrating IoT sensors and artificial intelligence techniques (Lee et alii, 2021).

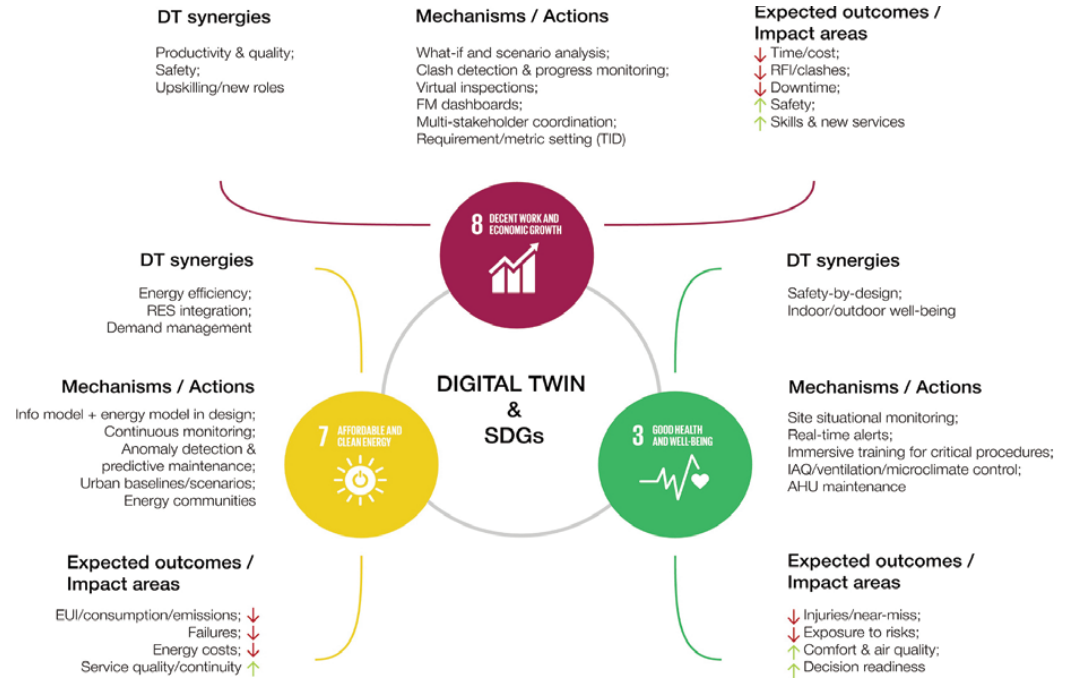
The integration of Artificial Intelligence into design processes enables the addition of predictive capabilities – such as environmental performance, user behaviour, and material responses – alongside image production, thus serving as both an exploratory and communicative tool (Nava and Melis, 2024). An example of the integrated application of BIM, Digital Twins, and Artificial Intelligence is provided by the study on the redevelopment of the former Manifattura Tabacchi in Turin (Italy), where the design of a smart library capable of connecting physical and digital data in real time is being tested (Ugliotti, D'Addetta and Fabbriatore, 2024). The research focuses on creating a multilevel digital system that integrates data and processes from different domains into a single, coherent environment.

At the lowest level, BIM provides the static information structure of the building, upon which a second level is built, consisting of a network of IoT sensors and smart cameras dedicated to collecting real-time environmental data. The third level, dedicated to processing, uses Artificial Intelligence algorithms to interpret collected information, detect behavioural patterns, and generate automated system responses. The methodology, based on an automated spatial matrix (Fig. 5), enables monitoring of environmental parameters such as brightness, temperature, and occupancy, and automatically triggers responses to optimise comfort, safety, and energy efficiency.

The main strength, which also underlies the choice of this case study, lies in the effective, synergistic integration of the three technologies, making the Digital Twin an operational, dynamic, and progressively adaptive tool. Furthermore, the assessment of user needs introduces an adaptive and predictive perspective, elevating the Digital Twin from a mere monitoring instrument to an operational system capable of autonomous decision-making, oriented toward user well-being and the sustainability of the built environment. There is growing evidence that BIM and Digital Twins technologies can also support simulations and scenario analyses for more informed and sustainable decision-making (Kaewunruen, Rungskunroch and Welsh, 2019), also redefining professional roles: Zannoni et alii (2024) introduce the figure of the Transitional Industrial Designer, responsible for anticipating scenarios, mediating among stakeholders, and managing complex processes.

However, several challenges persist, including technological and infrastructural complexity, the need for specialised skills, and delicate ethical and

Fig. 16 | Synergies between Digital Twins and the Sustainable Development Goals (credit: A. E. D'Amore, 2025).



privacy issues related to the use of sensitive data. The still-experimental nature of research and the dependence on advanced technological infrastructures currently limit its full applicability, but the methodological framework demonstrates strong evolutionary potential, opening concrete prospects for the diffusion of more intelligent, sustainable, and inclusive design models – especially where BIM, Digital Twins, and Artificial Intelligence are integrated to make design more informed and verifiable, reducing downstream risks and preparing data and decisions for construction and management (Fig. 6).

Application in the construction phase | Within the life cycle of a building project, the construction phase involves complex resource coordination to optimise time and costs, key factors for achieving the overall success of the work. The case studies selected for this phase demonstrate how the Digital Twin can enable more conscious risk management and higher work quality through the use of immersive platforms and augmented or virtual reality systems that enhance the visualisation of construction site activities, operator coordination, and personnel training.

The case study analysed by Chacón et alii (2024) concerns a reinforced concrete building constructed on-site in the Poble Nou district of Barcelona. The objective was to verify how integrating BIM, IoT, and simulations could improve productivity, safety, and resource efficiency in a real construction site context. The project is based on a BIM geometric model connected, through an IoT platform, to an interactive digital platform that integrates a set of applications usable in the various stages of the construction cycle (Fig. 7), through which it is possible to simulate site activities, plan and track operations, as well as manage safety and risk analysis.

The innovative aspect lies in the platform's integrated modular approach, which improves decision-making processes and enhances management transparency; the use of a sensor network also enables continuous monitoring of the construction site, reducing intervention time to resolve issues. The interoperability between the different systems

(BIM model, sensors, and platform) ensures compliance with planned schedules and more efficient information management.

However, the platform relies on a broad ecosystem of heterogeneous software and tools that require advanced technical expertise and complex management of information flows. This aspect reduces the model's scalability and limits its adoption in contexts with low digital maturity, thereby representing a significant technological bias. Moreover, the universal implementation of Digital Twins on construction sites is still in its early stages; the variability of activities, the simultaneous presence of multiple stakeholders, and the large amount of data produced pose considerable challenges to the quality of results generated by the platform. Overall, the project represents an innovative approach to the digitalisation of the construction sector, offering an integrated and predictive vision of the construction phase, but to reach the desired level of technological maturity, further research and the promotion of more accessible and sustainable interoperability models will be necessary.

In the Shanghai East Hospital project, the Digital Twin operated on-site as a physical-digital platform, synchronising suppliers and activities, integrating geolocated sensors, centralising real-time data for AI-driven analyses, verifying alignment between the model and the built work, reducing errors and decision times, and enabling more efficient management (Fig. 8; Peng et alii, 2020). The study also introduces a new role for the contractor: a digital coordinator who leads the installation and mapping of sensors and ensures continuous alignment between the model and reality.

The ability to monitor site performance in real time and connect multiple information systems represents a significant evolution from traditional control methods, improving data traceability and quality and enhancing decision predictability. At the same time, adopting such a complex system requires advanced technological infrastructure, highly specialised digital skills, and substantial financial investment – factors that limit widespread applicability. For these reasons, this approach is more suitable

for high-functional-complexity contexts, such as hospitals, rather than residential or small-scale buildings. This experience demonstrates the potential of integrated management of complex information flows, but it nevertheless requires the development of supporting policies and strategies to ensure sustainable and widespread adoption.

Finally, in a highway infrastructure project in the United Kingdom, the Digital Twin was tested as an interactive platform for site monitoring and safety management, integrating BIM data, 3D surveys, and real-time environmental information through the Unreal Engine 5, using a 'no-code' approach (Ellul et alii, 2024; Fig. 9). This feature represents a significant evolution in the field of Digital Twins for constructions, as it provides an intuitive interface and realistic visual experience, allowing workers to immediately recognise hazardous situations, improving risk awareness, and supporting targeted training activities.

However, the use of a platform designed initially for gaming also entails structural limitations: some Digital Twin functions are not integrated into Unreal Engine 5, and data must be uploaded manually, highlighting the project's still-experimental nature and its inability to achieve a full physical-digital connection. These challenges underline the need to continue research toward more interoperable and automated systems capable of natively connecting design and simulation environments. Despite these limitations, the UK experience highlights the potential of such digital environments, which are accessible tools even for operational personnel and represent a new form of innovation for the construction industry (Fig. 10).

Application in the management and maintenance phase | Digital Twins are transforming management and maintenance phases, offering operators and maintenance teams a clear view of required activities through the availability of performance data collected by physical sensors integrated with visualisation and performance monitoring systems (Yang et alii, 2024). The case studies selected for the management and maintenance phases were chosen for



Fig. 17 | Word cloud of the benefits and trade-offs of the Digital Twin in the building process (credit: A. E. D'Amore, 2025).

their ability to demonstrate how Digital Twin applications can reduce maintenance time and costs while improving operational efficiency and intervention planning. The selection was also motivated by the intention to highlight the scalability of the digital model, which proves applicable to both small-scale building contexts and broader urban environments.

In the Manage 5.0 case, the methodology focuses on building the Digital Twin of an industrial facility as a driver for Industry 5.0 and for a human-centred transition (Fig. 11; Osello et alii, 2024a). The study introduces the use of dashboards and extended reality systems for interaction with the digital replica: maintenance teams monitor components, select appropriate intervention strategies, and reduce time and risks, thus generating value for the asset. In this configuration, the facility manager safely plans and communicates activities, optimises resources and materials, and reduces emissions associated with inefficient maintenance practices.

The human-machine interpretation of the system enhances user participation in management processes, supporting facility managers and technical operators in the planning and communication of maintenance activities, facilitated by virtual reality systems, and ensuring the central role of the human figure in building life-cycle management (Fig. 12).

The project provides an exemplary definition of a dynamic Digital Twin, integrating the BIM model and on-site sensor data to produce energy simulations visualised through a digital dashboard and immersive environments, creating a continuous connection between the physical reality and its Digital Twin. However, the system still faces communication challenges among different software and file formats, as converting models between heterogeneous sources may cause data loss and compromise model consistency and Digital Twin interoperability. These discontinuities require constant verification and calibration, slowing down processes and increasing the risk of errors. Nevertheless, the project stands out for its use of widely available software and technologies that are easily accessible and familiar to industry operators, thus favouring transferability both in terms of the type of analysed building and the adoption of a realistic and replicable information system.

Another example at the urban scale is the City of Bologna, where an energy Digital Twin supports

planning and decision-making through a system that operates effectively even under conditions of data scarcity or incompleteness (Longo et alii, 2024). This is particularly relevant in urban contexts, where information about buildings is often fragmented, outdated, or subject to privacy restrictions. The entire process, though developed from minimal data, aims to generate a coherent urban energy model capable of describing the current state and simulating retrofit and decarbonisation scenarios (Fig. 13).

The Digital Twin is not conceived merely as a technical simulation tool but as an urban governance instrument aimed at improving citizens' quality of life, placing their needs and the sustainability of the living environment at the centre. This human-centred perspective, which recognises the Digital Twin's value as a mediator between data, decision-making processes, and social needs, is one of the project's main strengths. However, it is necessary to acknowledge the limitations of urban Digital Twin systems, which are still at an early stage of maturity, characterised by significant standardisation gaps, fragmented data sources, and challenges in ensuring model continuity and updates over time.

The value of the project lies in its attempt to bridge the Digital Twin maturity gap by experimenting with innovative approaches and building a shared digital urban framework in which technology, data, and governance converge to promote more informed, efficient, and sustainable city maintenance, while offering new research perspectives.

A different standpoint is provided by the case of the Palazzo Unico of the Piedmont Region, conceived as a complex system, where an innovative graphic language and a three-phase methodology (analysis, decoding, and synthesis; Fig. 14) are applied. This technology integrates surveys and documentation into a computational BIM, reorganising data and presenting them via dashboards, thus serving as a testing ground for innovative maintenance and management methodologies (Osello et alii, 2024b). This methodology, which combines computational thinking with graphical representation, aims to transform complexity into a cognitive resource, making data interpretable and improving decision-making processes in maintenance contexts.

One of the project's main strengths lies in its ability to make technical information accessible and un-

derstandable, fostering more transparent and participatory management of the building stock. A distinctive feature of the project is the scalability of the methodology, allowing its application in other contexts with complex or large-scale building assets. The integration of BIM models with analytical algorithms offers an innovative approach to building management and maintenance. However, it cannot yet be considered a fully operational, dynamic Digital Twin, laying the groundwork for future developments.

However, the high level of technical expertise required for model processing and data management represents an access barrier for public administrations, which often lack adequate resources and trained personnel. On an epistemological level, difficulties persist in balancing the quantitative dimension of data with the qualitative assessment of architectural and functional characteristics, which remains essential for a complete understanding of building behaviour.

In conclusion, the case of the Palazzo Unico of the Piedmont Region, despite the limitations inherent in an approach still in the consolidation phase, provides a significant contribution to defining a new paradigm of 'digital management', in which algorithms, graphic representation, and systemic thinking merge to support more informed, transparent, and sustainability-oriented decision-making (Fig. 15).

Critical issues, trade-offs, and enabling factors

From the literature review, it emerges that adopting Digital Twins in the building process entails both potential and challenges. Theoretical studies (Peng et alii, 2020; Wang et alii, 2024; Mousavi et alii, 2024) highlight that the main critical issues concern data governance and coordination among stakeholders, with negotiations over access, responsibilities, and information reuse throughout the life cycle. In complex contexts, concerns related to automation and trust persist, since the Digital Twin mainly operates in diagnostic mode without automatic control, maintaining a human presence in decision-making (Peng et alii, 2020).

According to more recent literature, the capability and level of detail with which advanced technologies such as the Digital Twin can be adopted also depend on the complexity of the asset and the organisation's digital maturity. Automation and con-

trol offer opportunities but raise operational and responsibility issues. In the current reference context, decision-making models based on human supervision balance technological ambition and organisational sustainability, ensuring controlled process management (Nguyen and Adhikari, 2023; Weichbroth, Jandy and Zurada, 2024).

The case studies analysed confirm and make these findings concrete, showing how, in practice, the potential of the Digital Twin must face the complexity of multi-actor coordination and with the need to standardise data to ensure scalability and reuse. In the construction phase, for example, the Barcelona case (Chacón et alii, 2024) shows that digitalisation remains uneven and requires a clear framework of roles, rights, and duties regarding data, formalised in operational policies. Similarly, the Shanghai East Hospital case (Peng et alii, 2020) confirms the need for specialised skills and advanced technological infrastructures, which reduce the transferability of the model in contexts with low digital maturity.

Furthermore, in the management and maintenance phase, studies such as those by Longo et alii (2024) and Osello et alii (2024b) highlight that the absence of fully interoperable software and the use of innovative graphic languages – while useful for systemic reading – can produce excessive simplifications and require advanced skills that are not always available: these application findings reflect the limits already identified in the literature, translating them into operational and managerial difficulties.

Alongside technical and infrastructural aspects, both theoretical studies and case studies point to a decisive ethical dimension related to privacy, cybersecurity, and data governance. Incomplete data interoperability, if not adequately governed, limits its use (Longo et alii, 2024), generating trade-offs between the speed of experimentation and solid data governance, between openness and the protection of confidentiality. The absence of unified policies and adequate security standards reduces the use of sensitive data and leaves functions incomplete (Peng et alii, 2020), imposing a balance between innovation and the control of socio-ethical impacts.

Finally, the convergence between literature and case studies is evident in reflections on new professional roles and emerging organisational models that redistribute responsibilities along the supply chain and ensure process coherence and the ability to steer the technological, organisational, and cultural change induced by the digital transition (Zannoni et alii, 2024). In short, if overcoming the critical issues requires explicit, traceable trade-offs, the next step is to consolidate trust and accountability to enable progressively safer automation and measurable benefits across the design, construction, and management phases (Tab. 3).

In this scenario, overcoming the critical issues cannot be interpreted solely in technological or managerial terms, but requires a broadening of the interpretive framework to include social and organisational dimensions. From this perspective, a disciplinary leap emerges that recognises how the effectiveness of the Digital Twin also depends on its ability to generate human value. Well-being is assessed by the system's capacity to improve health, safety, and environmental comfort; training is measured by the ability to transfer skills and digital learning; the promotion of safe, transparent, and participatory operating conditions evaluates decent work.

This interdisciplinary reading expands the meaning of Digital Twin, positioning it as a mediator between technological innovation and quality of working life, in line with the human-centred paradigm of Industry 5.0.

Cross-cutting results: synergies and trade-offs with the Sustainable Development Goals

With reference to SDG 8, the Digital Twin contributes to productive and quality growth by accelerating, predicting, and reducing the cost of the building process. In design, BIM-to-BEM workflows accelerate analyses and reduce rework and coordination times, with direct effects on productivity and resource efficiency (Osello et alii, 2024a). On construction sites and in complex assets, real-time monitoring, virtual inspections, and contextual alerts support prevention and rapid response to risks, improving safety standards and reducing production downtime (Chacón et alii, 2024; Peng et alii, 2020). Interfaces and algorithms linked to information models enable the management of thousands of spaces in large public facilities, thereby shortening decision-making time and improving service quality (Osello et alii, 2024a).

The Digital Twin ecosystem also enables skill acquisition and the development of new professional profiles along the supply chain, such as the Transitional Industrial Designer, who integrates economic, social, and environmental responsibilities across the entire life cycle of the asset (Zannoni et alii, 2024). It also creates opportunities for digital services and entrepreneurship through interoperable, accessible tools that facilitate gradual adoption (Osello et alii, 2024b; Chacón et alii, 2024). In summary, the Digital Twin reduces waste and idle time and broadens the skills demanded by the market, fostering qualified employment, inclusive growth, and new roles and competences across the entire life cycle of the built environment.

With reference to SDG 7, the Digital Twin acts as a bridge between design and management to expand access to reliable and affordable energy services, accelerate the integration of renewables, improve efficiency, and strengthen infrastructures and skills. In terms of efficiency, data exchange between the information model and the energy model during design enables rapid comparison of envelope and system alternatives (Osello et alii, 2024a). In operation, the sensor-connected Digital Twin allows continuous monitoring, anomaly detection, and forecast simulations, resulting in measurable savings and reductions in faults or avoided repairs (Peng et alii, 2020).

At the urban scale, the Digital Twin supports the configuration of Energy Communities and PEDs, with cost-benefit assessments (Longo et alii, 2024). Economic accessibility is favoured by reducing waste and rework along the life cycle and by managing energy peaks, with effects on bills and service continuity (Peng et alii, 2020). Overall, the Digital Twin makes performance transparent, accelerates low-energy-intensity design decisions, and coordinates the efficient operation of systems, making a concrete contribution to achieving SDG 7.

Regarding SDG 3, the Digital Twin contributes to health protection and risk reduction throughout the asset's life cycle. In terms of accident prevention and workplace safety, the on-site Digital Twin enables situational monitoring and proactive alerts. In the highway case, integrating 3D models, data streams, and immersive simulation software en-

ables virtual inspections, thereby directly reducing accidents and enhancing decision-making readiness in the field (Chacón et alii, 2024).

Moreover, the use of information processes such as BIM and CoSIM, and digital technologies such as virtual reality adopted for phased planning and immersive training on critical procedures, transfers skills in a safe environment and reduces exposure to hazardous scenarios. The same setup also quantifies costs and anti-contagion measures, linking organisational safety to workplace health protection (Luiso, 2021).

Finally, regarding environmental health and air quality, energy-oriented Digital Twins support ventilation and microclimate control strategies, predictive maintenance of AHUs, and optimisation of consumption/emissions. At the urban scale, simplified energy twins enable decarbonisation scenarios that reduce population exposure to pollutants and heat peaks (Osello et alii, 2024a; Longo et alii, 2024). In summary, from the construction site to the building in operation and the district level, the Digital Twin reduces accidents and harmful conditions through diagnosis and simulation and improves the well-being of all actors involved (Fig. 16).

Beyond the already discussed results, the cases analysed show that the Digital Twin operates as an 'enabling infrastructure' that connects industrial and infrastructural innovation, sustainable cities, more sustainable consumption cycles, and decarbonisation pathways, generating significant synergies with other SDGs as well. In the productive sector and within large infrastructures, the Digital Twin consolidates informed decision-making processes and introduces high-value skills and roles (Zannoni et alii, 2024; Chacón et alii, 2024).

At the urban scale, the integrated modelling of buildings, networks, and flows enhances the legibility of district performance and supports a coordinated management of energy transformations, mobility, and services, with tangible effects on livability and safety (Longo et alii, 2024; Peng et alii, 2020; Gausa, 2024). On the resources side, the Digital Twin makes inefficiencies and opportunities visible along the life cycle, guiding design, procurement, and management choices toward less waste and greater circularity (Osello et alii, 2024a). In this framework, the twins' ability to link simulation and monitoring creates real opportunities to reduce consumption and emissions, and to plan decarbonisation pathways that are consistent with local constraints (Longo et alii, 2024).

However, adopting the Digital Twin also involves trade-offs that affect, to varying degrees, the achievement of the 17 SDGs. On the economic and employment front, automation and process digitalisation introduced by the Digital Twin can exacerbate labour-market imbalances, reducing demand for traditional labour and creating new access barriers for less digitally equipped operators and firms. The increased technological complexity requires advanced and specialised skills that may compromise inclusive growth and work quality.

From an energy and environmental standpoint, the operational efficiency gains may be partially offset by the high resource demand required to power digital infrastructure. Data streams generated by twins require sensor networks, servers, and large data centres, with significant electricity consumption and impacts related to the production, cooling, and maintenance of equipment. The management

and sourcing of raw materials represent an additional critical point that makes supply chains more vulnerable and calls for circular-economy strategies throughout the technological life cycle. On the social level, the digital evolution accompanying the implementation of Digital Twins highlights the risk of widening the digital divide among firms and communities. The most vulnerable categories – particularly those with fewer economic resources or digital skills – may be excluded from informational benefits and participatory processes, undermining the principle of equity and inclusion underlying the 2030 Agenda. The adoption of urban Digital Twins is also costly and complex, as it requires investment capacity, skills, and infrastructures that not all territories possess. This can widen the gap between large cities and smaller realities, creating inequalities in innovation capacity and the quality of urban services, in contrast with the objectives of sustainable and inclusive cities.

From an ethical perspective, although the Digital Twin offers advanced tools for risk prevention, monitoring, and control, the collection and management of sensitive data raise critical privacy, cybersecurity, and ethical-use issues. Moreover, growing reliance on digital models could compromise direct risk perception and operators' autonomous decision-making capacity. These elements require a balance between technological control, protection of individual rights, and valorisation of human competence, ensuring that digital progress does not undermine the human decision-making role.

On the institutional and regulatory front, the current fragmentation of standards, the lack of a unified regulatory framework, and uneven data management policies make coordinated application among companies, public bodies, and territories difficult. The absence of common guidelines on interoperability, privacy, security, and responsibility risks slowing innovation and generating inequalities in access to technologies. Effective governance of the Digital Twin, therefore, requires a regulatory framework that harmonises practices and enables integrated and transparent action (Fig. 17).

Conclusions and future perspectives | The review shows that technological and digital evolution are playing an increasingly central role in the construction sector, improving the efficiency of the asset's life-cycle phases. The cases examined show how the Digital Twin fosters productive and high-quality growth by speeding up, making more predictable, and reducing the onerousness of the building process, optimising energy efficiency, strengthening protection of health and well-being, and contributing to circular economy development and climate change mitigation (Sharma and Gupta, 2024).

However, the critical analysis conducted shows that most technical reviews tend to overlook the human, ethical, and social justice implications introduced by the 5.0 paradigm, reducing the Digital Twin to a performance tool rather than a relational and cognitive device. In this sense, the contribution advocates an interpretive shift that restores to the person – as designer, worker, and user – a central role in the process of construction digitalisation, valorising competences, responsibilities, and decision-making capacity.

In the design phase, the centrality of the human factor is expressed in the project's ability to translate needs, habits, and expectations into spatial and

technological solutions. The case examined demonstrates how the Digital Twin enables simulation of different use scenarios and real-time verification of environmental comfort, air quality, lighting, and acoustic perception, thereby guiding design decisions toward the well-being of the end user. This possibility of observing, predicting, and adapting building performance from the earliest stages of conception represents one of the most significant contributions of the Digital Twin, which becomes a tool for listening and mediation between the technical and the human dimension: the designer is not replaced by automation but guides its critical use, interpreting data to return social and cultural value to the project.

In the construction phase, the analysed cases exhibit a strong experimental character: digital systems and platforms from sectors other than construction are used – such as simulation engines and virtual reality environments – to improve planning, monitoring, and construction site safety. These experiments open new possibilities but also reveal limits on transferability and difficulties in large-scale application, since construction is the most articulated and complex phase of the building process.

On construction sites, multiple activities, specialised skills, and shared responsibilities intersect, making coordinated management and effective communication among all actors essential. In this scenario, the Digital Twin becomes a valuable tool for connecting people, equipment, and information, improving operational efficiency while ensuring workers' safety. The introduction of new professional roles linked to digitalisation can have a decisive impact on improving the quality, safety, and sustainability of the construction site. True innovation, therefore, lies not only in digital tools but also in the ability to keep the person at the centre of the process, recognising their role as protagonist and beneficiary of the transformation.

In the management and maintenance phase, the centrality of the person assumes an even more concrete meaning, as it is in this phase that the relationship between technology and everyday life fully manifests. The cases analysed show how the Digital Twin can effectively support maintenance activities by predicting failures, optimising interventions, and improving energy efficiency. Yet, its deepest value lies in its ability to connect people with the spaces they inhabit and manage. Technicians, facility managers, and end users become active parts of the system, contributing through their behaviours and decisions to updating and improving the digital model.

In this perspective, the Digital Twin is not only a control tool but a collaborative environment that strengthens awareness, participation, and shared responsibility in the care of the building and the city. The possibility of visualising in real time the state of a system or space not only simplifies operations but also makes management more transparent, enabling users to understand how spaces function and to contribute to their improvement. It is within this continuous dialogue between data and experience that the Digital Twin becomes truly human-centred.

This contribution has focused on the design, construction, operation, and maintenance phases, while deliberately omitting two other fundamental phases of the asset life cycle, programming and decommissioning (or end-of-life). This choice – although motivated by the fact that Digital Twin experimentation in these phases is still limited – con-

stitutes the main limitation of the contribution. At the same time, it acknowledges the high strategic potential of the twin for sustainable resource management, preventive planning, and long-term assessment of the asset's environmental impact. In this perspective, future research may extend observations beyond the phases considered, adopting a whole-life-cycle vision and integrating cross-cutting assessment approaches that also extend to broader sustainability targets, for example, those related to the social dimension.

In light of what has been presented, a further collaborative effort among the scientific community, governance, and civil society is deemed necessary, on the one hand, to continue addressing technical and technological challenges, and on the other, to adopt human-centred research approaches that recognise the person's role as both decision-maker and end user. At the same time, extending the transferability of these practices to other related sectors that similarly require the development of complex digital models for asset management would contribute to a greater understanding of methodological flows through the exchange of information and knowledge.

From this perspective, the Digital Twin can be understood as a platform for convergence between technical knowledge and the social sciences, opening up scenarios for applied research that include circular economy, data ethics, digital training, and new models of collaborative governance. The transferability of results to fields such as urban management, industry, and infrastructures suggests the possibility of building a shared methodological language for analysing complex processes and their impacts on living contexts.

In this view, the originality of the present contribution lies in placing this trajectory within the human-centred framework of Industry 5.0: the advancement of the Digital Twin is not read solely as technological or infrastructural maturation, nor merely as a lever for new professional roles, but as the capacity to respond to users' needs (Nava and Melis, 2024). In this scenario, innovation finds fertile ground to expand and evolve, provided it keeps the person and their needs at the centre of the value proposition. In this sense, sustainable innovation prioritises social and environmental well-being, fostering an ethical transition for the benefit of society (Sposito and Scalisi, 2024).

The cultural and practical implications are evident: a Digital Twin designed for people – not merely for data – can support qualified growth and professional upskilling, reduce waste and externalities along the supply chain, and enhance health and safety, translating digital innovation into shared social and economic value. Looking ahead, research should investigate new models for the multidimensional evaluation of the Digital Twin that can combine technical indicators and well-being metrics, and promote a policy framework for the conscious and inclusive adoption of these tools. This implies a paradigm shift from the twin as a 'technological replica' to the twin as a 'cognitive and social ecosystem', founded on responsibility, equity, and cooperation, in a vision where digital progress is measured by its ability to enhance human work rather than replace it.

References

- Amarasinghe, I., Liu, T., Stewart, R. A. and Mostafa, S. (2025), "Paving the way for lowering embodied carbon emissions in the building and construction sector", in *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 27, pp. 1825-1843. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10098-024-03023-6 [Accessed 30 September 2025].
- BPIE – Buildings Performance Institute Europe (2024), *Italy Buildings Climate Tracker – Is Italy on track to decarbonise its building stock?*. [Online] Available at: bpie.eu/publication/italy-buildings-climate-tracker-is-italy-on-track-to-decarbonise-its-building-stock/ [Accessed 30 September 2025].
- Celaschi, F., Casoni, G. and Formia, E. (2024), "La mediazione del Design – L'integrazione tra agenti artificiali autonomi, produzione manifatturiera e servizi | The mediation of Design – The integration between autonomous artificial agents, manufacturing production, and services", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 334-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16282024 [Accessed 30 September 2025].
- Chacón, R., Posada, H., Ramonell, C., Jungmann, M., Hartmann, T., Khan, R. and Tomar, R. (2024), "Digital twinning of building construction processes – Case study – A reinforced concrete cast-in structure", in *Journal of Building Engineering*, vol. 84, article 108522, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2024.108522 [Accessed 30 September 2025].
- Cumo, F., Giovenale, A. M., Pennacchia, E. and Tiburcio, V. A. (2025), "Towards a Healthier Hospital Environment – The Role of Digital Twins in Achieving Optimal Environmental Comfort", in *Digital Twins and Applications*, vol. 2, issue 1, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1049/dgt.70002 [Accessed 30 September 2025].
- Ellul, C., Hamilton, N., Pieri, A. and Floros, G. (2024), "Exploring Data for Construction Digital Twins – Building Health and Safety and Progress Monitoring Twins Using the Unreal Gaming Engine", in *Buildings*, vol. 14, issue 7, article 2216, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14072216 [Accessed 30 September 2025].
- European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 [Accessed 30 September 2025].
- Gausa, M. (2024), "Complessità, n-città e sistemi dinamici multilivello – Verso una (geo)urbanità in rete e in reti | Complexity, n-city, and multilevel dynamic systems – Towards a networked (geo)urbanity and networks", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 16-29. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1612024 [Accessed 30 September 2025].
- Holden, E., Linnerud, K. and Banister, D. (2014), "Sustainable development – Our Common Future revisited", in *Global Environmental Change*, vol. 26, pp. 130-139. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.006 [Accessed 30 September 2025].
- Iliuță, M.-E., Moisescu, M.-A., Pop, E., Ionita, A.-D., Caramihai, S.-I. and Mitulescu, T.-C. (2024), "Digital Twin – A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields", in *Applied Sciences*, vol. 14, issue 13, article 5454, pp. 1-38. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app14135454 [Accessed 30 September 2025].
- Kaewunruen, S., Rungskunroch, P. and Welsh, J. (2019), "A Digital-Twin Evaluation of Net Zero Energy Building for Existing Buildings", in *Sustainability*, vol. 11, issue 1, article 159, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su11010159 [Accessed 30 September 2025].
- Lee, D., Lee, S. H., Masoud, N., Krishnan, M. S. and Li, V. C. (2021), "Integrated digital twin and blockchain framework to support accountable information sharing in construction projects", in *Automation in Construction*, vol. 127, article 103688, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103688 [Accessed 30 September 2025].
- Longo, D., Turillazzi, B., Roversi, R., Lilla, S., Nucci, C. A., Piccinini, A. and Costa, A. (2024), "Gemello digitale urbano e modellazione energetica – Esperienze e analisi di casi d'uso | Urban Digital Twin and Energy Modeling – Experiences and case study analyses", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 160-169. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15122024 [Accessed 30 September 2025].
- Luiso, P. (2021), *Digital Twin – Parco della Salute, della Ricerca e dell'Innovazione di Torino – Analisi costi della sicurezza in periodo Covid-19 e approccio alla sicurezza in cantiere attraverso il Digital Twin | Digital Twin – Park of Health, Research and Innovation in Turin – Safety cost analysis in the Covid-19 period and approach to safety on site through the Digital Twin*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino; Relatori Osello, A. and Manzone, F. [Online] Available at: webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/20803 [Accessed 30 September 2025].
- Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2023), *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC_finale_17012020.pdf [Accessed 18 October 2024].
- Mousavi, Y., Gharineiat, Z., Karimi, A. A., McDougall, K., Rossi, A. and Gonizzi Barsanti, S. (2024), "Digital Twin Technology in Built Environment – A Review of Applications, Capabilities and Challenges", in *Smart Cities*, vol. 7, issue 5, pp. 2594-2615. [Online] Available at: doi.org/10.3390/sma cities7050101 [Accessed 30 September 2025].
- Nava, C. and Melis, A. (2024), "IA generativa e complessità – Verso un nuovo paradigma nel design digitale rigenerativo | Generative IA and complexity – Towards a new paradigm in regenerative digital design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 40-49. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1632024 [Accessed 30 September 2025].
- Nguyen, T. D. and Adhikari, S. (2023), "The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction – A Literature Review", in *Sustainability*, vol. 15, issue 13, article 10462, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su151310462 [Accessed 30 September 2025].
- Osello, A., Del Giudice, M., Donato, A. J. and Fratto, A. (2024a), "Verso la Neutralità Climatica – Il ruolo chiave del Digital Twin nell'Industria 5.0 | Towards Climate Neutrality – The key role of the Digital Twin in Industry 5.0", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 276-285. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15222024 [Accessed 30 September 2025].
- Osello, A., Zucco, M., Iacono, E. and Del Giudice, M. (2024b), "Logiche nascoste della complessità – Interfacce grafiche e algoritmi per il sistema edificio | Hidden logic of complexity – Graphical interfaces and algorithms for the building system", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 202-211. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16172024 [Accessed 30 September 2025].
- Peng, Y., Zhang, M., Yu, F., Xu, J. and Gao, S. (2020), "Digital Twin Hospital Buildings – An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration", in *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, article 8846667, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1155/2020/8846667 [Accessed 30 September 2025].
- Rafsanjani, H. N. and Nabizadeh, A. H. (2023), "Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through Virtual Design and Construction (VDC) and digital twin", in *Energy and Built Environment*, vol. 4, issue 2, pp. 169-178. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.004 [Accessed 30 September 2025].
- Sharma, R. and Gupta, H. (2024), "Leveraging cognitive digital twins in Industry 5.0 for achieving sustainable development goal 9 – An exploration of inclusive and sustainable industrialisation strategies", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 448, article 141364, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141364 [Accessed 30 September 2025].
- Sposito, C. and Scalisi, F. (2024), "Riflessioni e traiettorie di ricerca interdisciplinari sulla transizione energetica | Reflections and trajectories for interdisciplinary research on the energetic transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 3-17. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1502024 [Accessed 30 September 2025].
- Ugliotti, F. M., D'Addetta, C. and Fabbriatore, M. (2024), "Digital Twin and Artificial Intelligence – Matrix Automation for Design, Monitoring, and Management of Spaces", in Giordano, A., Russo, M. and Spallone, R. (eds), *Advances in Representation – New AI- and XR-Driven Transdisciplinarity*, Springer, Cham, Switzerland, pp. 727-743 [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-62963-1_44 [Accessed 30 September 2025].
- UN – United Nations (2015a), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: docs.un.org/en/A/RES/70/1 [Accessed 30 September 2025].
- UN – United Nations (2015b), *Paris Agreement*. [Online] Available at: unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf [Accessed 30 September 2025].
- UNI 10838:1999, *Edilizia – Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia*. [Online] Available at: store.uni.com/uni-10838-1999 [Accessed 30 September 2025].
- Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H. and Wang, L. (2024), "Human Digital Twin in the context of Industry 5.0", in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 85, article 102626, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102626 [Accessed 30 September 2025].
- Wang, T. and Chen, H.-M. (2023), "Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle", in *Automation in Construction*, vol. 150, article 104832, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104832 [Accessed 30 September 2025].
- Wang, Z. (2020), "Digital Twin Technology", in Bányai, T., Petrilloand, A. and De Felice, F. (eds), *Industry 4.0 – Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing*, IntechOpen, Rijeka, pp. 95-114. [Online] Available at: dx.doi.org/10.5772/intechopen.80974 [Accessed 30 September 2025].
- Weichbroth, P., Jandy, K. and Zurada, J. (2024), "Toward Sustainable Development – Exploring the Value and Benefits of Digital Twins", in *Telecom*, vol. 5, issue 3, pp. 774-791. [Online] Available at: doi.org/10.3390/telecom5030039 [Accessed 30 September 2025].
- World Green Building Council (2024), *Annual Report 2023-2024*. [Online] Available at: worldgbc.org/wp-content/uploads/2025/02/WorldGBC-Annual-Report-2023-2024.pdf?utm_campaign=website&utm_medium=email&utm_source=sendgrid.com [Accessed 14 October 2025].
- Xu, H., Kim, J. I. and Chen, J. (2025), "Improved framework for estimating carbon emissions from prefabricated buildings during the construction stage – Life cycle assessment and case study", in *Building and Environment*, vol. 272, article 112599, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112599 [Accessed 30 September 2025].
- Yang, Z., Tang, C., Zhang, T., Zhang, Z. and Doan, D. T. (2024), "Digital Twins in Construction – Architecture, Applications, Trends and Challenges", in *Buildings*, vol. 14, issue 9, article 2616, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14092616 [Accessed 30 September 2025].
- Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), "Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 30 September 2025].
- Zhang, A., Yang, J. and Wang, F. (2023), "Application and enabling digital twin technologies in the operation and maintenance stage of the AEC industry – A literature review", in *Journal of Building Engineering*, vol. 80, article 107859, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2023.107859 [Accessed 30 September 2025].