

Emanuele Piaia, Beatrice Turillazzi

Qualità nel processo edilizio

**Progettare e realizzare edifici
ad alte prestazioni energetiche**



Ricerche di tecnologia dell'architettura

FrancoAngeli

RICERCHE DI TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA

diretta da Jacopo Gaspari (Università di Bologna)

Comitato scientifico:

Laura Aelenei (LNEG), Alessandra Battisti (Sapienza Università di Roma),
Andrea Campioli (Politecnico di Milano), Pietromaria Davoli (Università di Ferrara),
Gareth Doherty (Harvard University), Stephen Emmitt (University of Bath),
Maria Luisa Germanà (Università di Palermo), Antonin Lupisek (Czech Technical
University in Prague), Antonello Monsù Scolaro (Università di Sassari),
Francesco Pilla (University College Dublin), Rosa Schiano-Phan (University
of Westminster), Antonella Violano (Università della Campania Luigi Vanvitelli).

La storica collana *Ricerche di Tecnologia dell'architettura* ha avuto, fin dalle origini, il desiderio di rappresentare la disciplina della tecnologia dell'architettura nelle sue diverse forme di relazione con il progetto di architettura, la trasformazione dell'ambiente costruito e gli operatori del settore edilizio. Nel corso dei decenni, ha pubblicato volumi che hanno descritto le traiettorie di innovazione e i cambiamenti culturali nel settore dell'edilizia, contribuendo a mantenere aggiornato l'ambito disciplinare.

Ricerche di Tecnologia dell'architettura raccoglie gli esiti di progetti di ricerca nazionali e internazionali, studi e ricerche sperimentali, tesi di dottorato di ricerca riguardanti teorie e metodi inerenti materiali e sistemi costruttivi, architettura sostenibile e riqualificazione, efficienza energetica e transizione a emissioni zero, approcci di economia circolare nel settore delle costruzioni.

Oltre al riconosciuto valore scientifico e accademico, la collana costituisce un apprezzato strumento di supporto nel campo dell'architettura e dell'ingegneria con spunti operativi per la professione, distinguendosi per il suo impegno nel descrivere la continua evoluzione della Tecnologia dell'architettura e dei suoi confini che, nel corso del tempo, si sono estesi per ricomprendere interessi di ricerca contigui, tra cui tecnologie digitali, modelli e processi avanzati, concept e servizi di progettazione innovativi in una prospettiva più ampia, orientata a dare risposte alle sfide future e agli impatti del cambiamento climatico sulle città contemporanee.

La collana nasce nel 1974 sotto la direzione di Raffaella Crespi e Guido Nardi. A partire dal 2012 la valutazione delle proposte è stata sottoposta a referaggio da parte di un Comitato scientifico diretto da Giovanni Zannoni, con lo scopo di individuare e selezionare i contributi più interessanti nell'ambito della Tecnologia dell'architettura. Dal 2025 questo incarico viene assunto da Jacopo Gaspari, ampliando gli ambiti di interesse alle discipline di confine della materia. I numerosi volumi pubblicati in questi anni delineano un efficace panorama dello stato e dell'evoluzione della ricerca nel settore della Tecnologia dell'architettura con alcuni testi che sono diventati delle basi fondative della disciplina.

A partire dal numero 87 della collana i volumi sono sottoposti a referaggio.



Il presente volume è pubblicato in open access, ossia il file dell'intero lavoro è liberamente scaricabile dalla piattaforma **FrancoAngeli Open Access** (<http://bit.ly/francoangeli-oa>).

FrancoAngeli Open Access è la piattaforma per pubblicare articoli e monografie, rispettando gli standard etici e qualitativi e la messa a disposizione dei contenuti ad accesso aperto. Oltre a garantire il deposito nei maggiori archivi e repository internazionali OA, la sua integrazione con tutto il ricco catalogo di riviste e collane FrancoAngeli massimizza la visibilità, favorisce facilità di ricerca per l'utente e possibilità di impatto per l'autore.

Per saperne di più: [Pubblica con noi](#)

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: www.francoangeli.it e iscriversi nella home page al servizio "[Informatemi](#)" per ricevere via e-mail le segnalazioni delle novità.

Emanuele Piaia, Beatrice Turillazzi

Qualità nel processo edilizio

**Progettare e realizzare edifici
ad alte prestazioni energetiche**

Ricerche di tecnologia dell'architettura

FrancoAngeli 

Fermo restando che il testo è il risultato di una stretta collaborazione tra gli autori, si ritiene utile definire la seguente attribuzione dei capitoli:

- Emanuele Piaia è autore dei Capitoli: 2, 4 e 6;
- Beatrice Turillazzi è autrice dei Capitoli: 1, 3 e 5;
- Emanuele Piaia e Beatrice Turillazzi sono autori dell'Introduzione e del Capitolo 7.

Riconoscimenti

- Progetto di ricerca H2020-INSITER (*Intuitive Self-Inspection Techniques using Augmented Reality for construction, refurbishment and maintenance of energy-efficient buildings made of prefabricated components*), finanziamento all'interno del Programma di Ricerca e Innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea (G.A. n. 636063).
- Progetto di ricerca "Metodi e procedure innovative digitalizzate per la corretta costruzione in edifici nZEB e ad impatto zero", finanziamento all'interno del Programma FIRD2024 - "Fondo per l'Incentivazione alla Ricerca Dipartimentale" dell'Università di Ferrara, Dipartimento di Architettura.

In copertina: elaborazione grafica di Nicola Pio Di Tommaso

Emanuele Piaia, Beatrice Turillazzi, *Qualità nel processo edilizio. Progettare e realizzare edifici ad alte prestazioni energetiche*, Milano: FrancoAngeli, 2025
Isbn: 9788835185413 (eBook)

La versione digitale del volume è pubblicata in Open Access sul sito www.francoangeli.it.

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. Pubblicato da FrancoAngeli srl, Milano, Italia, con il contributo del Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna.

L'opera è realizzata con licenza *Creative Commons Attribution 4.0 International license* (CC BY 4.0: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>).

Tale licenza consente di condividere ogni parte dell'opera con ogni mezzo di comunicazione, su ogni supporto e in tutti i formati esistenti e sviluppati in futuro.

Consente inoltre di modificare l'opera per qualsiasi scopo, anche commerciale, per tutta la durata della licenza concessa all'autore, purché ogni modifica apportata venga indicata e venga fornito un link alla licenza stessa.

Indice

Prefazione , di <i>Roberto Di Giulio</i>	pag.	7
Introduzione	»	13
1. La qualità nel processo edilizio	»	17
1.1. Interpretare la qualità nell'ambito delle costruzioni	»	18
1.2. Dalla qualità controllata alla qualità garantita	»	19
1.3. Il sistema di gestione integrato della qualità e l'approccio esigenziale-prestazionale	»	21
2. Il processo edilizio e la sua articolazione	»	28
2.1. Il contesto italiano	»	30
2.2. Il contesto internazionale in rapporto a quello nazionale	»	31
2.3. Gli attori del processo edilizio	»	40
3. Procedure e strumenti di valutazione della qualità	»	72
3.1. Verifica dell'attività progettuale	»	73
3.2. Dalla progettazione alla consegna	»	75
3.3. Industria: controllo di produzione e tracciabilità	»	78
3.4. In cantiere: qualità come affidabilità del flusso	»	78
3.5. In esercizio: misurare, verificare, apprendere	»	80
3.6. <i>Governance</i> dell'informazione	»	82
4. Difformità, vizi e difetti delle opere	»	83
4.1. Aspetti normativi e di giurisprudenza	»	84
4.2. Difformità di prestazione energetica e approcci di valutazione	»	85
4.3. Difetti delle opere: cause del divario di prestazione	»	89
4.4. Qualità, responsabilità e prestazioni: una sintesi operativa	»	103

5. Costruire un edificio energeticamente efficiente: indicatori di prestazione	pag. 106
5.1. Quadro normativo di riferimento	» 107
5.2. Indicatori di prestazione	» 114
5.3. Indicatori di prestazione aggregati	» 126
6. Costruire un edificio energeticamente efficiente: l'involucro	» 129
6.1. Chiusure orizzontali inferiori	» 132
6.2. Chiusure verticali opache	» 140
6.3. Chiusure verticali trasparenti	» 150
6.4. Chiusure superiori	» 163
7. Innovazione nella gestione del processo di qualità	» 178
7.1. Il progetto INSITER	» 180
7.2. La metodologia INSITER	» 183
7.3. Esempi e casi dimostrativi	» 195
7.4. Risultati dei casi dimostrativi	» 226
Conclusioni	» 229
Glossario e acronimi	» 232
Bibliografia	» 235
Profili degli autori	» 250

Prefazione

Preface

di Roberto Di Giulio

The planning and quality management of buildings form a research field where technical, organizational and methodological aspects converge within a framework shaped by standards, procedures and rapidly evolving digital tools. Quality is seen as a process-driven value: it results from clear requirements, prescribed controls and verified performance throughout the entire life cycle, from design to commissioning and facility management.

Building on a performance-oriented approach aligned with international standards, the book shows how digital technologies – especially Building Information Modeling – improve traceability of decisions, prediction of outcomes and reliability of performance checks. A key reference is the European project INSITER, which addressed the gap between as-designed and as-built performance in high-efficiency prefabricated buildings. INSITER shifted quality control from ex-post inspection to real-time self-inspection by site operators, supported by enriched digital models, augmented and virtual reality, portable diagnostics and cloud-based data exchange. The volume reorganizes these methods into a coherent framework integrating physical indicators, process requirements and management tools. It aligns international organizational models, such as the RIBA Plan of Work, with the Italian context, mapping documents, tests and controls to each project phase. Regulatory evolution – from European directives on energy performance to the recent “Green Homes” directive – is interpreted as a driver of quality-oriented design and construction.

More than a list of tools, the book proposes a methodological grammar: define performance requirements early; link each phase to measurable tolerances and verifiable checks; integrate diagnostics and digital models to guide decisions; and ensure seamless data transfer from construction to operation. This approach turns quality into a continuous, evidence-based and digitally supported practice, adaptable to new technologies while ensuring measurable and verifiable results across the whole building life cycle.

La programmazione e la gestione della qualità degli edifici sono parte di un settore di ricerca nel quale fattori tecnici, organizzativi e metodologici convergono in un quadro governato da norme, procedure e, in questi ultimi anni in misura sempre crescente, da strumenti digitali in continua evoluzione.

In questo contesto i metodi, le procedure e gli strumenti per definire, prescrivere, controllare e gestire la qualità sono l'esito di un processo complesso che, dall'analisi delle esigenze e dei requisiti fino alla messa in esercizio e alla manutenzione, integra scelte progettuali, verifiche sperimentali e controlli lungo l'intero ciclo di vita dell'opera.

L'impostazione esigenziale-prestazionale adottata dagli autori, ancorata saldamente alle basi teoriche che regolano le procedure e gli standard internazionali in materia di progettazione, controllo e gestione della qualità, apre una finestra sulle innovazioni introdotte, in questo campo, dalle ICTs (*Information and Communication Technologies*) e in particolare dalle tecnologie BIM (*Building Information Modeling*).

In particolare, l'attenzione si concentra su come queste tecnologie, in relazione alla natura "processuale" della qualità – intesa come risultato di scelte e azioni che attraversano tutte le fasi del processo edilizio –, offrano strumenti sempre più efficaci per la tracciabilità delle decisioni, la previsione dei risultati di tali decisioni e, di conseguenza, l'affidabilità dei risultati di controlli e verifiche sulle prestazioni nelle fasi di costruzione e poi di gestione dell'edificio.

In questo scenario gli autori ripercorrono le fasi e rielaborano i risultati del progetto di ricerca europeo INSITER che, oltre alla struttura metodologica, fornisce un ricchissimo repertorio di tecniche di auto-ispezione e auto-istruzione per la riduzione del divario fra *as-designed* e *as-built* negli edifici ad alta efficienza energetica.

Il metodo di indagine si basa su un approccio al controllo della qualità edilizia secondo uno schema multilivello nel quale indicatori fisico-tecnici, requisiti di processo e dispositivi di gestione sono messi in relazione in un sistema coerente di documenti, ruoli e responsabilità. Un attento esame – con i necessari aggiornamenti – dell'articolazione e dell'evoluzione del quadro normativo (dalla serie UNI/EN/ISO su qualità, prestazione energetica e gestione informativa fino ai riferimenti alle recenti tecniche di prova in opera e in laboratorio) definisce la cornice entro la quale le valutazioni vengono rese comparabili, replicabili e verificabili.

Coerentemente, la mappatura dei modelli organizzativi internazionali e la loro traduzione nel contesto italiano (in particolare l'allineamento fra RIBA *Plan of Work* e fasi nazionali) consentono di associare a ciascuna fase un set di elaborati, prove e controlli, con indicazioni sulle norme e le procedure pertinenti. Un allineamento che fornisce al lettore gli elementi per contestualizzare nella realtà del nostro paese gli elementi innovativi delle procedure e degli strumenti di verifica della qualità.

La tesi sulla quale era stato sviluppato il progetto di ricerca INSITER, illustrato in maniera approfondita nell'ultima parte del libro, si basava sul

consolidamento dell'evidenza, confermata da numerosi studi e casi applicativi, che nella filiera dell'industrializzazione del processo edilizio i *bottle-necks* si manifestano tipicamente nelle fasi di montaggio e di messa in servizio, nelle quali errori di posa, disallineamenti geometrici, interferenze impiantistiche e deficit di coordinamento degradano le prestazioni attese, generando costi e contenzioso.

INSITER affrontava questo nodo spostando il baricentro del controllo: dalla logica della verifica ex-post a un sistema di auto-ispezione in tempo reale, svolta direttamente dagli attori operativi – manodopera, subappaltatori, tecnici – con il supporto di strumenti digitali. Si trattava in particolare delle innovazioni nei metodi di arricchimento semantico dei modelli BIM, delle applicazioni di realtà aumentata e virtuale (AR/VR), dei sensori e dispositivi di diagnostica portatile. Tutto ciò veniva ricondotto a un quadro di gestione integrata della qualità (*Total Quality Management*, TQM), che univa i principi del design orientato alla produzione e al montaggio (*Design for Manufacturing and Assembly*, DfMA) con i protocolli di garanzia e controllo della qualità (*Quality Assurance* e *Quality Control*, QA/QC), ripresi e adattati dalle pratiche più avanzate della manifattura industriale.

La metodologia sviluppata dal progetto di ricerca, ampiamente ripresa e aggiornata nel volume, si articola in otto passaggi che accompagnano l'intero processo: dal rilievo iniziale delle condizioni di partenza fino alla validazione in fase di collaudo e alla consegna finale, supportata da modelli informativi digitali. Nelle fasi centrali trovano spazio la selezione e il controllo dei componenti già in fase di approvvigionamento, la modellazione e la verifica virtuale del progetto, l'impiego della realtà aumentata come strumento di guida per la manodopera, i controlli periodici durante logistica e montaggio. A completamento, le attività di consegna includono il confronto tra le prestazioni attese e il reale comportamento d'uso.

Dal punto di vista operativo, INSITER ha prodotto un insieme integrato di strumenti in grado di supportare l'auto-ispezione e la valutazione delle condizioni degli edifici. Questi strumenti dialogano con piattaforme per il monitoraggio dell'efficienza energetica e del comfort, utilizzando un'infrastruttura cloud che collega in modo diretto rilievi, modelli e controlli. I dati raccolti vengono trasmessi a pannelli di supervisione che facilitano il processo decisionale durante le diverse fasi del cantiere. Un repertorio di indicatori prestazionali e di metodi di calcolo conformi agli standard europei e internazionali consente inoltre di misurare le prestazioni in modo oggettivo e una valutazione e un confronto tra i risultati nel rispetto di diversi parametri tecnici e delle diverse esigenze degli operatori coinvolti.

La realtà aumentata assume un ruolo centrale consentendo di sovrapporre il modello virtuale allo stato fisico di manufatti e componenti per valutarne

la coerenza geometrica e prevenire problemi in fase di montaggio. In parallelo, tecniche e procedure di diagnosi integrate nel modello informativo e arricchite da dati di geolocalizzazione permettono di individuare anomalie e di registrarle nelle procedure di controllo della qualità.

I risultati di INSITER hanno mostrato come le tecnologie digitali possano trasformare radicalmente il modo in cui la qualità viene verificata nel processo edilizio. L'introduzione di strumenti ICT per la simulazione ha infatti reso possibile estendere la verifica ben oltre la fase di costruzione, anticipandone una parte consistente già in fase di progetto attraverso la creazione di una replica digitale dell'edificio. In questo modo, il controllo della conformità non si limita più al cantiere, ma inizia fin dalla progettazione, quando il modello informativo diventa il banco di prova su cui testare prestazioni, individuare criticità e prevenire errori.

Il volume interpreta questa eredità ponendo attenzione alla chiusura del ciclo della qualità, che si realizza non solo con le verifiche di collaudo, ma soprattutto con il trasferimento informativo supportato dal BIM e con la predisposizione di un dossier di qualità che raccoglie elaborati *as-built*, risultati di prova, manuali d'uso e registri delle non conformità risolte, costituendo la base per una gestione trasparente e documentata dell'opera.

Su queste basi si apre la prospettiva dell'impiego di modelli tridimensionali configurati come vere e proprie repliche digitali. Alimentati dai dati provenienti da sensori applicati ai diversi componenti edilizi e impiantistici, tali modelli sono in grado di restituire in tempo reale, in ambiente virtuale, una rappresentazione accurata delle condizioni di esercizio dell'edificio, fino al dettaglio delle singole parti. Questa evoluzione permette di mantenere nel tempo la corrispondenza tra progetto e costruito, riducendo il rischio di decadimento delle prestazioni e aprendo la strada a strategie avanzate di manutenzione predittiva.

In questa logica, il passaggio da un modello di controllo ex-post a un modello preventivo di auto-ispezione lungo tutto il processo costruttivo si configura come una innovazione di sistema che determina il rilevamento dei difetti, la riduzione del rischio e una maggiore affidabilità documentata delle opere.

Il contributo di questo lavoro consiste nell'esercitare su questa linea un vaglio critico, riorganizzando procedure e strumenti in un impianto coerente e aggiornato alla luce degli sviluppi normativi e tecnologici successivi alla conclusione di INSITER.

La struttura del volume segue un percorso che intreccia teoria, quadro normativo e prassi operativa. Nella prima parte viene affrontato il tema della qualità come valore sistemico, che attraversa tutte le fasi del processo edilizio. Nella parte centrale l'attenzione si sposta sull'organizzazione del processo stesso e sugli strumenti che ne accompagnano lo sviluppo, mettendo

in evidenza come la corretta pianificazione dei controlli e delle verifiche possa ridurre in modo significativo il divario tra prestazioni attese e prestazioni effettivamente raggiunte. Le sezioni finali, infine, propongono un collegamento diretto fra requisiti da rispettare e strumenti disponibili per tradurli in pratica, favorendo così la continuità e la coerenza del processo.

Sul piano normativo, il percorso europeo in materia di prestazione energetica degli edifici ha mostrato una progressiva evoluzione: dalla direttiva del 2010, passando per l'aggiornamento del 2018, fino alla più recente Direttiva 2024, nota come "Case Green". Questa sequenza di provvedimenti non rappresenta solo un contesto di riferimento, ma costituisce la cornice entro cui interpretare la convergenza fra gli obiettivi di decarbonizzazione e la ricerca di qualità nei processi costruttivi.

Il contributo del libro si colloca proprio in questa prospettiva: non si limita a richiamare le norme, ma le utilizza come chiave di lettura per comprendere come i requisiti energetici e ambientali si traducano in pratiche di progettazione, verifica e gestione. In parallelo, l'analisi del contesto nazionale – che riguarda ispezione degli impianti, qualificazione degli operatori e sistemi informativi – permette di mettere a fuoco il tema della responsabilità diffusa, rafforzando il legame fra progetto, collaudo e gestione in esercizio. Il testo diventa così uno strumento per orientarsi in un quadro regolatorio complesso, ma soprattutto per individuare i modi concreti con cui le regole incidono sulla qualità effettiva del costruito.

A fronte della rapidità con cui evolvono gli strumenti digitali, la tesi centrale del volume, e ciò che ne garantisce una solida "resilienza editoriale", è che una efficace gestione della qualità non risiede nelle tecnologie in sé ma nel metodo. Un metodo che parte dalla definizione preventiva dei requisiti, prosegue con la prescrizione chiara dei controlli e si traduce in procedure di verifica puntuale delle prestazioni. A questo si affiancano gli approfondimenti sui sistemi di gestione capaci di integrare tutte le fasi del processo edilizio in un modello ciclico di miglioramento continuo, in cui i risultati di ogni fase alimentano le successive, garantendo coerenza e progressivo affinamento della qualità.

All'interno di questo quadro, il libro mette in primo piano un elemento decisivo: la conformità del costruito al progetto architettonico, funzionale e tecnologico. È proprio questa esigenza di coerenza a rendere complesso il concetto di qualità, perché richiede di armonizzare, nelle diverse fasi, aspetti formali, prestazionali e tecnici, stabilendone priorità e gerarchie. In questi momenti di scelta, le tecnologie ICT, dalla modellazione digitale fino alle applicazioni più avanzate di intelligenza artificiale, si rivelano strumenti di grande efficacia, perché consentono di valutare e confrontare un numero molto elevato di variabili, rendendo più affidabili e consapevoli le decisioni.

In quest'ottica, gli autori insistono sia sulla necessità di supportare la conformità con dati oggettivi, sia sull'integrazione di tutti gli attori coinvolti in un quadro di responsabilità condivise.

Questo approccio, che riprende e sviluppa l'impostazione di INSITER, permette di tradurre la qualità in procedure, strumenti e indicatori aggiornati al contesto normativo più recente, ma soprattutto di trasformarla in una pratica attuabile nei cantieri contemporanei.

Ne deriva non un catalogo di soluzioni fisse, ma una vera e propria grammatica di metodo: definire il problema in termini prestazionali; associare a ogni fase misure, tolleranze e controlli; predisporre strumenti di verifica e tracciabilità integrati al modello digitale; utilizzare la diagnostica come supporto alle decisioni e non come controllo tardivo; garantire che il passaggio dall'esecuzione alla gestione sia accompagnato da documenti, modelli e dossier capaci di evolvere in ambienti di *facility management* avanzato.

Questa grammatica, radicata nei risultati di INSITER e sviluppata criticamente nel volume, si propone come strumento trasferibile e continuamente aggiornabile. È capace di accogliere nuove tecnologie senza perdere la struttura che consente di rendere la qualità un obiettivo misurabile, verificabile e garantito lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Introduzione

Introduction

This volume addresses the evolving notion of quality in the building process, situating it within the broader transformations driven by sustainability, energy efficiency, and digitalization. Quality is conceptualized not as a static property of the finished product, but as the outcome of a dynamic and integrated process encompassing the entire building life cycle, from planning and design to construction and operation.

The first chapter introduces the concept of quality as a multifactorial construct that integrates technological, environmental, organizational, and social dimensions, while the second one examines the articulation of the building process, comparing the Italian framework with international references such as the RIBA Plan of Work. The third chapter discusses procedures and tools for quality assessment, with particular emphasis on information and traceability. The fourth chapter investigates defects, non-conformities, and the performance gap, analyzing their technical and systemic causes as well as the related responsibilities. The fifth chapter focuses on energy efficiency, outlining the regulatory context and presenting the main Key Performance Indicators (KPIs), which are thermal transmittance, renewable energy share, airtightness, thermal comfort, overheating hours, daylight quality, automation. The sixth chapter provides the operational core of the book, addressing the building envelope through a dual perspective: recurrent errors to be avoided in the construction process and KPIs to be monitored through appropriate methods. The seventh and final chapter illustrates innovative approaches to quality management, presenting methodologies and demonstrative case studies from the H2020 INSITER project.

By combining conceptual reflection with operational tools and case-based evidence, the book seeks to contribute to the advancement of a shared culture of quality in the construction sector, aligned with the ecological and digital transition.

Il tema della qualità nel processo edilizio ha assunto, negli ultimi decenni, un rilievo crescente, sia nel dibattito scientifico e normativo, sia nella prassi professionale e costruttiva. La transizione verso un modello edilizio orientato alla sostenibilità ambientale, all'efficienza energetica e al benessere degli utenti ha reso evidente come la qualità non possa più essere considerata un

attributo statico, limitato al prodotto finito, bensì un obiettivo complesso e dinamico, il cui conseguimento dipende da un insieme di procedure integrate che si sviluppano lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio. In questa prospettiva, la qualità si configura come esito di un processo che coinvolge simultaneamente la fase di programmazione, di progettazione, di produzione, di esecuzione in cantiere e di gestione in esercizio, assumendo così la forma di una costruzione sociale e tecnica, condivisa tra i molteplici attori della filiera. L'evoluzione normativa e tecnica ha contribuito a consolidare tale approccio. Le direttive europee in materia di energia e ambiente, i sistemi di gestione della qualità (UNI EN ISO 9001:2015, UNI EN ISO 14001:2015, UNI CEI EN ISO 50001:2018) e, più recentemente, gli strumenti di digitalizzazione – in particolare il *Building Information Modeling* (BIM) e i *Digital Twin* – hanno aperto la strada a una gestione dei processi più trasparente, tracciabile e interoperabile. Il passaggio da un modello di controllo ex post, basato sulla verifica di conformità dell'opera realizzata, a un modello di prevenzione e auto-ispezione lungo tutto il processo costruttivo rappresenta una delle innovazioni più rilevanti degli ultimi anni, con ricadute dirette sulla riduzione dei difetti, sulla mitigazione dei rischi e sull'affidabilità complessiva delle opere.

Il volume si inserisce in questo quadro, proponendo una riflessione sistematica sulla qualità edilizia attraverso un percorso che integra inquadramenti teorici, riferimenti normativi e casi applicativi. Esso trae origine dalle ricerche condotte nell'ambito del progetto europeo H2020 INSITER (*Intuitive Self-Inspection Techniques*), che ha affrontato il tema degli errori di cantiere e della loro riduzione attraverso pratiche innovative di auto-ispezione e tramite l'uso di tecnologie digitali per il supporto alla progettazione, alla fabbricazione e al montaggio. L'esperienza di INSITER costituisce dunque il filo conduttore che collega le riflessioni teoriche ai contenuti operativi, mostrando come l'adozione di procedure strutturate e di strumenti innovativi possa contribuire a una più diffusa cultura della qualità.

La struttura del volume riflette questa impostazione. Il **primo capitolo** introduce il concetto di qualità nel processo edilizio, evidenziandone la natura multifattoriale e la progressiva evoluzione da criterio tecnico a valore sistemico, che intreccia dimensioni tecnologiche, ambientali, organizzative e sociali. La qualità è analizzata come risultato dinamico, emergente dalle interazioni tra i diversi soggetti coinvolti, e come strumento di governo dei processi, capace di integrare le istanze della committenza con le prestazioni attese e misurate.

Il **secondo capitolo** si concentra sull'articolazione del processo edilizio e sul confronto tra i diversi modelli organizzativi. Accanto alla descrizione del processo tipico in Italia, vengono messi in relazione i principali riferimenti internazionali, come il *Royal Institute of British Architects* (RIBA) *Plan of Work*,

al fine di evidenziare convergenze, divergenze e potenzialità di adattamento. L'analisi delle fasi – dalla definizione strategica alla messa in uso – mette in luce come la qualità dipenda dalla chiarezza degli obiettivi, dalla corretta definizione dei documenti e dalla distribuzione delle responsabilità tra gli attori.

Il **terzo capitolo** approfondisce le procedure e gli strumenti di valutazione della qualità attualmente in uso. Viene illustrato come il controllo si declini nelle diverse fasi del ciclo edilizio e come le pratiche di verifica stiano progressivamente integrandosi con i sistemi digitali di tracciabilità e gestione dei dati. Particolare attenzione è rivolta alla *governance* dell'informazione, riconosciuta come condizione essenziale per garantire trasparenza, affidabilità e possibilità di audit lungo tutta la filiera.

Il **quarto capitolo** affronta il tema delle difformità, dei vizi e dei difetti delle opere, analizzando le loro ricadute giuridiche e tecnico-operative. Il concetto di *performance gap* – ossia la distanza tra le prestazioni previste in fase di progetto e quelle effettivamente misurate in esercizio – è discusso in relazione alle cause che lo determinano, tanto di natura puntuale (errori di calcolo, dettagli costruttivi, modalità esecutive) quanto di natura sistemica (mancanza di coordinamento, frammentazione della filiera, inadeguatezza dei controlli). Tale riflessione è accompagnata da un esame delle responsabilità che gravano sui diversi attori e delle strategie disponibili per ridurre i rischi di contenzioso e migliorare la qualità.

Il **quinto capitolo** è dedicato agli edifici energeticamente efficienti e agli indicatori prestazionali che ne definiscono la qualità. Dopo una ricognizione del quadro normativo europeo e nazionale, vengono presentati i principali *Key Performance Indicators* (KPI) che consentono di valutare e monitorare le prestazioni: trasmittanza termica, quota di energia rinnovabile, tenuta all'aria, comfort termo-igrometrico, ore di surriscaldamento estivo, illuminazione naturale, sistemi di automazione. L'adozione di indicatori aggregati, in grado di sintetizzare il comportamento globale dell'edificio, è proposta come strategia per rendere più leggibile e comparabile la qualità energetica.

Il **sesto capitolo** rappresenta il fulcro operativo del volume ed è dedicato all'involucro edilizio, considerato la componente più determinante per le prestazioni energetiche e di comfort. Ogni elemento – chiusure orizzontali inferiori, pareti opache, pareti vetrate e coperture – è analizzato secondo uno schema comune che distingue, da un lato, gli errori ricorrenti da evitare lungo il processo edilizio, e, dall'altro, i KPI da monitorare e le relative modalità di verifica. Tale articolazione consente di unire la dimensione prescrittiva (quali difetti prevenire, quali procedure adottare) con la dimensione prestazionale (quali indicatori presidiare, come misurarli), offrendo strumenti di immediata applicabilità alla pratica progettuale e cantieristica.

Il **settimo capitolo** propone infine uno sguardo sull'innovazione nella gestione della qualità, illustrando metodologie e strumenti sviluppati nell'ambito del progetto INSITER. Vengono presentate tecniche di auto-ispezione, procedure digitali per il monitoraggio e casi studio dimostrativi, con l'obiettivo di convalidare come l'uso sistematico di tecnologie e protocolli avanzati possa tradursi in benefici concreti: riduzione dei tempi e dei costi, diminuzione degli errori e rilavorazioni, incremento dell'affidabilità complessiva del processo edilizio.

Nel loro insieme, i capitoli delineano un percorso coerente che muove dai fondamenti concettuali della qualità edilizia, si confronta con l'organizzazione del processo e le pratiche di valutazione, analizza i rischi di difformità e giunge a illustrare indicatori, tecniche e strumenti innovativi.

Il volume intende così offrire un contributo scientifico e operativo alla costruzione di una cultura della qualità condivisa e orientata alla transizione ecologica e digitale del settore delle costruzioni.

1. La qualità nel processo edilizio

1. Quality in the Building Process

The chapter introduces the concept of quality in the building process as a multi-faceted dimension integrating technological, organizational, environmental, and social aspects. Quality is not conceived as a static attribute of the final product, but as the dynamic outcome of choices and interactions throughout the entire building life cycle: from design to construction, and up to operation and maintenance.

The growing focus on sustainability and energy efficiency requires a systemic approach able to connect measurable performances, user expectations, and regulatory compliance. The text examines the main factors influencing quality, distinguishing among the design, construction, and management dimensions, while stressing the need for monitoring and evaluation tools that ensure transparency and traceability.

Special emphasis is placed on the role of digital innovations, which enable integrated data management and reduce errors along the supply chain. Quality is thus presented as a shared goal, the result of distributed responsibilities and collaborative processes aimed at delivering buildings that are not only energy-efficient, but also reliable, durable, and capable of meeting the real needs of society.

Keywords: *building quality, construction process, performance-based approach, integrated management, energy performance, environmental sustainability, comfort and well-being, building management, digitalization and BIM, digital twin.*

Negli ultimi decenni il concetto di qualità nel settore delle costruzioni ha vissuto una profonda trasformazione. Da requisito prevalentemente tecnico e legato al rispetto di norme e standard, si è ampliato fino a includere aspetti più complessi, che comprendono sostenibilità ambientale, efficienza energetica, sicurezza, durabilità e benessere degli utenti.

La qualità non è più un attributo statico, ma il risultato dinamico dell'intero ciclo di vita dell'edificio, dalla progettazione alla costruzione fino alla gestione.

In questo quadro, progettazione, realizzazione e uso non sono fasi separate, ma momenti interconnessi che richiedono coerenza, trasparenza e tracciabilità.

Un ruolo centrale è svolto dall'innovazione digitale: strumenti interoperabili, piattaforme di gestione dati, BIM, indicatori di *smart readiness* e pratiche di auto-ispezione consentono di ridurre errori, ottimizzare tempi e costi e aumentare l'affidabilità. Parallelamente, normative e certificazioni hanno rafforzato la cultura della misurazione, spingendo il settore a ripensare processi e criteri di valutazione.

La qualità emerge così come obiettivo condiviso e strategico, fondato sulla collaborazione lungo la filiera e indispensabile per affrontare le sfide contemporanee: transizione ecologica, resilienza climatica e centralità dell'utente.

1.1. Interpretare la qualità nell'ambito delle costruzioni

Il settore delle costruzioni, a differenza di altri comparti industriali, presenta un'elevata complessità organizzativa contraddistinta dal coinvolgimento di una pluralità di attori – in particolare progettisti, costruttori e committenti – le cui attività risultano strettamente interconnesse. In un contesto in cui le opere diventano sempre più complesse, performanti e integrate con tecnologie avanzate, queste interdipendenze assumono un peso crescente.

Un aspetto che distingue l'edilizia da settori affini, come il design industriale, è l'assenza di progetti perfettamente replicabili. Infatti, l'opera architettonica non può essere assimilata a un prodotto seriale: ogni intervento porta con sé elementi di unicità, che spaziano dalla specificità del luogo alle esigenze della committenza, fino alla scelta dei materiali e delle finiture. Questa peculiarità introduce un'elevata variabilità operativa e rende complesso applicare sistemi di monitoraggio della qualità rigidamente standardizzati.

In tale scenario, il concetto di qualità assume significati diversi a seconda dell'attore coinvolto. Per i progettisti – architetti o ingegneri – si traduce nella capacità di soddisfare le esigenze del committente nel rispetto delle norme e dei vincoli progettuali, con attenzione sia all'aspetto estetico dell'architettura (ordine, forma, utilità, ornamento, spazio e tempo), sia alle prestazioni dell'edificio, oggi sempre più legate all'efficienza energetica e all'integrazione di tecnologie intelligenti, come previsto dallo *Smart Readiness Indicator* (SRI) della Direttiva europea sulla prestazione energetica nell'edilizia. Per i costruttori, siano essi *general contractor*, subappaltatori o artigiani, la qualità coincide con la realizzazione di un'opera conforme al progetto esecutivo, capace di garantire le prestazioni richieste e di rispettare tempi e costi stabiliti. In questo senso, il loro lavoro dipende in modo cruciale

dalla chiarezza e completezza della documentazione progettuale – dagli elaborati grafici ai modelli BIM, dai capitolati alle relazioni tecniche –, che deve consentire un'esecuzione priva di ambiguità interpretative. Per il committente o per il fruitore finale, invece, la qualità si traduce nella sintesi di tutti questi aspetti: un edificio esteticamente valido, efficiente, privo di difetti e realizzato nei tempi e nei costi concordati.

In questo quadro, l'obiettivo comune a progettisti e costruttori è mettere a disposizione competenze, esperienza tecnica e capacità organizzativa per rispondere pienamente alle necessità della committenza, assicurandone la soddisfazione al termine del processo. Tuttavia, anche con le migliori intenzioni, il percorso verso la qualità non è mai lineare e può essere ostacolato da imprevisti, soprattutto negli interventi su edifici esistenti.

In questo scenario si colloca la presente pubblicazione, che intende affrontare il tema della qualità edilizia da una prospettiva innovativa. L'obiettivo è individuare e descrivere metodi, strumenti e tecniche – comprese le soluzioni digitali – in grado di supportare le fasi di progettazione, cantierizzazione e gestione, contribuendo a ridurre al minimo errori, difetti e vizi costruttivi.

Questo approccio si ispira alle raccomandazioni sviluppate nell'ambito del progetto europeo H2020 INSITER (*Intuitive Self-Inspection Techniques using Augmented Reality for construction, refurbishment and maintenance of energy-efficient buildings made of prefabricated components*), che promuove pratiche di auto-ispezione, interoperabilità dei modelli BIM, sistemi di misurazione integrati e protocolli condivisi tra i diversi attori della filiera. L'adozione di procedure e tecniche innovative di controllo qualità, applicate a tutte le fasi del processo edilizio, può contribuire ad aumentare la competitività e la sostenibilità delle attività, prevenendo rilavorazioni progettuali o esecutive che rappresentano una delle principali cause di extracosti, ritardi e soprattutto gap prestazionali, tra cui quello energetico.

L'integrazione di tecnologie di monitoraggio in cantiere, strumenti digitali interoperabili e modelli informativi aggiornati consente di ottimizzare il rapporto tra costi e tempi di lavoro, migliorando nel complesso la qualità dell'ambiente costruito e rafforzando la capacità del settore di affrontare le sfide contemporanee, dalla transizione energetica alla resilienza climatica.

1.2. Dalla qualità controllata alla qualità garantita

Il controllo della qualità nel processo edilizio e l'attribuzione di responsabilità in caso di problemi hanno radici antiche, come ricorda A.R. Rumanne in *Quality Tools for Managing Construction Projects*. Già nell'era mesopotamica i costruttori erano ritenuti responsabili della qualità delle

opere al punto che il re di Babilonia promulgò una legge che prevedeva la pena capitale qualora il crollo di un edificio avesse causato la morte degli occupanti.

Nel Medioevo, un ruolo centrale era affidato alle corporazioni, che detenevano la responsabilità del controllo della qualità sull'operato degli artigiani e dei costruttori. Per poter esercitare, ciascun operatore doveva iscriversi alla propria corporazione, garantendo così, anche dal punto di vista etico, il rispetto di standard qualitativi. In caso di difetti era obbligatorio rifare la lavorazione e vigeva il divieto assoluto di porre in opera prodotti scadenti, pena sanzioni severe. Le corporazioni svolgevano inoltre un controllo di terza parte attraverso procedure ispettive sistematiche, per assicurare che tutti gli operatori rispettassero le specifiche di qualità.

A partire dalla metà del Settecento, con la prima rivoluzione industriale, l'avvento delle fabbriche introdusse nuovi principi produttivi, fondati sulla massimizzazione della produttività e la contestuale riduzione di costi e tempi di lavorazione. Le modalità di produzione degli elementi e componenti in fabbrica cambiarono radicalmente, dando origine a squadre di lavoro specializzate e distinte per qualifica, ciascuna supervisionata da un responsabile con compiti anche ispettivi. Tuttavia, l'aumento della produttività non garantì automaticamente il mantenimento della qualità: per contrastare gli effetti negativi, iniziarono ad affermarsi figure professionali dedicate in modo esclusivo alle attività ispettive e di controllo. Queste figure, però, si diffusero su larga scala solo all'inizio del Novecento, quando la procedura ispettiva era ancora focalizzata sull'ultima fase del ciclo produttivo, con l'obiettivo di escludere dalla commercializzazione o dalla consegna in cantiere i prodotti difettosi.

Un cambiamento significativo si ebbe grazie a Walter A. Shewhart, che introdusse un'innovazione sostanziale: affinché il controllo della qualità fosse realmente efficace nella riduzione delle rilavorazioni, doveva essere applicato a ogni fase del processo produttivo e non limitarsi alla verifica del prodotto finito.

Dagli anni Cinquanta alla fine degli anni Sessanta del XX secolo, il concetto di "controllo della qualità" si trasformò in quello di "assicurazione della qualità", spostando l'attenzione dalla rilevazione dei problemi alla loro prevenzione. Su questa base, Armand V. Feigenbaum elaborò il concetto di *Total Quality Control*, che avrebbe poi ispirato il *Total Quality Management* (TQM), con un'integrazione delle attività di controllo su scala aziendale, dalla progettazione alla consegna, e non più limitata alle sole fasi produttive. La qualità del prodotto finito, come nel caso di un componente edilizio, doveva essere garantita anche attraverso procedure ispettive condotte già nelle fasi progettuali e preparatorie alla produzione.

Da questo momento in avanti, la definizione di risultati attesi in ogni singola fase del processo, insieme all'individuazione di parametri di misurazione e modalità di controllo, divenne essenziale per restare competitivi in un mercato globalizzato e orientato alla redditività, senza compromettere la soddisfazione del cliente.

Con l'inizio del XXI secolo e con la crescente attenzione verso tematiche ambientali, sociali, di salute e sicurezza, si è progressivamente affermato l'approccio dell'*Integrated Quality Management*. Questo sistema, attraverso la chiara definizione e condivisione degli obiettivi, mira a ottimizzare i processi, razionalizzare la documentazione, integrare le competenze e migliorare la gestione dei dati, favorendo un uso più efficiente delle risorse. È infatti la consapevolezza condivisa degli obiettivi a rendere possibile una pianificazione efficace delle azioni necessarie al loro raggiungimento.

In questo quadro, l'adozione di attività ispettive sistematiche in tutte le fasi del processo edilizio rappresenta la soluzione più efficace per individuare tempestivamente difformità o incongruenze che potrebbero compromettere il rispetto del progetto architettonico e delle prestazioni attese. Interventi correttivi o rilavorazioni complete eseguite in fase avanzata, infatti, raramente garantiscono risultati pienamente soddisfacenti.

1.3. Il sistema di gestione integrato della qualità e l'approccio esigenziale-prestazionale

Oggi, il sistema di gestione integrato della qualità richiede, da parte dell'azienda e degli operatori, l'applicazione della normativa internazionale EN ISO 9000:2005, che descrive i fondamenti dei sistemi di gestione per la qualità e ne definisce i termini. La norma definisce la qualità come «il grado in cui un insieme di caratteristiche di un prodotto soddisfa esigenze o aspettative che possono essere espresse, generalmente implicite o cogenti».

In ambito tecnico-edilizio, un'opera può essere considerata di alta qualità solo se soddisfa pienamente le esigenze espresse dal committente: sia quelle cogenti (prescrizioni o vincoli di legge inderogabili) sia quelle implicite (usi e pratiche consolidate). Un livello di soddisfazione più basso del committente corrisponde inevitabilmente a una qualità inferiore dell'opera realizzata. Per questo motivo è fondamentale definire, già in fase preliminare, le esigenze che “qualificheranno” l'opera.

Tali esigenze devono essere espresse in forma scritta, all'interno di documenti come il quadro esigenziale o il Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP), che costituiranno il riferimento:

- in prima istanza, per architetti e ingegneri nella redazione del progetto;
- in seconda istanza, per l'impresa e gli artigiani in fase di cantierizzazione dell'opera.

In Italia, dagli anni Ottanta, è stato normato un metodo oggi noto come approccio esigenziale-prestazionale. Questo approccio stabilisce che, per valutare se un progetto risponde in modo efficace alle esigenze espresse, è necessario definire preventivamente una serie di requisiti che l'edificio dovrà soddisfare per essere considerato di "qualità". Misurando la prestazione per ciascun requisito atteso, sarà così possibile attestare la qualità dell'edificio in modo oggettivo. In particolare, la serie UNI 8290 ha introdotto il principio di operare per obiettivi di prestazione, senza prescrivere però il modo in cui conseguirli.

Per comprenderne l'applicazione, è fondamentale chiarire la correlazione esistente tra la triade rappresentata da esigenza, requisito e prestazione, come indicato nella stessa norma, che definisce così questi concetti:

- esigenza: «l'esplicitazione delle richieste, dei bisogni e delle necessità di un individuo per svolgere al meglio una determinata attività o funzione tecnologica»;
- requisito: «la traduzione dell'esigenza in fattori concreti, tali da individuare le condizioni per il suo soddisfacimento da parte dell'organismo edilizio o di sue parti, in specifiche condizioni d'uso o di sollecitazione»;
- prestazione: «la risposta tecnica al requisito, cioè il comportamento reale dell'organismo edilizio o delle sue parti nelle effettive condizioni d'uso e di sollecitazione. Le prestazioni possono essere monitorate tramite parametri o indicatori, diretti o indiretti, anche attraverso procedure di calcolo».

Un edificio, nella fase di esercizio, deve dunque rispondere a una serie di requisiti, derivati dalle esigenze predeterminate in sede di progetto. L'efficacia della risposta si misura confrontando il requisito atteso con la prestazione effettivamente raggiunta, valutando l'eventuale divario (gap) in termini quantitativi o percentuali.

A tale scopo, la norma UNI 8290-2:1983 individua sette classi di esigenze fondamentali, con l'obiettivo di unificare il linguaggio tecnico nelle attività normative, progettuali e operative. Esse derivano dai bisogni dell'utenza finale, tenendo conto dei vincoli ambientali, socioculturali ed economici.

Nello specifico, le classi di esigenze fondamentali sono:

1. sicurezza, intesa come la condizione per la tutela dell'incolumità degli utenti e la prevenzione di danni derivanti da fattori accidentali;
2. benessere, inteso come la condizione per garantire vita e salute adeguate e un corretto svolgimento delle attività;

3. fruibilità, quale la condizione per la fruizione fisica e percettiva del sistema edilizio;
4. aspetto, inteso come la condizione legata alla percezione visiva e all'immagine complessiva dell'edificio;
5. gestione, quale condizione relativa all'economia di esercizio del sistema edilizio;
6. integrabilità, intesa come la capacità delle unità e degli elementi del sistema edilizio di connettersi tra loro in modo funzionale;
7. salvaguardia dell'ambiente, intesa come la condizione per il mantenimento e il miglioramento dello stato dell'ambiente.

Spostandosi alla scala tecnica dei materiali e dei componenti edilizi, a livello europeo, il Regolamento Prodotti da Costruzione (UE) CPR 305/2011 definisce sette requisiti essenziali per tutti i prodotti destinati a diventare parte permanente di un'opera di costruzione:

1. resistenza meccanica e stabilità;
2. sicurezza in caso di fuoco;
3. igiene, salute e ambiente;
4. sicurezza in uso;
5. protezione contro il rumore;
6. risparmio energetico e ritenzione di calore;
7. uso sostenibile delle risorse naturali.

In questa pubblicazione vengono considerati prioritari i requisiti legati al benessere, al comfort e al risparmio energetico, alla gestione dell'edificio e alla salvaguardia dell'ambiente, come illustrato nella parte che segue.

1.3.1. Requisiti di benessere, comfort e risparmio energetico

Il requisito di benessere è determinato da quattro fattori principali: termico, acustico, visivo, igiene-sicurezza-ambiente.

Il **benessere termico** degli occupanti all'interno di un edificio è garantito soprattutto da scelte progettuali quali l'adozione di sistemi solari passivi, una corretta dotazione di impianti meccanici e la loro corretta distribuzione nei singoli ambienti. Questo requisito è strettamente correlato e complementare a quello di risparmio energetico: le opere di costruzione e i relativi impianti di riscaldamento, raffrescamento, illuminazione e aerazione devono essere concepiti e realizzati con l'obiettivo di garantire consumi energetici moderati, tenendo conto del numero e delle attività degli occupanti e delle condizioni climatiche locali. Le più recenti Direttive europee sull'energia nel settore edilizio hanno reso questo requisito sempre più determinante per qualificare un'opera. A titolo di esempio, la prestazione può essere monitorata

attraverso la temperatura interna operativa degli ambienti (°C), il consumo annuo di energia primaria (kWh/m²a) e l'indice PMV/PPD¹.

Il **benessere acustico** rappresenta una delle condizioni che più frequentemente generano contenziosi. La normativa europea stabilisce che le opere debbano essere progettate e costruite in modo da contenere il rumore percepito dagli occupanti o dalle persone nelle vicinanze, così da non nuocere alla salute e garantire condizioni soddisfacenti di sonno, riposo e lavoro. Per ottenere un comfort acustico adeguato è necessario prevedere già in fase di progetto e di cantierizzazione soluzioni di isolamento che limitino la propagazione del rumore per via aerea e/o di calpestio, in relazione alla tipologia e all'uso dell'edificio. In questo caso il monitoraggio può essere effettuato valutando l'isolamento acustico DnT,w (dB) delle chiusure e/o partizioni dell'edificio costruito.

Il **benessere visivo** riguarda la capacità di un ambiente di offrire comfort e soddisfazione visiva a chi lo utilizza. Alcuni fattori determinanti sono:

- l'adeguata illuminazione naturale, conforme alle norme in relazione alla funzione dell'ambiente;
- l'uso equilibrato dei colori, evitando contrasti eccessivi o tinte troppo vivaci;
- l'impiego di superfici non eccessivamente riflettenti, per ridurre riverberi e affaticamento visivo.

Il principale parametro di controllo è demandato all'illuminamento medio (lux) degli ambienti.

Il quarto aspetto riguarda **igiene, sicurezza e ambiente**. Da oltre cinquant'anni è riconosciuta a livello internazionale la “sindrome da edificio malato”, che si manifesta con malesseri diffusi tra gli occupanti, come irritazioni a occhi, naso e vie respiratorie, mal di testa, stanchezza, vertigini e difficoltà di concentrazione. Questi sintomi tendono a regredire allontanandosi dall'edificio. Le cause riconosciute sono molteplici: una ventilazione insufficiente degli ambienti che causa un accumulo di anidride carbonica e Composti Organici Volatili (VOC); impianti di climatizzazione contaminati; emissione di sostanze odorose e irritanti da materiali e apparecchiature; livelli inadeguati di umidità; rumori fastidiosi persistenti.

¹ Gli indici *Predicted Mean Vote* (PMV) e *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) sono strumenti per misurare il comfort termico negli ambienti, che considerano sei fattori: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa, velocità dell'aria, attività metabolica (metabolismo umano) e isolamento termico dei vestiti. Il PMV rappresenta il voto medio previsto su una scala di 7 punti da -3 (molto freddo) a +3 (molto caldo), indicando la sensazione termica media di un gruppo di persone. Il PPD indica invece la percentuale di persone che esprimerebbero insoddisfazione termica, sia per caldo che per freddo, e si calcola in base al PMV.

Le opere devono quindi essere concepite e realizzate in modo da non costituire, durante il loro intero ciclo di vita, una minaccia per l'igiene, la salute e la sicurezza dei lavoratori, degli occupanti o dei vicini, né da esercitare un impatto eccessivo sull'ambiente o sul clima, durante la loro costruzione, uso e demolizione. In particolare non devono mai causare: sviluppo di gas tossici; emissione di sostanze pericolose, VOC, gas a effetto serra o particolato pericoloso nell'aria interna o esterna; emissione di radiazioni pericolose; dispersione di sostanze pericolose nelle falde acquifere, nelle acque marine, nelle acque di superficie o nel suolo; dispersione di sostanze pericolose o di sostanze aventi un impatto negativo sull'acqua potabile; scarico scorretto di acque reflue; emissione di gas di combustione o scorretta eliminazione di rifiuti solidi o liquidi; umidità in parti o sulle superfici delle opere di costruzione².

Uno dei principali parametri da monitorare per questo aspetto è la concentrazione di VOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

1.3.2. Requisito di gestione dell'edificio

Il requisito di “gestione dell'edificio” ha assunto un rilievo crescente, soprattutto negli ultimi anni. Se in passato l'attenzione del committente era rivolta prevalentemente ai soli costi necessari per la costruzione dell'opera edilizia, oggi essa si estende anche ai costi in fase d'esercizio, in particolare quelli relativi al consumo di energia (elettrica, idrica e termica), nonché ai costi di manutenzione necessari per garantire nel tempo la qualità, anche in termini prestazionali, dell'opera.

L'assolvimento di questo requisito, pertanto, è determinato in gran parte dalle scelte progettuali e, nello specifico, dalle caratteristiche dei materiali, componenti ed elementi tecnologici adottati. Ad esso si correlano anche i requisiti di “integrabilità” dei sistemi e di “uso sostenibile delle risorse naturali” nell'ottica di favorire la circolarità dei processi e l'impiego di materiali naturali e riciclabili.

Tra i principali parametri e indicatori di prestazione che rientrano in questo requisito si possono citare: il costo annuo di gestione ($\text{€}/\text{m}^2$); il costo del ciclo di vita (€); l'indice di manutenibilità (%); il consumo idrico specifico ($\text{litri}/\text{m}^2\text{a}$).

² L'insorgere di fenomeni di umidità e/o di condense interstiziali all'interno delle parti che costituiscono l'involucro edilizio è una delle principali cause di malessere e di patologie legate alla sindrome da edificio malato. È quindi fondamentale porre particolare attenzione all'adozione di un isolamento termico adeguato, progettato e realizzato in modo da garantire la continuità e l'assenza di ponti termici.

1.3.3. Requisito di salvaguardia dell'ambiente

Gli effetti del cambiamento climatico hanno reso non più prorogabili azioni di mitigazione e salvaguardia dell'ambiente.

Salvaguardare l'ambiente significa ridurre l'impronta antropica, tutelare e conservare habitat e biodiversità, garantire la disponibilità di acqua ed aria pulite per tutte le specie, limitare l'inquinamento e contrastare i danni sempre più evidenti sul nostro ecosistema e sulle città.

In questo ambito gli edifici rivestono un ruolo determinante: tra fase di costruzione e di esercizio, il settore edilizio è infatti responsabile di circa il 30% dei consumi energetici mondiali e di circa il 40% delle emissioni globali di gas serra in atmosfera.

L'applicazione di requisiti di sostenibilità legati alla salvaguardia dell'ambiente è quindi prioritaria per ridurre l'impatto del settore delle costruzioni e contribuire alla decarbonizzazione delle città.

Tra i principali obiettivi di questo requisito si possono citare:

- l'utilizzo delle risorse climatiche locali per riscaldamento, raffrescamento e ventilazione naturale;
- l'integrazione con il contesto ambientale, nel rispetto dei caratteri del luogo, del sistema verde e delle tradizioni costruttive locali;
- il contenimento dei consumi di materiali da costruzione, acqua ed energia per il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione degli ambienti e la produzione di acqua calda sanitaria ed energia elettrica;
- la riduzione dei carichi ambientali comprendente il controllo delle emissioni in atmosfera, la gestione delle acque reflue, il contenimento del rumore emesso, la separabilità e riciclabilità dei materiali, ecc.

A tale scopo, all'interno del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE) è richiesta la redazione di un documento tecnico chiamato "relazione di sostenibilità dell'opera"³. In essa devono essere descritte le strategie progettuali attuate per perseguire gli obiettivi ambientali⁴ tenendo conto dell'intero ciclo di vita dell'opera. I criteri di valutazione comprendono: le azioni adottate per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici; l'uso sostenibile e la protezione delle acque e delle risorse marine; la transizione verso un'economia circolare; la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento; la protezione e il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi.

³ Vedi Paragrafo 2.1.

⁴ Come definiti nell'ambito dei regolamenti (UE) 2020/852 del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 giugno 2020 e 2021/241 del Parlamento europeo e del Consiglio del 12 febbraio 2021.

Il requisito di salvaguardia ambientale si rafforza inoltre attraverso analisi e strumenti progettuali quali: la stima della *carbon footprint* dell'opera in relazione al ciclo di vita e al contributo al raggiungimento degli obiettivi climatici; la valutazione del ciclo di vita dell'opera in ottica di economia circolare⁵, secondo le metodologie e gli standard internazionali *Life Cycle Assessment* (LCA); l'analisi del consumo complessivo di energia con l'indicazione delle fonti per il soddisfacimento del bisogno energetico, anche con riferimento a criteri di progettazione bioclimatica; la definizione delle misure volte a ridurre le quantità degli approvvigionamenti esterni (riutilizzo interno all'opera) e delle opzioni di modalità di trasporto più sostenibili dei materiali verso/dal sito di produzione al cantiere.

Chiaramente questo requisito è correlato anche a quello di risparmio energetico, poiché un edificio performante dal punto di vista energetico contribuisce in maniera diretta alla riduzione delle emissioni inquinanti, almeno durante la fase di esercizio.

Tale requisito oggi è solitamente qualificato attraverso le emissioni di CO₂eq in ciclo di vita (kgCO₂eq/m²a), il fattore di energia rinnovabile (%), l'indice di circolarità dei materiali (%) e il consumo di acqua potabile (m³/m²a).

⁵ Questo aspetto è particolarmente rilevante per i materiali da costruzione, in quanto mira a favorire il riutilizzo di materie prime e seconde, riducendo al contempo gli impatti in termini di rifiuti generati.

2. Il processo edilizio e la sua articolazione

2. The Building Process and its Stages

This chapter examines the structure of the building process, analyzing its articulation in the Italian context and comparing it with international reference frameworks such as the RIBA Plan of Work.

Each project stage – from strategic definition to building use – is presented in detail, highlighting the main objectives, the key documents, and the roles of the different stakeholders.

Special attention is given to the responsibilities of clients, designers, contractors, and site managers, emphasizing how their interaction influences quality, efficiency, and sustainability. The chapter ultimately stresses the importance of a structured approach to ensure that performance requirements are consistently met throughout the process.

Keywords: building process, RIBA Plan of Work, Italian regulations, project stages, stakeholders, construction management, sustainability.

La pianificazione metodologica delle diverse fasi del processo che portano alla realizzazione e all'utilizzo di un prodotto rappresenta il principio cardine del concetto di qualità, da sempre applicato all'interno del settore industriale.

Nel campo delle costruzioni, tale organizzazione è riconosciuta come “processo edilizio” e consiste in una sequenza logica di operazioni finalizzate all'individuazione, definizione e realizzazione del bene edilizio¹.

Più recentemente, la Norma UNI 10838² ha aggiornato tale definizione come: «la sequenza organizzata di fasi che portano dal rilevamento delle esigenze dell'utenza di un bene edilizio al loro soddisfacimento attraverso la progettazione, la produzione, la costruzione e la gestione del bene stesso».

¹ Zaffagnini M. (1981), *Progettare nel processo edilizio*, Parma editore, Bologna.

² UNI 10838:1999, Edilizia – Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia. La norma contiene i termini e le definizioni relative alla qualità edilizia nei suoi aspetti generali e in quelli specifici: ambientali, funzionali, spaziali, tecnologici, tecnici, operativi e gestionali.

Il processo edilizio può riguardare:

- interventi di nuova costruzione, dove consiste nell'applicazione sequenziale di fasi che vanno dal rilevamento delle esigenze dell'utenza e dell'area di intervento fino alla realizzazione e manutenzione dell'opera per garantirne la qualità nel tempo;
- interventi sul costruito, che comprendono azioni di adeguamento, restauro, ristrutturazione o manutenzione di edifici esistenti, includendo sia il rilievo dello stato di fatto sia la successiva gestione e manutenzione, necessarie per mantenerne funzionalità e prestazioni.

In Italia, le prime applicazioni del processo edilizio, in modo sistemico, risalgono agli anni Sessanta, seppur in forme ancora semplificate rispetto a quelle successivamente sviluppate. L'introduzione e l'applicazione in cantiere di nuovi sistemi costruttivi, accanto a quelli più tradizionali, rende necessaria l'adozione di un approccio organizzativo di tipo industriale, fondato sulla definizione di fasi operative organizzate in modo sequenziale, così da garantire una gestione più efficace e controllata dell'intervento edilizio.

Oggi si possono distinguere quattro macrofasi che caratterizzano il processo edilizio:

1. **Programmazione**, volta a identificare i fabbisogni, le disponibilità finanziarie, gli obiettivi da perseguire, la fattibilità tecnico-economica e procedurale, nonché le prestazioni attese dall'intervento. In questa prima fase assume un ruolo determinante la partecipazione attiva della committenza (pubblica e/o privata), degli stakeholder e dei promotori dell'intervento.
2. **Progettazione**, finalizzata a definire una soluzione realizzabile e coerente sotto il profilo tecnico, costruttivo, funzionale, estetico ed economico, in linea con il quadro esigenziale-prestazionale emerso nella fase di programmazione. Protagonisti sono i progettisti (architetti e/o ingegneri) e le eventuali figure professionali consulenziali e/o specialistiche (ad esempio, *Project Manager*, *BIM Manager*, ecc.), con il coinvolgimento della committenza e degli enti preposti al rilascio di pareri e autorizzazioni.
3. **Realizzazione**, destinata a dare concretezza all'intervento edilizio, passando dalla fase progettuale a quella costruttiva. Essa prende avvio con l'appalto e l'affidamento dell'opera a un *general contractor* e/o impresa edile, artigiani, sub-appaltatori, aziende produttrici, ecc. Sulla base del progetto appaltato e delle indicazioni della Direzione Lavori, e nel rispetto dei costi e tempi stabiliti, tali soggetti hanno il compito di realizzare l'opera garantendo le prestazioni previste (energetiche, ambientali, acustiche, di sicurezza sismica e comportamento al fuoco) dal progetto.
4. **Manutenzione e gestione**, rivolta a programmare e attuare, in modo sistematico e periodico, le azioni di intervento necessarie a mantenere nel tempo funzionalità, qualità, efficienza e valore economico dell'opera.

Tali attività, definite nel piano di manutenzione predisposto nelle fasi precedenti, possono essere svolte dall'utente stesso o, più frequentemente, da personale specializzato.

2.1. Il contesto italiano

In Italia, per la realizzazione di opere pubbliche, le fasi del processo edilizio sono regolate dal punto di vista legislativo, con la definizione dei contenuti, degli operatori coinvolti, delle attività da espletare e dei risultati attesi.

In particolare, secondo il Nuovo codice appalti (D.Lgs. 36/2023), è prevista l'elaborazione di tre documenti preliminari alla progettazione:

1. Quadro Esigenziale (QE);
2. Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali (DOCFAP);
3. Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP).

A valle di questi documenti si avvia l'attività di progettazione³, articolata in due livelli successivi di approfondimento tecnico:

1. Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE);
2. Progetto Esecutivo (PE).

Questi livelli non costituiscono compartimenti stagni, ma rappresentano tappe di un processo continuo nel quale vengono via via definite esigenze, prestazioni, soluzioni e costi.

Per gli interventi privati non è obbligatorio seguire rigidamente tale impostazione; la sua applicazione dipende da accordi tra i principali attori coinvolti (committenti, progettisti, appaltatori).

³ Facendo seguito al rispetto dei requisiti precedentemente riportati, l'attività di progettazione ha come obiettivo quello di garantire: il soddisfacimento dei fabbisogni della collettività e del committente; la conformità alle norme ambientali, urbanistiche e di tutela dei beni culturali e paesaggistici, nonché il rispetto di quanto previsto dalla normativa in materia di tutela della salute e della sicurezza delle costruzioni; la rispondenza ai requisiti di qualità architettonica e tecnico-funzionale, nonché il rispetto dei tempi e dei costi previsti; il rispetto di tutti i vincoli esistenti, con particolare riguardo a quelli idrogeologici, sismici, archeologici e forestali; l'efficientamento energetico e la minimizzazione dell'impiego di risorse materiali non rinnovabili nell'intero ciclo di vita delle opere; il rispetto dei principi della sostenibilità economica, territoriale, ambientale e sociale dell'intervento, anche per contrastare il consumo del suolo, incentivando il recupero, il riuso e la valorizzazione del patrimonio edilizio esistente e dei tessuti urbani; la razionalizzazione delle attività di progettazione e delle connesse verifiche attraverso il progressivo uso di metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni; l'accessibilità e l'adattabilità secondo quanto previsto dalle disposizioni vigenti in materia di barriere architettoniche; la compatibilità geologica e geomorfologica dell'opera.

È importante sottolineare che i livelli di progettazione non devono essere intesi come adempimenti tecnico-amministrativi separati e inderogabili, rigidamente definiti nei contenuti e nella sequenza temporale, ma come tappe significative di un unico processo identificativo e creativo. Con il primo livello, il PFTE, vengono definite le caratteristiche qualitative e funzionali dei lavori da eseguire, il quadro delle esigenze da soddisfare e delle prestazioni da fornire, nonché la documentazione tecnica necessaria per il rilascio delle autorizzazioni; con il secondo livello, il PE, è presentato il dettaglio dei lavori da realizzare ed il relativo costo in modo che ogni elemento risulti identificabile in termini di forma, tipologia, qualità, dimensione e prezzo.

2.2. Il contesto internazionale in rapporto a quello nazionale

In ambito europeo, il principale riferimento è il *Plan of Work* elaborato nella sua prima versione nel 1963 nel Regno Unito dal *Royal Institute of British Architects* (RIBA). Analogamente a quanto previsto in Italia dal Codice degli Appalti e dalle normative nazionali, questo strumento si configura come una guida metodologica per la progettazione e la gestione dei processi nel settore delle costruzioni, fornendo una struttura articolata per orientare, in maniera efficace, le fasi di programmazione, ideazione, progettazione, costruzione e gestione dell'opera. Per rispondere più efficacemente alle mutevoli ed emergenti esigenze nonché evoluzioni del settore delle costruzioni, questa guida è stata aggiornata più volte, con le revisioni più rilevanti nel 2013 e nel 2020. L'ultima versione ha posto un'attenzione particolare alle sfide ambientali e climatiche, promuovendo strategie di progettazione sostenibile da integrare fin dalle prime fasi di programmazione, evitando che vengano limitate alle sole fasi di progettazione o costruzione.

Il processo edilizio, secondo lo schema RIBA *Plan of Work 2020*, è articolato in otto fasi distinte (considerando la prima come *Stage 0*), ciascuna con attori specifici e risultati attesi, funzionali alla fase successiva:

- *Stage 0 – Strategic Definition;*
- *Stage 1 – Preparation and Briefing;*
- *Stage 2 – Concept Design;*
- *Stage 3 – Spatial Coordination;*
- *Stage 4 – Technical Design;*
- *Stage 5 – Manufacturing and Construction;*
- *Stage 6 – Handover;*
- *Stage 7 – Use.*

Nell'ambito internazionale della ricerca presentata in questa pubblicazione, si è scelto di assumere il RIBA *Plan of Work* come riferimento standard per l'analisi e la classificazione delle attività di processo.

Tuttavia, per fornire al lettore un quadro più esaustivo, le fasi del RIBA saranno qui descritte e messe in relazione con il contesto italiano, così da evidenziare analogie, differenze e possibili sinergie tra i due sistemi normativi e operativi.

2.2.1. Stage 0 – Strategic Definition

Lo step di avvio dell'iter processuale è di natura strategica ed è volto ad accertare, seppur in via preliminare, la possibilità di soddisfare in modo integrale i requisiti considerati rilevanti da parte del committente.

Questa fase ha un carattere decisivo, in quanto determina se l'iter potrà proseguire con le fasi successive oppure se dovrà essere sospeso qualora i requisiti attesi non risultino garantiti. Non si tratta ancora di attività progettuale, in senso stretto, ma di uno step preliminare finalizzato a orientare le decisioni strategiche da assumere. Tali decisioni vengono raccolte e formalizzate in un documento definito dal RIBA come *Business Case*. Questo documento deve attestare, anche attraverso la comparazione tra più strategie di intervento, la capacità di soddisfare i requisiti attesi, evidenziando al contempo i potenziali rischi tecnici ed economici.

In questa fase, il committente, qualora non disponga delle necessarie competenze tecniche, può avvalersi del supporto di consulenti specializzati, che potranno coincidere con i futuri progettisti.

Il base al tipo di intervento proposto, si raccomanda sempre: un sopralluogo sull'area e/o sull'edificio; un coinvolgimento preliminare degli stakeholder e/o dei potenziali enti competenti al rilascio dei titoli edilizi; un raffronto con casi analoghi (ad esempio per stimare costi comparativi €/m², consumi energetici in fase d'uso, ecc.) e/o di *best-practices* utili a orientare scelte e strategie.

2.2.2. Stage 1 – Preparation and Briefing

Dopo aver verificato, nella fase precedente, la validità di avviare una strategia progettuale coerente con i requisiti attesi, questo step ha l'obiettivo di definire in modo più dettagliato i risultati attesi del progetto, sia in termini prestazionali sia qualitativi, includendo la scelta dei criteri di sostenibilità da perseguire.

Il risultato di questa fase viene raccolto in un documento specifico chiamato dal RIBA *Project Brief*, che rappresenta la base di riferimento per tutto lo sviluppo successivo. Tale documento può anche influenzare la selezione dei progettisti e/o dei costruttori più idonei, sulla base degli obiettivi fissati e delle esperienze pregresse.

Nel contesto italiano, un documento analogo è il “quadro esigenziale”, che esplicita gli obiettivi generali dell’intervento, i fabbisogni qualitativi e quantitativi da soddisfare e gli indicatori chiave di prestazione.

Talvolta questo step prevede anche la definizione di studi di fattibilità, intesi ancora non come progetti veri e propri, ma come strumenti di supporto alle decisioni per dare forma e concretezza a quanto riportato in forma scritta dal *Project Brief*. In particolare, gli studi di fattibilità, se eseguiti, risultano di particolare ausilio per la verifica dei costi economici dell’operazione.

Anche in Italia l’opportunità di sviluppare studi di fattibilità è presa in considerazione e la normativa vigente li formalizza in un report specifico chiamato Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali (DOCFAP)⁴. Il DOCFAP individua e analizza le possibili soluzioni progettuali al fine di selezionare, sulla base di un confronto comparato, quella che presenta il miglior rapporto tra costi e benefici⁵. Qualora non redatto, la scelta della migliore soluzione avviene all’interno del primo livello della progettazione.

All’interno del *Project Brief* viene anche definita una matrice di responsabilità utile a chiarire il limite e il ruolo di ogni attore coinvolto nel processo in corso. Questa matrice aiuta a definire, con chiarezza, i confini e/o le iterazioni dell’uno e dell’altro (in particolare se saranno coinvolti subappaltatori specializzati), nonché le informazioni che gli stessi dovranno produrre.

In Italia, tali contenuti sono riportati nel Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP), elaborato in coerenza con il Quadro Esigenziale e il DOCFAP.

Il DIP, redatto e approvato prima dell’affidamento del PFTE, specifica caratteristiche, requisiti e documenti tecnici necessari per ogni livello progettuale successivo⁶.

⁴ Il DOCFAP è redatto nel rispetto dei contenuti del quadro esigenziale ed è prodromico alla redazione del successivo documento di indirizzo alla progettazione.

⁵ Il DOCFAP è predisposto sottoforma di relazione contenente: analisi dello stato di fatto dell’area o dell’edificio esistente; elaborati grafici delle soluzioni progettuali; schemi grafici che descrivano e consentano l’individuazione delle caratteristiche essenziali delle alternative progettuali esaminate; indicazione dei tempi previsti per l’attuazione delle alternative progettuali esaminate; stima sommaria dei costi, mediante l’adozione di prezzi parametrici; confronto comparato delle alternative progettuali.

⁶ Tra i contenuti più importanti che sono presentati all’interno del DIP ci sono: lo stato dei luoghi con le relative indicazioni di tipo catastale; gli obiettivi da perseguire attraverso la

Alla luce della progressiva digitalizzazione dei processi, in alcuni contesti si suggerisce di preparare un “piano di esecuzione del progetto” e un “piano di esecuzione digitale” dello stesso, che consenta al team di progettazione di definire le modalità di produzione e gestione delle informazioni e dei dati.

A differenza del RIBA, eventuali richiami all’adozione di metodi e strumenti di gestione informativa digitale propri dell’Industria 4.0 sono generalmente rinviati allo step successivo, dedicato al primo livello di progettazione. In base a quanto sopra riportato è necessaria la selezione di un team di progettazione in grado di garantire le conoscenze, le competenze e l’esperienza necessarie al raggiungimento dei risultati attesi. Contestualmente, devono essere anche raccolti tutti i documenti disponibili, inclusi i rilievi dell’area e/o dell’edificio oggetto di intervento.

Se richiesto dalla committenza, il *Project Brief* può anche riportare valutazioni preliminari sull’adozione di specifici sistemi costruttivi che incidano in modo rilevante sugli esiti estetici e architettonici del progetto.

2.2.3. Stage 2 – Concept Design

Il primo livello di progettazione è volto a sviluppare una strategia e una proposta progettuale in grado di garantire il rispetto dei requisiti e delle prestazioni concordate negli step precedenti, rispecchiandone le attese anche in termini di costi d’intervento.

Il confine tra le attività e i risultati attesi di questa fase di progetto e quelli dello step successivo è spesso sottile e dipende dal tipo di progetto in corso di elaborazione e dall’esperienza del gruppo di progettazione incaricato.

L’esito principale atteso da questa fase consiste nella presentazione e approvazione di un progetto architettonico definito nei suoi aspetti essenziali:

realizzazione dell’intervento, le funzioni che dovranno essere svolte, i fabbisogni e le esigenze da soddisfare e, ove pertinenti, i livelli di servizio da conseguire e i requisiti prestazionali di progetto da raggiungere; i requisiti tecnici che l’intervento deve soddisfare in relazione alla legislazione tecnica vigente e al soddisfacimento delle esigenze; i livelli della progettazione da sviluppare e i relativi tempi di svolgimento, in rapporto alla specifica tipologia e alla dimensione dell’intervento; gli elaborati grafici e descrittivi da redigere; le eventuali raccomandazioni per la progettazione; i limiti economici da rispettare; le specifiche tecniche contenute nei criteri ambientali minimi; la individuazione, laddove possibile e/o necessario, di lotti funzionali e/o di lotti prestazionali, articolati in strutture analitiche di progetto; gli indirizzi generali per la progettazione del monitoraggio ambientale, geotecnico e strutturale delle opere, ove ritenuto necessario; le specifiche tecniche per l’utilizzo di materiali, elementi e componenti ai fini: del perseguimento dei requisiti di resistenza, durabilità, robustezza e resilienza delle opere; della efficienza energetica e della sicurezza e funzionalità degli impianti; l’indicazione di massima dei tempi necessari per le varie fasi dell’intervento.

spaziali, dimensionali ed estetici. Un adeguato livello di approfondimento in questa fase è propedeutico a evitare future varianti del progetto, talvolta anche sostanziali, che comporterebbero inevitabili aggravii economici e allungamento dei tempi.

Lo step può includere, inoltre, l'ottenimento dei titoli edilizi necessari per la costruzione dell'edificio, se di nuova realizzazione, o per interventi edili su un fabbricato esistente.

Come indicato dal RIBA, anche in Italia i livelli di progettazione sono due: il primo, comparabile con la fase di *Concept Design*, corrisponde al Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE). Con il recente aggiornamento legislativo nazionale, il PFTE ha di fatto accorpato i precedenti livelli di progettazione denominati "progetto preliminare" e "progetto definitivo", configurandosi come lo sviluppo progettuale della soluzione che, tra le alternative possibili messe a confronto nel DOCFAP (ove redatto), presenti il miglior rapporto tra i costi complessivi da sostenere e i benefici attesi, sia per la collettività sia per la committenza, in relazione alle specifiche esigenze da soddisfare e alle prestazioni da garantire.

Nel rispetto del quadro esigenziale riportato nel documento preliminare alla progettazione, questo livello progettuale è volto anche a individuare tutte le indagini e gli studi necessari per una progettazione accurata dell'opera. Esso definisce le caratteristiche dimensionali, tipologiche, funzionali e tecnologiche dei lavori da realizzare, compresa l'eventuale suddivisione in lotti funzionali; consente, ove necessario, l'avvio della procedura espropriativa; include tutti gli elementi richiesti per il rilascio delle autorizzazioni e approvazioni prescritte; e contiene il piano preliminare di manutenzione dell'opera e delle sue parti.

2.2.4. Stage 3 – Spatial Coordination

La fase *Spatial Coordination*, prevista dal RIBA, può essere intesa come uno step intermedio tra la presentazione del progetto architettonico e l'elaborazione del progetto esecutivo.

In questa fase viene svolta un'attività di coordinamento tra i diversi membri del team di progettazione, volta ad analizzare il progetto architettonico già elaborato, individuando eventuali criticità che potrebbero emergere nelle fasi successive. L'obiettivo è garantire che le soluzioni proposte siano effettivamente perseguibili dal punto di vista tecnico e ingegneristico nello sviluppo del progetto esecutivo, evitando conflitti progettuali e incongruenze.

È fortemente sconsigliato avviare la progettazione esecutiva senza che questo step, o almeno quello precedente, siano stati completati e validati, per

non incorrere in errori e interferenze (ad esempio interazioni inattese tra parti impiantistiche e strutturali). Ciò è particolarmente rilevante in progetti complessi o di grandi dimensioni, che vedono il coinvolgimento di numerosi consulenti e figure specialistiche. In tal senso, è opportuno che entro questo livello vengano recepite tutte le indicazioni provenienti dai consulenti tecnici, nello sviluppo del progetto esecutivo.

In questa fase non vengono ancora definiti nel dettaglio i contenuti tecnologici e costruttivi dell'edificio, motivo per cui si sconsiglia di procedere con eventuali appalti.

Nel contesto italiano non è previsto, dal punto di vista legislativo, uno step intermedio tra i due livelli della progettazione. Tuttavia, l'introduzione di una fase di coordinamento analoga a quella proposta dal RIBA può rivelarsi di grande utilità, in quanto consente di ridurre il rischio di errori progettuali e di problematiche in fase di cantierizzazione.

2.2.5. Stage 4 – Technical Design

La fase definita dal RIBA come *Technical Design* corrisponde al momento in cui il progetto viene sviluppato e ingegnerizzato in ogni suo aspetto tecnico, costruttivo e tecnologico. Essa è pienamente comparabile, nel contesto italiano, con il secondo livello di progettazione, ovvero il “progetto esecutivo”. In tale fase sono definiti, nel rispetto dei requisiti prestazionali e delle esigenze espresse nelle fasi precedenti, i sistemi e gli elementi costruttivi da adottare, nonché i materiali più idonei alla posa in opera, anche in rapporto ad eventuali scelte già concordate con la committenza.

Per tale ragione l'ingegnerizzazione del progetto deve essere elaborata in totale conformità e coerenza con il livello di progettazione precedente, così da definire con precisione la funzione, le caratteristiche, i requisiti e i costi di ogni elemento.

Gli elaborati tecnici prodotti e i relativi documenti complementari (relazioni, computi, capitolati, ecc.) devono contenere tutte le informazioni necessarie per l'appalto e la successiva realizzazione dell'opera in ogni sua parte.

In funzione anche alla complessità del progetto, in questo step possono essere coinvolti, oltre al team di progettazione, consulenti specialisti dotati di competenze specifiche su componenti e sistemi costruttivi forniti da aziende che, eventualmente, parteciperanno alle fasi successive. Tale contributo può risultare particolarmente rilevante quando appaltatori o subappaltatori possiedono conoscenze tecniche più approfondite rispetto al gruppo di progettazione.

Il progetto deve inoltre essere corredato del piano di manutenzione dell'opera per l'intero ciclo di vita, con la definizione dettagliata dei lavori previsti, dei relativi costi e dei tempi di realizzazione.

Contestualmente, qualora vengano adottati metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni, il livello di definizione degli oggetti dovrà essere conforme a quanto specificato nel capitolato informativo a corredo del progetto.

Di regola, questa fase viene elaborata dallo stesso soggetto che ha sviluppato il progetto di fattibilità tecnico-economica (*Concept Design* secondo il RIBA). Nel caso in cui motivate ragioni giustifichino l'affidamento disgiunto, il nuovo progettista deve accettare senza riserve l'attività progettuale svolta in precedenza.

2.2.6. Stage 5 – *Manufacturing and Construction*

La fase di cantierizzazione dell'opera rappresenta uno degli step cruciali dell'intero processo, in quanto è dedicata alla concreta realizzazione dell'edificio sulla base del progetto redatto, autorizzato e appaltato negli step precedenti.

Il raggiungimento della qualità attesa dalla committenza – sotto il profilo estetico, architettonico e prestazionale – dipende in larga misura dalla corretta esecuzione dei lavori. Al contrario, errori esecutivi o difformità rispetto al progetto approvato possono compromettere in modo significativo la conformità dell'opera, generando anche scostamenti prestazionali rispetto agli obiettivi fissati.

In questa fase è fortemente sconsigliato introdurre varianti al progetto in corso d'opera, poiché comportano inevitabilmente modifiche ai tempi e ai costi di realizzazione. Eventuali modifiche al progetto possono essere apportate solo su indicazione specifica da parte del committente e, se sostanziali dal punto di vista architettonico, devono essere preventivamente autorizzate da parte degli enti competenti. Per tale motivo, eventuali proposte di modifica di natura tecnologico-costruttiva avanzate dall'appaltatore e/o dai subappaltatori dovrebbero essere valutate e, se ritenute opportune, approvate entro le fasi precedenti del processo. Accanto al ruolo esecutivo di costruttori e/o artigiani, è di particolare importanza la funzione della Direzione Lavori, chiamata a verificare, in ogni step di avanzamento del cantiere, la piena congruenza con il progetto esecutivo. Tale attività riguarda tanto la conformità dei materiali impiegati quanto la corretta posa in opera e l'assemblaggio degli elementi costruttivi, con particolare attenzione ai dettagli tecnologici più delicati, come quelli relativi all'involucro edilizio.

2.2.7. Stage 6 – Handover

La conclusione dei lavori di cantierizzazione dell'opera coincide con l'emissione del certificato di fine lavori e con la conseguente consegna dell'edificio al committente, portando a compimento anche la fase contrattuale di appalto.

Considerata la crescente complessità di contenuti tecnologici (ad esempio la ventilazione meccanica centralizzata) e/o smart (ad esempio la domotica), integrati nell'edificio, uno degli aspetti centrali di questa fase è rappresentato dalla predisposizione del "Manuale dell'edificio". Nei progetti di minore entità, questo documento può essere sostituito o integrato da attività formative fornite direttamente dai progettisti e/o dai costruttori agli utilizzatori. Lo scopo è trasmettere agli utenti finali le corrette modalità di uso e gestione del fabbricato, in modo da preservarne le prestazioni attese.

Contestualmente, in questa fase vengono eseguite anche le attività di collaudo dell'opera al fine di accertarne la funzionalità e il corretto funzionamento. Tuttavia, anche in presenza di lavori eseguiti correttamente, non è possibile certificare in via definitiva il pieno raggiungimento di tutte le prestazioni attese e stimate in fase di progetto, in particolare quelle di natura energetica, che dipendono in larga misura dal corretto utilizzo del fabbricato da parte degli occupanti. Per questa ragione, si raccomanda di effettuare verifiche successive alla consegna, dopo un periodo prestabilito di utilizzo dell'edificio, così da attestare il reale livello di prestazioni raggiunto. Qualora siano stati installati sistemi di monitoraggio sensoristico, è inoltre possibile raccogliere e analizzare i dati in tempo reale, garantendo una più puntuale valutazione dell'efficienza e delle condizioni d'uso del fabbricato.

2.2.8. Stage 7 – Use

Con la presentazione del certificato di fine lavori e la consegna effettiva del fabbricato al committente/utilizzatore, termina l'operato del team di progettazione e dell'impresa appaltatrice.

L'edificio entra così nella fase operativa di utilizzo destinata a durare fino al termine del suo ciclo di vita, ovvero fino a quando sarà in grado di rispondere in maniera adeguata alle esigenze prestazionali e funzionali dell'utilizzatore.

Qualora tali attese non siano più soddisfatte, e si configuri quindi la chiusura del ciclo di vita, si renderà necessario ripercorrere – seppur adattandoli – gli step sopra descritti, applicati a un edificio esistente attraverso interventi di manutenzione, rinnovamento o, nei casi più radicali, demolizione. Quest'ultima

opzione, sia essa totale o selettiva, assume un ruolo di particolare rilievo qualora nel *Project Brief* siano stati introdotti criteri di sostenibilità fondati sui principi di economia circolare, con attenzione al riuso e/o riciclo di materiali, componenti ed elementi costruttivi.

Tab. 2.1 – Confronto tra RIBA Plan of Work e processo edilizio italiano

Fasi RIBA	Denominazione	Equivalente nel processo edilizio italiano	Documenti chiave	Principali riferimenti normativi/metodologici
Stage 0	<i>Strategic Definition</i>	Fase di programmazione strategica	<i>Business Case</i>	UNI 8289:1981 e UNI 8290 (serie) (definizione processo edilizio) UNI ISO 21500:2021 (Project Management)
Stage 1	<i>Preparation and Briefing</i>	Quadro esigenziale e documenti preliminari	Quadro Esigenziale (QE) Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali (DOCFAP) Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP)	D.Lgs. 36/2023 (Nuovo codice dei contratti pubblici) <i>EU Level(s) framework</i> UNI EN ISO 19650 (serie) (gestione informativa BIM)
Stage 2	<i>Concept Design</i>	Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE)	Elaborati di progetto preliminare Piano preliminare di manutenzione	D.Lgs. 36/2023 UNI 8290 (serie) (classificazione elementi edilizi)
Stage 3	<i>Spatial Coordination</i>	(Non previsto esplicitamente) – fase di coordinamento multidisciplinare	Modelli BIM coordinati <i>Report Clash Detection</i>	UNI 11337-5:2017 (coordinamento modelli BIM) UNI EN ISO 19650- 2:2019
Stage 4	<i>Technical Design</i>	Progetto Esecutivo (PE)	Elaborati esecutivi Capitolato informativo Computi metrici	UNI EN ISO 9001:2015 (qualità progettazione) D.Lgs. 36/2023 UNI EN ISO 19650- 3:2021
Stage 5	<i>Manufacturing and Construction</i>	Fase di realizzazione/cantierizzazione	Piano di cantiere Report SAL (Stato Avanzamento Lavori)	UNI EN ISO 9972:2015 (verifica prestazioni in opera – permeabilità all’aria)

Fasi RIBA	Denominazione	Equivalente nel processo edilizio italiano	Documenti chiave	Principali riferimenti normativi/ metodologici
				CEN/TR 17052:2017 (controllo qualità in cantiere)
Stage 6	Handover	Consegna dell'opera e collaudi	Manuale d'uso e manutenzione Certificato di fine lavori	UNI 11063:2017 (manuale d'uso e manutenzione) UNI EN 15221 (serie) (facility management)
Stage 7	Use	Fase di utilizzo e gestione	Piano di manutenzione POE – Post Occupancy Evaluation	UNI EN ISO 20887:2020 (progettazione per il disassemblaggio) EN 15978:2011 (LCA)

2.3. Gli attori del processo edilizio

Il processo edilizio è, prima di tutto, una catena di responsabilità. Dalla decisione di avviare un intervento fino alla sua messa in esercizio si susseguono fasi tecniche, amministrative e operative che richiedono competenze diverse, coordinamento puntuale e una chiara attribuzione di ruoli.

In questo quadro la qualità dell'opera, intesa come coerenza con il progetto, rispetto di tempi e costi, sicurezza dei cantieri e prestazioni energetiche e ambientali, dipende dall'agire integrato di tutte le figure coinvolte, pubbliche e private.

Storicamente il baricentro è stato rappresentato dal committente e dai progettisti, affiancati in cantiere dalla Direzione Lavori, dall'impresa e dalle maestranze, fino al collaudatore incaricato di verificare la conformità finale. L'evoluzione normativa recente ha rafforzato questa architettura: nelle opere pubbliche il Responsabile Unico del Procedimento (RUP) governa l'intero ciclo contrattuale, mentre in materia di prevenzione e protezione il committente (o il responsabile dei lavori) assicura la continuità tra sicurezza "pensata" in progetto e sicurezza "agita" in esecuzione, attraverso il Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione (CSP) e il Coordinatore della Sicurezza in fase di Esecuzione (CSE). Accanto a loro operano figure operative come l'ispettore di cantiere e il capocantiere, che traducono le scelte progettuali in lavorazioni controllate giorno per giorno.

Alla dimensione tradizionale si è affiancata, recentemente, la transizione digitale. Il BIM ha trasformato elaborati e prassi in un ecosistema di dati condivisi, introducendo ruoli specialistici come il *BIM Specialist*, il *BIM*

Coordinator, il *BIM Manager* e il *CDE Manager*, responsabili di strutturare, verificare e custodire l'informazione tecnica lungo l'intero ciclo di vita.

Il passo successivo è rappresentato dal gemello digitale, che porta il modello *as-built* in esercizio: da qui nasce il *Digital Twin Manager* (DTM), registra dei dati di performance, dell'ottimizzazione energetica e della manutenzione informata.

Questa sezione del capitolo presenta gli attori classici ed emergenti della filiera, mettendone in luce funzioni, responsabilità e interfacce all'interno del processo edilizio. Dal committente al responsabile dei lavori e al RUP, dai progettisti alla Direzione Lavori, dai coordinatori per la sicurezza all'impresa con i suoi referenti di cantiere, fino ai collaudatori e alle nuove figure della gestione informativa, il percorso offrirà una mappa coerente di chi fa che cosa, quando e con quali strumenti, per connettere qualità progettuale, controllo esecutivo e prestazioni misurate dell'opera nel tempo.



Fig. 2.1 – Il cantiere edile e i numerosi attori (Copyright 2023, Markus Reubenstein)

2.3.1. Committente

Il committente è il soggetto, privato o pubblico (stazione appaltante), per conto del quale l'opera viene realizzata.

È l'attore che avvia e indirizza l'intero processo edilizio per soddisfare un bisogno o un'esigenza, attraverso la realizzazione di lavori, servizi o infrastrutture.

La definizione giuridica è contenuta nel Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro (D.Lgs. 81/2008), che lo identifica come «il soggetto per conto del quale l'intera opera viene realizzata», qualunque sia l'eventuale frazionamento dell'intervento. Nelle opere pubbliche il committente coincide con l'ente titolare dei poteri decisionali e di spesa relativi alla gestione dell'appalto.

Dal punto di vista operativo, il committente assume responsabilità legali, finanziarie e organizzative, ed è coinvolto in tutte le fasi cruciali: dalla pianificazione alla scelta dei progettisti e della Direzione Lavori, fino all'affidamento dell'esecuzione all'impresa appaltatrice (e agli eventuali subappaltatori). Egli garantisce che contratti, autorizzazioni e piani siano coerenti con gli obiettivi e i vincoli tecnico-amministrativi dell'intervento.

Sul versante pubblico, queste funzioni sono disciplinate dal nuovo Codice dei contratti pubblici (D.Lgs. 36/2023), che affida al RUP la regia del ciclo di vita dell'intervento; il RUP, come descritto più in dettaglio nella sezione successiva, è nominato dalla stazione appaltante e coordina la programmazione, la progettazione, l'affidamento e l'esecuzione dell'opera, anche avvalendosi di "responsabili di fase".

In materia di salute e sicurezza nei cantieri temporanei o mobili, il D.Lgs. 81/2008 attribuisce al committente obblighi specifici che si estendono già dalla fase di progettazione fino a quella esecutiva. In particolare, in presenza di più imprese (anche non contemporaneamente), egli deve nominare il Coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione contestualmente all'affidamento dell'incarico di progettazione e, prima dell'affidamento dei lavori, il Coordinatore per la sicurezza in fase di esecuzione. I nominativi devono inoltre essere comunicati ad imprese e lavoratori autonomi e riportati nel cartello di cantiere. Il committente può delegare, in tutto o in parte, i propri compiti a un Responsabile dei Lavori (RdL). Nelle pubbliche amministrazioni questa figura coincide di norma con il RUP, previa formale attribuzione dell'incarico e chiara delimitazione dei compiti trasferiti.

Tra gli adempimenti più rilevanti rientrano la verifica dell'idoneità tecnico-professionale delle imprese affidatarie, esecutrici e dei lavoratori autonomi, nonché l'invio della notifica preliminare agli organi competenti (ASL e Ispettorato del Lavoro) nei casi previsti dall'art. 99 del D.Lgs. 81/2008, prima dell'apertura del cantiere e con aggiornamento in caso di variazioni significative.

La legge chiarisce anche il regime delle responsabilità: il committente può essere esonerato dalle responsabilità connesse agli obblighi trasferiti al RdL, ma solo nei limiti dell'incarico effettivamente conferito. Rimane comunque in capo al committente/RdL un dovere di vigilanza sistemica, che implica l'obbligo di intervenire in caso di criticità o inadempimenti.

La giurisprudenza e la prassi dimostrano che non si tratta di oneri meramente formali, ma di un effettivo dovere sostanziale di organizzazione e controllo dell'assetto di sicurezza.

In sintesi, il committente rappresenta il centro di gravità istituzionale e contrattuale dell'intervento. Egli definisce obiettivi e condizioni dell'opera, seleziona i soggetti dell'appalto, assicura la coerenza tra progetto, contratti e autorizzazioni e presidia – direttamente o tramite il RdL – gli adempimenti di sicurezza e prevenzione, mantenendo un ruolo di vigilanza attiva lungo l'intero processo. Nelle opere pubbliche, tali funzioni si integrano con la *governance* delineata dal D.Lgs. 36/2023, che valorizza la figura del RUP come garante unitario del risultato e punto di raccordo tra committente, progettisti ed esecutori.

2.3.2. Responsabile dei lavori

Il Responsabile dei lavori (RdL) è la figura alla quale il committente può trasferire, in tutto o in parte, i propri compiti in materia di tutela della salute e della sicurezza nei cantieri temporanei o mobili. La definizione è contenuta nell'art. 89 del D.Lgs. 81/2008, che lo identifica come il soggetto «incaricato dal committente per svolgere i compiti ad esso attribuiti».

Nelle opere pubbliche il RdL coincide, per previsione normativa, con il Responsabile del Procedimento, oggi evoluto nella figura del Responsabile unico del progetto ai sensi del D.Lgs. 36/2023. In ogni caso, la nomina avviene con atto formale e configura l'alter ego del committente per gli adempimenti di legge in materia di sicurezza, nei limiti stabiliti dall'incarico.

Il nucleo dei doveri del RdL è delineato dall'art. 90 del D.Lgs. 81/2008, che impone già in fase di progettazione il rispetto dei principi e delle misure generali di tutela, nonché la pianificazione della sicurezza nel progetto e nell'organizzazione del cantiere.

Come anticipato nella sezione dedicata al committente, se l'intervento coinvolge più imprese (anche non contemporaneamente), il committente o il RdL deve designare il Coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione al momento dell'affidamento della progettazione e, prima dell'affidamento dei lavori, il Coordinatore per la sicurezza in fase di esecuzione, entrambi in possesso dei requisiti previsti dall'art. 98 del D.Lgs. 81/2008. Tra gli adempimenti ricadono anche la comunicazione dei nominativi dei coordinatori alle imprese e ai lavoratori autonomi e l'indicazione sul cartello di cantiere.

Un compito particolarmente rilevante è la verifica dell'idoneità tecnico-professionale delle imprese affidatarie, esecutrici e dei lavoratori autonomi.

Non si tratta di un controllo meramente documentale, ma di un accertamento sostanziale della capacità organizzativa e tecnico-strumentale dei soggetti incaricati, in funzione delle lavorazioni da eseguire. Questo presidio è una garanzia essenziale contro i rischi derivanti da affidamenti inadeguati.

Tra gli adempimenti ricade anche la notifica preliminare: nei casi previsti dall'art. 99 (ad esempio cantieri con più imprese o cantieri che superano determinate soglie), il Committente o il RdL devono trasmettere la notifica ad ASL e Ispettorato del Lavoro prima dell'avvio dei lavori, affiggerne copia in cantiere e aggiornarla in caso di variazioni. La corretta gestione di questo adempimento, spesso digitalizzata a livello territoriale, completa il quadro di responsabilità informative in capo al committente/RdL.

Sul piano delle responsabilità, l'art. 93 del TU Sicurezza chiarisce che il committente è esonerato dalle responsabilità «limitatamente all'incarico conferito» al RdL. L'effetto liberatorio opera, dunque, entro i confini dell'incarico, senza esonerare il dovere di vigilanza generale sul sistema. La nomina del RdL – come quella dei coordinatori – non è quindi una mera formalità, ma richiede un effettivo esercizio di controllo e impulso decisionale.

Nelle opere pubbliche, la coincidenza tra RdL e RUP rafforza il carattere gestionale della funzione: il RUP, disciplinato dal D.Lgs. 36/2023 e descritto nella sezione successiva, governa l'intero ciclo dell'intervento e, in virtù del raccordo con l'art. 89 del Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro, esercita anche i compiti del RdL in materia di prevenzione, garantendo continuità tra organizzazione contrattuale, pianificazione delle fasi di cantiere e applicazione concreta delle misure di tutela.

In questa prospettiva, l'integrazione tra *governance* del contratto e *governance* della sicurezza si configura come leva decisiva per il raggiungimento degli obiettivi di qualità, rispetto dei tempi e controllo dei costi, nel quadro della normativa vigente.

Il RdL rappresenta dunque la cerniera organizzativa che consente al committente di impostare, pianificare e verificare la sicurezza del cantiere in maniera sostanziale e non meramente formale: dalla nomina dei coordinatori alla verifica dell'idoneità delle imprese, dalla gestione della notifica preliminare alla vigilanza sull'attuazione effettiva delle misure di prevenzione.

2.3.3. Responsabile unico del progetto

Il Responsabile unico del progetto (RUP), introdotto dal D.Lgs. 36/2023 in sostituzione del “responsabile del procedimento”, è la figura cardine dell'intervento pubblico, chiamata a presidiare l'intero ciclo di vita dell'opera: dalla programmazione alla progettazione, dall'affidamento all'esecuzione, fino alla consegna.

La nomina del RUP avviene con l'atto di avvio dell'intervento. La stazione appaltante o l'ente concedente lo individua tra i propri dipendenti, anche a tempo determinato, purché in possesso dei requisiti professionali richiesti. Nei casi di particolare complessità, il RUP può essere affiancato da "responsabili di fase", incaricati di gestire specifici segmenti del ciclo, come la progettazione o l'esecuzione.

L'art. 15 del Codice dei contratti pubblici e l'Allegato I.2 disciplinano requisiti, modalità di individuazione e compiti del RUP. In particolare, le sue responsabilità si articolano su due versanti: da un lato il coordinamento unitario del processo, con l'obbligo di garantire tempi, costi, qualità e manutenzione programmata; dall'altro la cura della regolarità tecnico-amministrativa, dalla definizione della domanda pubblica al controllo dell'esecuzione.

L'Allegato I.2 specifica che il RUP coordina il processo «anche avvalendosi dei responsabili di fase», e attribuisce compiti quali la verifica dei presupposti per l'affidamento, la predisposizione e validazione degli atti di gara, la gestione dei rapporti con gli operatori economici e la vigilanza sull'esecuzione contrattuale.

In termini operativi, il RUP partecipa alla definizione di esigenze e requisiti dell'appalto, redige (o supervisiona la redazione) del documento di indirizzo alla progettazione, cura avvisi e capitolati, sovrintende alla valutazione delle offerte e verifica la conformità delle stesse.

Nella fase esecutiva controlla l'andamento del contratto, coordina la Direzione Lavori/Direzione dell'esecuzione e vigila sulla coerenza dell'opera con autorizzazioni e titoli abilitativi. Tra i compiti specifici ricadono anche adempimenti puntuali di tracciabilità del procedimento, nonché gli obblighi di pubblicazione e trasparenza previsti dalla disciplina anticorruzione.

Sul versante della sicurezza, il RUP non si sostituisce ai soggetti titolari di obblighi prevenzionistici (datori di lavoro, coordinatori per la sicurezza), ma esercita una vigilanza di sistema: in raccordo con il Direttore dei lavori/Direttore dell'esecuzione e con il Coordinatore della sicurezza in fase di esecuzione, deve garantire che l'assetto contrattuale e organizzativo del cantiere consenta l'applicazione effettiva delle misure di tutela previste dal D.Lgs. 81/2008 e dai piani di sicurezza (PSC e POS), intervenendo con strumenti contrattuali ove necessario.

Questo approccio è ribadito nei materiali istituzionali ANAC (Autorità Nazionale Anticorruzione) di accompagnamento al nuovo Codice e nelle ricognizioni operative pubblicate dopo l'entrata in vigore del D.Lgs. 36/2023.

Per appalti molto complessi, il RUP può avvalersi di strutture di supporto o di consulenze specialistiche. Ciò non lo esonera tuttavia dalle responsabilità di indirizzo e regia, che restano unitarie, mentre attività tecniche o amministrative possono essere delegate a responsabili di fase o uffici dedicati.

Elemento qualificante del nuovo regime è la tracciabilità digitale del procedimento: il RUP è garante della formazione, conservazione e pubblicità dei dati contrattuali, in linea con i principi di trasparenza e digitalizzazione. In sintesi, il RUP si configura come il *project owner* pubblico: assicura legalità, trasparenza e performance, governa tempi, costi e qualità, coordina attori e procedure e presidia il flusso informativo-digitale che accompagna l'opera dalla fase di programmazione alla realizzazione.

2.3.4. Progettista

Il progettista è il professionista incaricato di tradurre un'idea in un progetto costruibile, nel rispetto delle esigenze, del budget e dei tempi di esecuzione definiti dal committente. Deve essere iscritto a un albo professionale ed essere dotato di competenze tecniche specifiche in relazione alla progettazione affidata.

Assumendo l'incarico dal committente, il progettista diviene il tecnico responsabile dell'opera, con l'obbligo di garantire la conformità del progetto alle normative urbanistiche e edilizie, igienico-sanitarie e a tutte le disposizioni di legge che regolano la successiva fase autorizzativa e di cantierizzazione.

Nell'iter progettuale, in funzione della complessità dell'intervento, possono essere coinvolti più progettisti con competenze complementari, generalmente suddivisi nei tre ambiti principali: architettonico, strutturale e termotecnico. Il progettista architettonico, quello strutturale e quello termotecnico costituiscono così un nucleo di competenze integrate che, pur operando con ruoli distinti, devono lavorare in stretta sinergia per assicurare che l'opera soddisfi i requisiti del committente e sia conforme alle normative vigenti.

Il progettista architettonico è il regista del processo: definisce impostazione spaziale, distributiva ed estetica, coordina le altre discipline e garantisce coerenza complessiva al progetto. È responsabile dell'armonia con il contesto, della funzionalità dell'opera rispetto agli usi previsti e della rispondenza alle norme di settore.

Il progettista strutturale collabora con l'architettonico traducendo le scelte spaziali e distributive in un sistema resistente sicuro ed efficiente. Ha il compito di dimensionare e verificare gli elementi portanti dell'edificio secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni, assicurandone stabilità, durabilità e capacità di resistere a carichi statici e dinamici, indipendentemente dai materiali impiegati.

Il progettista termotecnico, a sua volta, integra le soluzioni architettoniche e strutturali con impianti efficienti e sostenibili. È responsabile della progettazione e del dimensionamento degli impianti di riscaldamento, raffrescamento,

ventilazione e produzione di acqua calda sanitaria, contribuendo al comfort termoigrometrico, alla qualità dell'aria interna e alle prestazioni energetiche dell'edificio. Il suo ruolo è cruciale nella definizione di involucri ad alte prestazioni e nell'integrazione di fonti rinnovabili.

Queste tre figure, pur con ambiti propri di autonomia e responsabilità, operano come un sistema integrato nel processo edilizio, condividendo dati, elaborati e modelli informativi. Ciò è particolarmente chiaro nei contesti in cui si adotta la metodologia BIM, che consente un'interoperabilità strutturata.

La loro collaborazione è condizione essenziale per trasformare un'idea in un'opera costruita che sia esteticamente valida, strutturalmente sicura, energeticamente efficiente e durevole, rispettando tempi e costi previsti.

Per ciascun ambito è individuato un progettista responsabile, chiamato a lavorare in sinergia con gli altri e nel rispetto degli obblighi contrattuali. In base ai titoli e alle iscrizioni professionali possedute, un singolo progettista può ricoprire più ruoli fra quelli sopra descritti.

In relazione alla tipologia di intervento e agli obblighi contrattuali, i progettisti sono tenuti a sviluppare i due livelli progettuali già descritti nella sezione precedente: il progetto di fattibilità tecnico-economica e il progetto esecutivo⁷.

Le principali responsabilità dei progettisti comprendono:

- lo sviluppo del progetto in coerenza con i requisiti funzionali, estetici e tecnici definiti dal committente;
- la verifica della conformità agli strumenti urbanistici adottati e approvati, ai regolamenti edilizi vigenti e alle normative di settore (antisismiche, di sicurezza, antincendio, igienico-sanitarie, di efficienza energetica);
- il coordinamento con altri professionisti e consulenti, al fine di garantire l'integrazione di tutte le discipline coinvolte;
- la redazione e la presentazione della documentazione necessaria per l'ottenimento di autorizzazioni amministrative e titoli edilizi;
- la redazione e predisposizione degli atti necessari per l'appalto e la cantierizzazione;
- il controllo della fase esecutiva per garantire la conformità dell'opera al progetto approvato⁸.

Nella parte successiva verranno analizzate in modo più specifico le responsabilità proprie delle tre figure principali di progettisti.

⁷ Talvolta, figure tecniche come lo strutturista o il termotecnico possono non essere coinvolte qualora l'intervento non interessi strutture portanti e/o impianti.

⁸ Questo adempimento è connesso anche al ruolo attribuito al progettista, o ad altra figura tecnica, di direzione dei lavori o direzione artistica.

2.3.4.1. Progettista architettonico

Il progettista architettonico è il professionista che traduce le esigenze, i bisogni e le aspirazioni del committente in un progetto coerente, funzionale e realizzabile, capace di coniugare qualità estetica, efficienza tecnica e conformità normativa.

Generalmente si tratta di un architetto o di un ingegnere edile-architetto iscritto al relativo albo professionale, in possesso di competenze che spaziano dalla composizione architettonica alla conoscenza delle tecnologie costruttive, dalla normativa urbanistico-edilizia alle strategie di sostenibilità ambientale.



Fig. 2.2 – Elaborazione del progetto (Copyright 2017, Daniel McCullough)

La sua responsabilità prende avvio già dalle prime fasi del processo edilizio, quando, a partire dal quadro esigenziale definito dal committente, sviluppa l'idea progettuale individuando soluzioni distributive, volumetriche e spaziali in armonia con il contesto urbano, paesaggistico e ambientale.

In questa fase il progettista architettonico deve considerare non solo esigenze funzionali e disponibilità economiche, ma anche vincoli e prescrizioni derivanti dalla pianificazione urbanistica, dalle norme edilizie e igienico-sanitarie, dalle disposizioni in materia di sicurezza (come quelle previste dal D.Lgs. 81/2008), di accessibilità (D.M. 236/1989) e di efficienza energetica (D.Lgs. 192/2005 e s.m.i.), senza trascurare eventuali obblighi legati alla tutela del patrimonio storico e culturale.

Il suo lavoro si sviluppa in costante coordinamento con altre figure specialistiche – progettista strutturale, termotecnico, impiantista, paesaggista –

per garantire l'integrazione disciplinare in un progetto unitario e coerente. A tale figura spetta la predisposizione degli elaborati grafici, delle relazioni tecniche e della documentazione necessaria per l'ottenimento dei titoli edilizi, compresa l'interlocuzione con gli enti preposti alle autorizzazioni.

Nel corso dell'iter progettuale, il progettista architettonico definisce materiali, tecnologie e finiture, calibrandoli in funzione delle prestazioni richieste, della durabilità e della compatibilità con il budget. La sua attività prosegue anche nelle fasi successive, supportando la stazione appaltante o il committente privato durante la gara e l'affidamento dei lavori, chiarendo gli aspetti tecnici della documentazione di progetto e collaborando con la Direzione Lavori per verificare che l'opera realizzata corrisponda fedelmente a quanto approvato.

Nell'attuale contesto, il ruolo del progettista architettonico è sempre più influenzato dall'adozione di strumenti digitali come il BIM, normato dalla serie UNI 11337, che consente di integrare informazioni tecniche, gestionali e prestazionali in un modello tridimensionale condiviso con tutti gli attori del processo. Ciò consolida la sua funzione di coordinamento e controllo qualitativo, rendendolo una figura centrale non solo nella concezione e realizzazione dell'opera, ma anche nella sua gestione lungo l'intero ciclo di vita.

2.3.4.2. Progettista strutturale

Il progettista strutturale è il professionista incaricato di concepire e dimensionare le parti portanti di un edificio o di una infrastruttura, garantendone la stabilità, la sicurezza e la durabilità nel tempo, in coerenza con il progetto architettonico e con le esigenze funzionali definite dal committente.

La sua responsabilità si estende all'analisi e alla progettazione di tutti gli elementi che concorrono alla resistenza e alla stabilità dell'opera, assicurando la capacità di sopportare carichi statici e dinamici quali vento, neve, sisma, azioni termiche, affollamento di persone, arredi e impianti.

Per adempiere a tali compiti, il progettista strutturale utilizza metodi di calcolo ingegneristico supportati da software di modellazione e simulazione avanzata, anche in ambiente BIM, che consentono di prevedere il comportamento dell'opera in diverse condizioni di esercizio e di sollecitazione. Attraverso modelli analitici e numerici, è in grado di ottimizzare il dimensionamento di fondazioni, travi, pilastri, solai, murature portanti, strutture di copertura e relative connessioni, tenendo conto sia delle prestazioni meccaniche dei materiali, sia della fattibilità costruttiva e della manutenzione nel tempo.

La scelta dei materiali strutturali – dal cemento armato all'acciaio, dal legno alle tecnologie miste e innovative – avviene in stretta collaborazione con il progettista architettonico e, se necessario, con il termotecnico, al fine di garantire la coerenza complessiva dell'opera. Questa decisione tiene conto di fattori come la resistenza meccanica, il comportamento al fuoco, la durabilità, la reperibilità dei materiali, i tempi di posa e l'impatto ambientale.

Dal punto di vista normativo, il progettista strutturale deve attenersi scrupolosamente alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, D.M. 17/01/2018) e alla relativa Circolare applicativa del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che costituiscono il principale riferimento nazionale per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere strutturali in Italia.

Oltre alla progettazione, il progettista strutturale ha un ruolo attivo nella fase esecutiva, fornendo assistenza tecnica in cantiere per la corretta interpretazione degli elaborati e per la risoluzione di eventuali problematiche che emergono durante la costruzione. È spesso coinvolto nella verifica e validazione delle forniture di materiali e componenti strutturali, nella supervisione delle prove di carico e nella redazione della documentazione per il collaudo statico.

In un contesto sempre più orientato alla sostenibilità e alla digitalizzazione, il progettista strutturale è chiamato a integrare anche la valutazione dell'impatto ambientale delle scelte progettuali e ad adottare metodologie di progettazione collaborativa digitale, come il BIM, strumento che facilita il coordinamento con le altre discipline e aumenta l'efficienza del processo costruttivo.

2.3.4.3. Progettista termotecnico

Il progettista termotecnico ha acquisito, soprattutto negli ultimi anni, un ruolo di crescente importanza nel processo edilizio, in virtù dell'evoluzione normativa e tecnica legata alla valutazione e al monitoraggio delle prestazioni energetiche degli edifici, nonché alla crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale e la riduzione delle emissioni climalteranti.

A questa figura spetta la progettazione e la scelta dei sistemi più idonei per il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione e il condizionamento dell'aria, assicurandone la piena integrazione con le soluzioni architettoniche e strutturali. Tali impianti devono garantire non solo il comfort termoigrometrico, ma anche efficienza, affidabilità e ridotto impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita.

Il termotecnico è responsabile del calcolo dei carichi termici invernali ed estivi dell'edificio, operazione fondamentale per determinare le potenze

necessarie a garantire un adeguato comfort termoigrometrico agli occupanti, considerando le condizioni climatiche locali, l'orientamento e l'uso previsto degli spazi.

Il suo contributo non si limita alla progettazione degli impianti, ma si estende alla definizione delle scelte tecnologiche costruttive e delle stratigrafie dell'involucro edilizio, in accordo con il progettista architettonico, per massimizzare l'efficienza energetica complessiva. Ciò include anche la progettazione e l'integrazione di fonti energetiche rinnovabili, come impianti solari termici, fotovoltaici, geotermici o a biomassa, oltre alla pianificazione di sistemi di recupero del calore, ventilazione meccanica controllata e gestione intelligente dell'energia mediante sistemi domotici.

Il progettista termotecnico è inoltre coinvolto nella progettazione degli impianti idrico-sanitari, assicurando l'ottimizzazione dei consumi idrici e la sicurezza igienico-sanitaria dell'acqua, nel rispetto delle norme vigenti. Tutta la sua attività è regolata da riferimenti normativi nazionali ed europei, tra cui il D.Lgs. 192/2005 e s.m.i., il D.M. 26 giugno 2015 ("Requisiti minimi" e "Linee guida per la certificazione energetica degli edifici") e le direttive europee in materia di prestazioni energetiche degli edifici (EPBD), recepite in Italia.

All'interno della più ampia cornice della transizione digitale, il termotecnico può operare anche in ambiente BIM, sviluppando modelli impiantistici tridimensionali integrati con le altre discipline, al fine di migliorare il coordinamento progettuale, ridurre le interferenze in cantiere e ottimizzare i costi di esercizio e manutenzione dell'edificio. In questo modo contribuisce a un processo edilizio più trasparente, controllabile e orientato alla qualità complessiva.

2.3.5. Coordinatori della sicurezza

Nel processo edilizio, la gestione della sicurezza nei cantieri assume un ruolo centrale, sia per la tutela dei lavoratori sia per la conformità normativa delle attività.

Il D.Lgs. 81/2008 prevede, in presenza di determinati requisiti di cantiere, come la compresenza di più imprese esecutrici anche non contemporanea, la nomina di due figure specializzate:

- il Coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione (CSP);
- il Coordinatore per la sicurezza in fase di esecuzione (CSE).

Pur distinti nei tempi e nelle funzioni, entrambi perseguono lo stesso obiettivo: prevenire i rischi derivanti dalle attività di cantiere e garantire che le opere siano realizzate in condizioni sicure e conformi alla legge.

La corretta sinergia tra CSP e CSE assicura continuità nella gestione della sicurezza lungo l'intero ciclo di vita dell'opera, riducendo in modo significativo la probabilità di infortuni e incidenti. In una prospettiva attuale, queste figure possono avvalersi di strumenti digitali, come piattaforme di gestione del cantiere e modelli BIM arricchiti con informazioni di sicurezza (BIM 4D e 6D), per pianificare e monitorare con maggiore efficacia le misure di prevenzione.

Il CSP opera nella fase di progettazione ed è nominato dal committente o dal responsabile dei lavori contestualmente all'affidamento dell'incarico di progettazione. La sua funzione è integrare la sicurezza nel progetto fin dall'origine, anticipando la valutazione dei rischi e pianificando, già in fase ideativa, le misure di prevenzione e protezione. In concreto, redige il Piano di Sicurezza e Coordinamento (PSC), documento obbligatorio che contiene analisi dei rischi, misure di prevenzione, procedure operative e indicazione analitica dei costi della sicurezza; predispone inoltre il fascicolo con le caratteristiche dell'opera, destinato a raccogliere le informazioni utili per gli interventi futuri di manutenzione o modifica. Il suo lavoro si sviluppa in stretto raccordo con le diverse discipline tecniche (architettonica, strutturale, impiantistica) con l'obiettivo di eliminare o ridurre i rischi alla fonte mediante soluzioni tecniche e organizzative. Comprende anche la verifica della coerenza tra il progetto esecutivo e le prescrizioni di sicurezza, con segnalazione al committente di eventuali criticità.

Il CSE interviene invece durante la fase di realizzazione dell'opera e, se confermato dal committente, può coincidere con il professionista che ha già ricoperto il ruolo di CSP. In cantiere è il garante operativo della sicurezza: verifica l'effettiva applicazione delle misure previste nel PSC, controlla l'idoneità dei Piani Operativi di Sicurezza (POS) delle imprese esecutrici e la loro coerenza con il piano di coordinamento, e coordina le attività delle imprese per evitare interferenze pericolose tra lavorazioni, assicurando una corretta sequenza delle fasi operative. La sua vigilanza si esplica attraverso sopralluoghi periodici e riunioni di coordinamento, durante le quali accerta il rispetto delle misure di prevenzione; in caso di modifiche sostanziali nell'organizzazione del cantiere o nell'andamento dei lavori, aggiorna il PSC. In presenza di inosservanze, informa il committente o il responsabile dei lavori e, nei casi più gravi, dispone la sospensione delle lavorazioni a rischio fino al ripristino di adeguate condizioni di sicurezza. Pur esercitando un controllo di coordinamento e una vigilanza attiva, il CSE non si sostituisce ai datori di lavoro e ai preposti delle imprese nella loro responsabilità diretta in materia di sicurezza, ma ha precisi obblighi di segnalazione e intervento per garantire l'efficacia del sistema di prevenzione in cantiere.

2.3.6. *Direttore dei lavori*

Il Direttore dei Lavori (DL) è una figura centrale nel processo edilizio, incaricata dal committente (o, nel caso di opere pubbliche, nominata dal Responsabile unico del progetto) per sorvegliare, controllare e coordinare l'esecuzione dell'opera, garantendo il rispetto del progetto approvato, delle prescrizioni contrattuali, delle normative vigenti e delle regole dell'arte.



Fig. 2.3 – La Direzione Lavori nella fase di esecuzione (Copyright 2024, Harold Jonker)

Il suo ruolo si colloca nella fase esecutiva, ma può iniziare già in fase preliminare con la verifica della cantierabilità del progetto e la partecipazione alle riunioni di coordinamento tra le figure coinvolte. La sua attività si estende fino alla consegna dell'opera ultimata e, in alcuni casi, include anche verifiche post-realizzazione. Nel processo edilizio, il DL rappresenta l'interesse del committente, agendo come garante tecnico-operativo dell'appalto.

Nelle opere pubbliche è formalmente designato dalla stazione appaltante e può essere scelto tra tecnici interni o esterni qualificati, anche con il supporto di Direttori Operativi e Ispettori di cantiere.

Ai sensi del D.Lgs. 36/2023, le sue responsabilità coprono l'intero spettro del controllo tecnico e contabile dell'opera: verifica la conformità delle lavorazioni al progetto, al contratto e alle specifiche – comprese norme antisismiche, antincendio, impiantistiche e di sicurezza – e collabora con il Coordinatore per l'esecuzione dei lavori affinché le prescrizioni del D.Lgs. 81/2008 trovino effettiva applicazione.

Compiti essenziali sono l'accertamento della qualità dei materiali, la verifica delle relative certificazioni, il controllo del cronoprogramma con segnalazione degli scostamenti e l'attivazione di misure correttive. Quando necessario, propone e autorizza varianti tecniche motivate; gestisce gli aspetti economici e contabili del cantiere redigendo stati di avanzamento, libretti delle misure e registro di contabilità; cura la liquidazione dei pagamenti; supervisiona prove e collaudi, nonché verifiche funzionali e di conformità, e assicura la corretta tenuta della documentazione di cantiere.

Operativamente, l'azione del DL inizia con la consegna formale dei lavori all'impresa, che egli presiede redigendo l'apposito verbale. Da quel momento esercita una sorveglianza sistematica mediante sopralluoghi periodici (o quotidiani, se necessario) per verificare lo stato di avanzamento e la qualità delle lavorazioni; impartisce all'appaltatore indicazioni operative mediante ordini di servizio scritti, che assumono valore vincolante; controlla con particolare attenzione le cosiddette opere "nascoste", documentandole prima che non siano più ispezionabili, come nel caso di armature e tubazioni interrato; certifica le quantità e le lavorazioni eseguite approvando gli stati di avanzamento lavori; dispone, qualora se ne presenti la necessità, sospensioni temporanee delle attività e ne autorizza la successiva ripresa; infine, vigila sulla costante coerenza dell'opera con i titoli abilitativi e con tutte le prescrizioni urbanistiche e normative rilasciate dagli enti competenti.

Con l'adozione del BIM e delle piattaforme digitali di gestione del cantiere, il DL svolge anche una supervisione "digitale": verifica la corrispondenza tra modello informativo e realizzazione fisica, utilizza sistemi di monitoraggio in tempo reale per migliorare tracciabilità e trasparenza e contribuisce all'aggiornamento del modello lungo l'esecuzione.

Sul piano delle responsabilità, la giurisprudenza chiarisce che la funzione del DL non è meramente formale: egli ha un obbligo di vigilanza attiva e può essere chiamato a rispondere, in sede civile o penale, per omissioni o negligenze che abbiano determinato danni al committente o a terzi, o per violazioni della normativa quando la sua condotta sia risultata causalmente rilevante rispetto all'evento lesivo.

2.3.7. Ispettore di cantiere

L'ispettore di cantiere è una figura tecnica che opera a supporto del Direttore dei lavori (DL), garantendo una vigilanza costante e puntuale sull'andamento delle lavorazioni direttamente in sito.

La sua presenza risulta particolarmente rilevante nei cantieri di maggiore dimensione o complessità, dove il controllo quotidiano delle attività e delle

interfasi tra lavorazioni riduce il rischio di errori, difformità e condizioni di pericolo, integrando in chiave operativa il ruolo prevalentemente di coordinamento del DL.

Pur non essendo obbligatoria in ogni appalto, la normativa vigente in materia di contratti pubblici riconosce espressamente l'ispettore come componente dell'Ufficio di Direzione Lavori, insieme ai direttori operativi. L'art. 114 del D.Lgs. 36/2023 rinvia all'Allegato II.14, che ne definisce attività e compiti nella fase esecutiva.

La cornice regolatoria qualifica l'ispettore come l'assistente che collabora con il DL nella sorveglianza delle lavorazioni, in conformità alle prescrizioni del capitolato speciale d'appalto, con presenza a tempo pieno nei periodi che richiedono un controllo quotidiano e, ove necessario, anche durante le fasi di collaudo e di eventuali manutenzioni.

È altresì stabilito che la posizione di ispettore è ricoperta da una sola persona per turno di lavoro, a sottolineare la responsabilità personale nell'osservazione e nella tracciabilità delle verifiche effettuate.

Nella prassi di cantiere, l'ispettore assicura che le lavorazioni procedano in conformità agli elaborati esecutivi, alle specifiche tecniche, ai capitolati e alle norme vigenti; controlla i materiali in ingresso, verificandone la rispondenza al progetto e alle certificazioni; verifica le opere provvisorie – quali ponteggi, puntellature e recinzioni – garantendone adeguatezza ai fini della sicurezza e della funzionalità. Cura la registrazione giornaliera delle attività (rapportini, libretti di cantiere, documentazione fotografica), indicando le lavorazioni eseguite, le maestranze e i mezzi impiegati, le condizioni meteorologiche e gli eventuali imprevisti. Segnala tempestivamente al DL le non conformità o i vizi esecutivi che richiedano integrazioni progettuali o correttivi e supporta la contabilità fornendo dati ed evidenze per gli Stati di Avanzamento Lavori (SAL).

In questo quadro, le Linee guida ANAC sulla direzione dei lavori precisano che è il DL a individuare le attività da delegare ai direttori operativi e agli ispettori, definendone il programma e coordinandone l'azione. Si conferma così il rapporto funzionale di stretta dipendenza e la natura "esecutiva" dei compiti dell'ispettore.

L'ispettore opera, dunque, sotto la direzione e il coordinamento del DL, al quale riferisce con regolarità attraverso rapporti scritti e verbali. Non dispone dell'autonomia decisionale propria del DL, ma ha un margine operativo sufficiente per richiedere immediati adeguamenti in presenza di situazioni di pericolo o di evidenti difformità, in coerenza con gli strumenti contrattuali e con le prescrizioni dell'Ufficio di Direzione Lavori delineate dal nuovo Codice. La definizione puntuale di limiti, funzioni e modalità di rendicontazione è stabilita, di norma, nell'atto di incarico e negli atti contrattuali di Direzione Lavori.



Fig. 2.4 – Tecniche digitali per il controllo in cantiere (Copyright 2023, NAIS)



Fig. 2.5 – Tecniche tradizionali per il controllo in cantiere (Copyright 2021, Beth Macdonald)

Dal punto di vista giuridico, l'ispettore di cantiere risponde della diligenza tecnica con cui svolge i compiti affidati, senza sostituirsi al DL nella responsabilità complessiva dell'opera. Eventuali omissioni gravi, ad esempio la mancata segnalazione di difformità conosciute o di condizioni di rischio evidenti, possono tuttavia configurare responsabilità in capo al soggetto incaricato, ferma restando la titolarità delle funzioni di direzione in capo al DL.

Infine, nella prospettiva digitale promossa dal nuovo Codice, l'ispettore può essere dotato di strumenti software per la documentazione in tempo reale di avanzamenti e criticità, l'archiviazione delle evidenze e la condivisione strutturata delle informazioni con il DL e con la stazione appaltante. Questo approccio rafforza trasparenza, tracciabilità e qualità del processo esecutivo, in coerenza con la logica di *governance* e presidio della performance posta dal legislatore al centro della fase di esecuzione contrattuale.

2.3.8. Imprese, artigiani e fornitori

Nel cantiere contemporaneo l'impresa affidataria agisce come soggetto di regia operativa: stipula il contratto con il committente, organizza la filiera dei subappalti e rimane responsabile del coordinamento delle lavorazioni e del controllo sull'applicazione del Piano di sicurezza e coordinamento, nonché della coerenza dei Piani operativi di sicurezza delle imprese esecutrici.

Questa posizione, definita dal D.Lgs. 81/2008, impone un presidio quotidiano sulla conformità dei processi e sulla qualificazione tecnico-professionale della catena esecutiva, con effetti diretti sulla qualità dell'esecuzione e sulla riduzione del rischio di difformità in grado di compromettere le prestazioni attese dell'edificio.

Le imprese esecutrici, dal canto loro, traducono il progetto in opera costruita con proprie maestranze e mezzi, redigono il POS e governano apprestamenti, attrezzature e modalità esecutive secondo l'art. 96 del D.Lgs. 81/2008).

La distinzione di ruoli (affidataria/esecutrice) non è meramente formale: definisce chi coordina, chi realizza e chi risponde di eventuali scostamenti, consentendo al DL di individuare prontamente le cause di non conformità che incidono su estetica, funzionalità e performance del sistema edificio-impianto.

Sul fronte qualità, molte stazioni appaltanti e operatori privati richiedono o valorizzano sistemi di gestione conformi alla UNI EN ISO 9001:2015, i quali garantiscono processi documentati (dalla gestione dei fornitori al controllo delle non conformità e delle azioni correttive) e tracciabilità delle decisioni tecniche.

In edilizia, un *Quality Management System*⁹ ben applicato si traduce in riesami sistematici dei disegni esecutivi, gestione strutturata dei *submittals*¹⁰, piani di ispezione e prova per le lavorazioni critiche e *lesson learned* utili a chiudere il cerchio *Plan-Do-Check-Act* (Pianificare-Fare-Verificare-Agire) tra cantiere e impresa. È una leva organizzativa che riduce rilavorazioni e varianti, sostenendo la conformità architettonica e tecnologica del costruito. Il contributo dei fornitori è decisivo già in fase di approvvigionamento: i prodotti da costruzione devono essere conformi al quadro europeo, secondo il Regolamento (UE) 2024/3110 sui prodotti da costruzione che ha aggiornato e sostituito il CPR 305/2011, fornendo un linguaggio tecnico comune per la dichiarazione delle prestazioni.

Per componenti come i serramenti, la norma armonizzata UNI EN 14351-1:2006+A2:2016 chiarisce caratteristiche essenziali (trasmissione, tenuta all'aria/acqua/vento, acustica) e relativa marcatura: scegliere e controllare in accettazione prodotti corretti non è un adempimento secondario, ma il primo mattone per raggiungere gli obiettivi di progetto, sia estetici sia prestazionali, con particolare riferimento all'involucro e al comfort ambientale.

In pratica, l'impresa deve pretendere Dichiarazioni di Prestazione (DoP)¹¹ e marcatura CE coerenti con le specifiche, e il DL deve verificarle in ingresso. La qualità energetica e ambientale passa anche dalla filiera degli acquisti *green*. Nei lavori pubblici (e sempre più spesso nei privati) valgono i Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'edilizia (DM 23 giugno 2022), che orientano verso materiali a minore impatto, contenuti di riciclato, progettazione

⁹ In edilizia, il *Quality Management System* (QMS) è inteso come un sistema organizzato di procedure, responsabilità e controlli che assicura il rispetto di: requisiti contrattuali (tempi, costi, qualità dell'opera); norme tecniche (UNI, EN, ISO); obblighi di legge (sicurezza, ambiente, appalti). L'approccio prevalente deriva da UNI EN ISO 9001:2015, adattata al ciclo di vita dell'opera e integrata da standard settoriali (serie UNI 10721, UNI ISO 10006:2018) e da requisiti di legge. L'adozione di un QMS mira a prevenire errori in fase di progetto e di cantierizzazione, riducendo rilavorazioni, assicurando gli obiettivi di progetto attesi e, soprattutto, evitando scostamenti prestazionali dell'edificio in fase di esercizio.

¹⁰ I *submittals* sono documenti, campioni o altri elementi che un'impresa appaltatrice (o subappaltatrice) fornisce al committente, al direttore dei lavori o al progettista per ottenere l'approvazione prima di procedere con l'esecuzione di una specifica attività o con l'installazione di materiali. In sostanza, rappresentano una verifica preventiva finalizzata ad assicurare che i materiali, i prodotti o le lavorazioni previste siano conformi ai progetti e alle specifiche contrattuali.

¹¹ La Dichiarazione di Prestazione (*Declaration of Performance – DoP*) è un documento obbligatorio che accompagna la marcatura CE dei prodotti da costruzione. Tale dichiarazione attesta le prestazioni di un materiale o prodotto da costruzione in relazione alle sue caratteristiche essenziali e ne garantisce la conformità ai requisiti della Direttiva Prodotti da Costruzione, nota anche come Regolamento Prodotti da Costruzione (CPR), che, in quanto norma europea, stabilisce i requisiti essenziali per i materiali e i prodotti destinati a essere installati permanentemente in opere edilizie. In pratica, la DoP è una "carta d'identità" del prodotto che fornisce informazioni dettagliate agli utilizzatori e alle autorità di controllo.

per disassemblaggio, uso efficiente delle risorse e, quando richiesto, *Environmental Product Declarations*¹² (EPD) conformi alla UNI EN 15804:2012+A2:2019.

In questo ambito, fornitori e imprese entrano nel merito delle prestazioni del ciclo di vita (LCA) dei prodotti da costruzione, offrendo EPD verificate da schemi riconosciuti, mentre il DL controlla la documentazione a supporto dei CAM. È un passaggio chiave per ridurre l'impronta ambientale dell'opera e allinearsi alle richieste europee di trasparenza sugli impatti.

Le prestazioni energetiche in esercizio non dipendono solo dai calcoli di progetto: contano le scelte di cantiere e la messa in opera. L'impresa esecutrice incide direttamente sulla continuità dell'isolamento, sulla posa dei serramenti (ponti termici, nastri e sigillature), sulla tenuta all'aria e sul corretto bilanciamento degli impianti. Prove in opera come il *blower door test*¹³ secondo UNI EN ISO 9972:2015 e le verifiche funzionali sugli impianti documentano la rispondenza dell'opera costruita alle attese e consentono di individuare tempestivamente le cause di gap prestazionale, spesso riconducibili a dettagli esecutivi. Integrare nel capitolato prove e collaudi prestazionali, con criteri di accettazione e rimedi, è una scelta che tutela il risultato e riduce il divario tra "simulato" e "misurato". Questo approccio è perfettamente coerente con la Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 aprile 2024, sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione) (EPBD rifusa 2024/1275), che orienta verso edifici a emissioni quasi nulle (nZEB) di nuova costruzione e verso la riqualificazione profonda del patrimonio esistente, rafforza gli Attestati di Prestazione Energetica (APE) e introduce strumenti come il *Renovation Passport*¹⁴ collegato, dove disponibile, al *Digital Building Logbook*¹⁵.

¹² La *Environmental Product Declaration* (EPD), o Dichiarazione Ambientale di Prodotto, è un documento che fornisce informazioni trasparenti e verificabili sull'impatto ambientale di un prodotto o servizio lungo il suo intero ciclo di vita. È uno strumento di comunicazione volontaria, basato sulla norma UNI EN ISO 14025:2010, che consente alle aziende di rendere pubbliche le prestazioni ambientali dei loro prodotti in modo standardizzato e comparabile.

¹³ Il *blower door test* è una prova di tenuta all'aria di un edificio che misura il flusso di ricambio d'aria attraverso l'involucro edilizio. In pratica, si tratta di un test non distruttivo che permette di individuare eventuali infiltrazioni d'aria indesiderate attraverso pareti, serramenti e altre aperture dell'edificio.

¹⁴ Il *Renovation Passport*, o Passaporto di Ristrutturazione, è uno strumento previsto dalla direttiva europea "Case Green" (EPBD) per incentivare la riqualificazione energetica degli edifici. Si tratta di un documento che fornisce una mappa operativa e personalizzata degli interventi necessari a migliorare l'efficienza energetica di un edificio specifico.

¹⁵ Il *Digital Building Logbook*, o Fascicolo Digitale del Fabbricato, è un registro digitale che raccoglie e organizza tutte le informazioni rilevanti relative a un edificio lungo l'intero ciclo di vita. È stato introdotto per migliorare la gestione dei dati nel settore delle costruzioni, facilitare la collaborazione tra i vari stakeholder e promuovere la sostenibilità.

Imprese e fornitori sono chiamati così a collaborare con progettisti e DL per fornire dati verificabili sui componenti, eseguire test di performance e popolare in modo affidabile la documentazione digitale dell'edificio, favorendo una manutenzione più consapevole e futuri step di miglioramento.

Nel contesto descritto, gli artigiani e i lavoratori autonomi restano protagonisti della qualità esecutiva in tutte le lavorazioni specialistiche (posa di cappotti, impermeabilizzazioni, finiture, impianti aeraulici, ecc.). Dal punto di vista della qualità, rappresentano spesso il punto di contatto tra la specifica di progetto e realtà del dettaglio: procedure di posa, istruzioni dei produttori e *check list* condivise con l'impresa e la DL sono l'antidoto alle non conformità che compromettono estetica, durabilità e performance.



Fig. 2.6 – Operai in cantiere (Copyright 2021, Mufid Majnun)

Infine, nelle opere pubbliche il Nuovo codice dei contratti pubblici (D.Lgs. 36/2023) lega strettamente esecuzione, controllo e risultato: la presenza dell'Ufficio di Direzione Lavori disciplinato dall'Allegato II.14, con DL, direttori operativi e ispettori, funge da cerniera tra committenza e impresa per garantire qualità e conformità, mentre i requisiti di qualificazione selezionano operatori in grado di assicurare processi e competenze adeguati. In questo sistema, imprese e fornitori non sono semplici esecutori ma co-garanti del risultato: attraverso scelte di prodotto conformi, cantierizzazione accurata, prove in opera e una documentazione trasparente, consentono all'opera di raggiungere gli obiettivi architettonici e tecnologici, le prestazioni energetiche dichiarate e una minore impronta ambientale lungo il ciclo di vita.

2.3.9. Capocantiere

Il capocantiere è una figura cardine all'interno del processo edilizio, soprattutto nella fase di esecuzione, in quanto rappresenta il punto di raccordo operativo tra l'impresa esecutrice, la Direzione lavori (DL) e le maestranze impegnate nelle attività di costruzione.



Fig. 2.7 – Controllo, supervisione e coordinamento del capocantiere (Copyright 2021, Joe Holland)

Generalmente dipendente dell'impresa appaltatrice o di una subappaltatrice, il capocantiere possiede una solida esperienza tecnica e organizzativa ed è incaricato di coordinare, pianificare e supervisionare l'andamento quotidiano delle lavorazioni.

Il suo ruolo si caratterizza per un duplice profilo, tecnico e gestionale. Da un lato, il capocantiere organizza le attività del cantiere, pianificando le operazioni secondo il cronoprogramma e distribuendo risorse umane, mezzi e materiali in base alle priorità stabilite. Dall'altro, vigila costantemente sull'esecuzione delle opere, verificando che siano realizzate in conformità con i disegni esecutivi, le specifiche tecniche e le prescrizioni contrattuali.

La sua attenzione alla qualità e alla correttezza delle lavorazioni consente di individuare tempestivamente eventuali difformità o criticità, che vengono prontamente segnalate alla Direzione Lavori o ai responsabili tecnici dell'impresa.

Pur non sostituendosi alle figure formalmente responsabili della sicurezza ai sensi del D.Lgs. 81/2008, il capocantiere agisce di fatto come preposto, vigilando affinché le prescrizioni contenute nel Piano di sicurezza e coordinamento (PSC) e nei Piani operativi di sicurezza (POS) vengano rispettate.

È quindi tenuto a segnalare eventuali situazioni di pericolo e a collaborare attivamente per garantire un ambiente di lavoro sicuro.

Parallelamente, gestisce la logistica di cantiere, curando l'approvvigionamento e la corretta conservazione dei materiali e delle attrezzature, coordinandone l'impiego in modo da assicurare continuità alle lavorazioni ed evitando ritardi dovuti a carenze organizzative.

Il capocantiere è anche un importante mediatore tra le diverse figure presenti in cantiere. Mantiene un dialogo costante con la DL, con i progettisti, con i responsabili della sicurezza e con il committente, assicurando un flusso di informazioni chiaro e tempestivo. In questo senso, il suo lavoro contribuisce a prevenire incomprensioni e a favorire la risoluzione rapida delle problematiche operative che inevitabilmente possono emergere.

Dal punto di vista delle competenze, il capocantiere deve padroneggiare sia aspetti tecnici – come la conoscenza delle tecniche costruttive, dei materiali e delle norme di settore – sia aspetti organizzativi e relazionali, che gli consentano di coordinare efficacemente più squadre e lavorazioni contemporanee.

La capacità di *problem solving* e di gestione delle emergenze costituisce un ulteriore elemento distintivo del suo profilo, poiché il cantiere è un contesto dinamico e in continua evoluzione.

All'interno del processo edilizio, il capocantiere svolge quindi un ruolo fondamentale di traduzione delle scelte progettuali in azioni concrete e coordinate sul campo. La sua presenza costante garantisce un controllo diretto sull'avanzamento dei lavori, condizione indispensabile per mantenere elevati standard di qualità, sicurezza ed efficienza, oltre a rispettare i tempi e i costi stabiliti. In tal senso, egli costituisce l'anello essenziale tra la pianificazione teorica e la realizzazione pratica dell'opera.

Dal punto di vista giuridico, la figura del capocantiere non è definita in modo puntuale da una norma unica, ma il suo ruolo è riconducibile a diverse disposizioni legislative e contrattuali. In particolare, ai sensi del D.Lgs. 81/2008, egli è assimilabile alla figura del preposto (art. 2, comma 1, lett. e), ossia «persona che, in ragione delle competenze professionali e nei limiti dei poteri gerarchici e funzionali adeguati alla natura dell'incarico conferitogli, sovrintende all'attività lavorativa e garantisce l'attuazione delle direttive ricevute, controllando la corretta esecuzione da parte dei lavoratori e esercitando un funzionale potere di iniziativa».

In questo senso, l'art. 19 del D.Lgs. 81/2008 attribuisce al preposto, e quindi anche al capocantiere, specifici obblighi:

- sovrintendere e vigilare sull'osservanza da parte dei lavoratori delle disposizioni aziendali in materia di sicurezza e salute sul lavoro e sull'uso corretto dei dispositivi di protezione individuali;

- segnalare tempestivamente al datore di lavoro o al dirigente eventuali carenze o condizioni di pericolo;
- in caso di emergenza, adottare le misure necessarie per la salvaguardia della sicurezza dei lavoratori.

Sul piano contrattuale, il Contratto collettivo nazionale di lavoro per i lavoratori dipendenti delle imprese edili e affini inquadra il capocantiere come figura di quadro o impiegato di alto livello, a seconda della dimensione dell'impresa e della complessità delle opere.

In tale veste, gli vengono riconosciute responsabilità di pianificazione, organizzazione e controllo delle lavorazioni, gestione delle maestranze e interfaccia con la direzione tecnica.

Dal punto di vista tecnico-operativo, il capocantiere è chiamato a:

- organizzare il cronoprogramma giornaliero e settimanale delle attività;
- coordinare le diverse squadre di lavoro, anche in presenza di più subappaltatori;
- controllare la corretta esecuzione delle opere, assicurando la conformità a disegni, capitolati e specifiche tecniche;
- gestire la logistica del cantiere, inclusi i flussi di materiali, attrezzature e mezzi;
- redigere e aggiornare, ove richiesto, il giornale di cantiere e altra documentazione di monitoraggio.

In relazione agli aspetti di sicurezza, il capocantiere collabora con il Coordinatore per la sicurezza in fase di esecuzione (CSE) e con il datore di lavoro dell'impresa affidataria per garantire il rispetto del PSC e dei POS.

Infine, nella prospettiva del processo edilizio integrato, il capocantiere rappresenta l'anello di congiunzione tra la pianificazione strategica e la realizzazione operativa, traducendo le scelte progettuali in azioni concrete e assicurando che la produzione edilizia rispetti tempi, costi e standard qualitativi. Proprio per questa funzione di raccordo, la sua collaborazione con figure come il DL, i progettisti, i fornitori e i coordinatori della sicurezza è costante e strategica.

2.3.10. Collaudatori

Nel sistema italiano il collaudo assolve una funzione di garanzia finale – e talora in corso d'opera – sulla conformità dell'opera al progetto approvato, alle norme tecniche e al contratto.

Nelle opere pubbliche questa funzione è incardinata nel collaudo tecnico-amministrativo previsto dal nuovo Codice dei contratti, che ha lo scopo di verificare e certificare che lavori e forniture siano stati eseguiti “a regola

d'arte" secondo progetto, prescrizioni tecniche e atti contrattuali. L'assetto è delineato dall'Allegato II.14 al D.Lgs. 36/2023 (art. 13), con termini e modalità integrative fissate dall'art. 116 del Codice. In alcune fattispecie e al di sotto di determinati importi, la stazione appaltante può sostituire il collaudo con il certificato di regolare esecuzione emesso dal Direttore dei lavori (DL) o dal direttore dell'esecuzione, come disciplinato dallo stesso Allegato II.14 e dall'art. 116.

Sul piano strutturale, il collaudo statico è regolato dall'art. 67 del D.P.R. 380/2001 (Testo Unico Edilizia – TUE) e dal Capitolo 9 delle NTC 2018 (D.M. 17 gennaio 2018) con relativa Circolare 21 gennaio 2019, n. 7. La legge precisa che tutte le costruzioni la cui sicurezza interessi la pubblica incolumità devono essere sottoposte a collaudo statico, eseguito da un ingegnere o da un architetto iscritto all'albo da almeno dieci anni e non coinvolto nella progettazione, direzione o esecuzione dell'opera, a tutela dell'indipendenza del giudizio.

A struttura ultimata, il DL comunica allo sportello unico e al collaudatore il completamento; quest'ultimo dispone, in via generale, di sessanta giorni per espletare le verifiche e redigere il certificato di collaudo, che viene trasmesso al competente ufficio tecnico regionale e al committente, con contestuale comunicazione allo sportello unico. La normativa ammette, quando necessario, collaudi parziali in corso d'opera per fronteggiare complessità esecutive. Tutte queste scansioni e questi requisiti sono puntualmente riportati nell'art. 67 del TUE e nelle Istruzioni applicative delle NTC.

Il perimetro tecnico del collaudo statico, così come chiarito dal Capitolo 9 delle NTC e dalla Circolare, comprende l'esame della documentazione progettuale e di cantiere (certificati e prove sui materiali, verbali di controlli in accettazione, esiti delle prove di carico dove pertinenti), le ispezioni in sito per valutare la rispondenza del costruito al progetto depositato e alle prescrizioni esecutive e la verifica del corretto recepimento delle varianti.

Laddove previsto, il collaudatore ordina o assiste a prove di carico e ad altre verifiche funzionali sulle opere e sui componenti strutturali, formulando le proprie conclusioni in rapporto ai livelli di prestazione attesi dalle norme tecniche. Ne discende che l'immobile non può essere posto in esercizio prima del rilascio del certificato di collaudo strutturale, salvo i casi particolari previsti dalla legge.

La disciplina contempla anche semplificazioni mirate. Per alcune categorie di intervento in zona sismica, definite dall'art. 94-bis del Testo unico edilizia, la legge consente, nei casi tassativi indicati dall'art. 67, comma 8-ter, la sostituzione del collaudo statico con una dichiarazione di regolare esecuzione rilasciata dal DL, ferma restando la necessità di osservare le prescrizioni regionali

e le condizioni tecniche previste. Si tratta di ipotesi delimitate e non sovrapponibili al regime ordinario del collaudo.

Quanto al ruolo del collaudatore nelle prestazioni energetiche e ambientali, occorre distinguere i piani. Il collaudatore statico non certifica la performance energetica in senso stretto; la sua responsabilità è circoscritta sulla sicurezza strutturale. Tuttavia, nel contesto dei lavori pubblici il collaudatore tecnico-amministrativo verifica la conformità dell'opera al contratto e al progetto, includendo quindi le prescrizioni prestazionali che la stazione appaltante ha posto in gara, comprese quelle energetiche (ad esempio valori limite di trasmittanza o di tenuta all'aria, rendimenti impiantistici, livelli acustici) e ambientali (adempimenti CAM edilizia su contenuto di riciclato, EPD, tracciabilità dei materiali).

In questa prospettiva, il collaudo diventa il momento in cui si controlla l'esistenza e la coerenza dei documenti di prova e di *commissioning* previsti dal capitolato: si pensi ai rapporti di collaudo funzionale degli impianti, ai test in opera per la tenuta all'aria secondo UNI EN ISO 9972:2015, alle verifiche di taratura e bilanciamento, alle Dichiarazioni di Prestazione (DoP) e alla marcatura CE dei prodotti nonché la rispondenza complessiva a quanto prescritto dal D.M. 26 giugno 2015 (requisiti minimi) e dai CAM per l'edilizia.

La nuova Direttiva (UE) 2024/1275 (EPBD rivista) rafforza questa logica di performance *as-installed*, sollecitando gli Stati membri a fissare requisiti per i sistemi tecnici per l'edilizia come installati e a promuovere strumenti come il Passaporto di ristrutturazione, l'Attestato di prestazione energetica aggiornato e i registri digitali: tutti elementi che, se richiamati in contratto, entrano nel fascio di verifiche in sede di collaudo tecnico-amministrativo. In pratica, il collaudatore lavora a stretto contatto con la DL e con il RUP (nelle opere pubbliche) per consolidare un fascicolo di collaudo che non si limita alla mera conformità formale, ma raccorda la qualità costruttiva con le prestazioni misurate e documentate. Da qui deriva il valore delle verifiche "in opera" su involucro e impianti, della tracciabilità dei prodotti (DoP/CE) e della verifica dei requisiti ambientali CAM: tutte attività che, pur essendo svolte da laboratori, imprese o soggetti terzi, confluiscono in un giudizio conclusivo di conformità che il collaudatore emette sulla base di evidenze tecniche e contrattuali.

In sintesi, il collaudo rappresenta la cerniera finale tra progetto e opera realizzata: sul versante strutturale garantisce la sicurezza ai sensi dell'art. 67 Testo unico edilizia e delle NTC 2018; su quello contrattuale assicura che l'opera consegnata sia coerente con gli obiettivi prestazionali, inclusi quelli energetici e ambientali, richiesti dalla committenza e dalle norme vigenti.

2.3.11. *BIM Specialist / Coordinator / Manager / CDE Manager*

La profonda transizione digitale che attraversa la nostra società produce effetti diretti e operativi anche sulla filiera edilizia.

L'avvento del BIM, infatti, non rappresenta un semplice cambio di software in mano a progettisti e operatori, ma segna il passaggio da elaborati statici e cartacei a un ecosistema di dati condivisi che governa l'intero processo edilizio.

In questo scenario emergono nuove figure chiave – *BIM Specialist*, *BIM Coordinator*, *BIM Manager* e *CDE Manager* – che costituiscono l'ossatura della filiera informativa a supporto di tutti gli attori del processo, dalle fasi di pianificazione e progettazione fino alla costruzione e alla gestione dell'edificio.

Nel contesto italiano, queste quattro figure sono descritte dalla UNI 11337-7:2018 e rese certificabili tramite la UNI/PdR 78:2020, che definisce requisiti di conoscenze, abilità e competenze per ciascun profilo. Parallelamente, le responsabilità di gestione informativa sono inquadrare dalla serie UNI EN ISO 19650, oggi base comune anche per le linee guida del *UK BIM Framework*.

In Italia, l'adozione del BIM è divenuta obbligatoria negli appalti pubblici sopra soglia (dal 1° gennaio 2025 per lavori di importo pari o superiore a un milione di euro), con una chiara spinta alla digitalizzazione dei processi da parte del nuovo Codice dei contratti. Queste coordinate collocano le figure BIM al centro sia della transizione digitale sia del percorso verso edifici a prestazioni energetiche elevate e a ridotto impatto ambientale.

Il *BIM Specialist* è il “produttore” dell'informazione digitale di disciplina (architettura, strutture, impianti). Lavora sui modelli informativi con strumenti di *authoring*, sviluppa famiglie parametriche e arricchisce gli oggetti con proprietà verificabili, nel rispetto del *Level of Information Need*¹⁶ concordato. In chiave energetica, il suo contributo è decisivo perché rende “computabili” le scelte di progetto: stratigrafie con proprietà termoigrometriche, parametri di trasmittanza e fattori solari per l'involucro, dati d'impianto e condizioni d'uso coerenti con la famiglia UNI EN ISO 52000 (serie EPB – *Energy Performance of Buildings*) e con gli obiettivi della EPBD rivista 2024/1275. Se i dati nel modello sono strutturati correttamente, le simula-

¹⁶ Il *Level of Information Need* (LOIN) è un concetto che definisce il tipo, la quantità e la qualità delle informazioni necessarie per un progetto in diverse fasi, superando il concetto di *Level of Development*. In pratica, il LOIN permette di specificare quali dati siano richiesti, da chi e in quale momento, garantendo che le informazioni scambiate siano pertinenti e utili, evitando al contempo una sovrabbondanza informativa.

zioni energetiche e i calcoli di comfort diventano tracciabili, ripetibili e confrontabili tra alternative, riducendo il rischio di scostamenti fra prestazioni simulate e misurate.

Il *BIM Coordinator* opera a livello di commessa: federando i modelli delle varie discipline, controlla qualità e coerenza dell'informazione, presidia *clash detection*¹⁷, *naming*¹⁸, codifiche e stati di revisione, verificando che tutte le comunicazioni e le consegne previste all'interno del progetto rispettino i requisiti e le informazioni richieste dal committente, così come definite nella fase iniziale, e siano conformi al piano operativo concordato per la gestione e lo scambio dei dati. È la figura che trasforma i dati di progetto in informazione "pronta all'uso" per il Direttore dei lavori (DL), l'impresa e i fornitori, inclusi i dossier CAM per l'edilizia (DoP, marcature CE, EPD, contenuti minimi ambientali). Dal punto di vista delle prestazioni energetiche, la sua regia assicura che gli attributi critici (ad esempio trasmittanza termica, ponti termici, tenuta all'aria, rendimenti impiantistici) viaggino nei modelli e nei "contenitori informativi" senza dispersioni, così che test in opera possano essere pianificati e verificati a consuntivo.

Il *BIM Manager* ha un raggio d'azione organizzativo: imposta la strategia informativa, redige e aggiorna il *BIM Execution Plan* (BEP), definisce processi, standard, livelli informativi e strumenti, raccordando esigenze del committente e requisiti di gara con la capacità della *supply chain*. Inoltre, coordina l'intero processo di scambio delle informazioni tra il committente, il responsabile principale dell'incarico e gli altri soggetti coinvolti, assicurando che siano definite in modo chiaro e proporzionato le risorse disponibili, le responsabilità di ciascun attore e l'organizzazione complessiva del flusso di lavoro. È in questa sede che la transizione energetica diventa requisito informativo: il *BIM Manager* integra nel BEP le prestazioni obiettivo (consumi, emissioni, comfort) e i relativi indicatori chiave (KPI) da calcolare e poi da misurare, allineandosi alla EPBD rivista 2024/1275 e ai piani CAM. Il BIM manager orienta anche l'adozione di formati *openBIM* (ad esempio IFC – UNI EN ISO 16739-1:2018) per garantire interoperabilità, portabilità e conservazione a lungo termine dei dati, prerequisito per registri digitali dell'edificio e *digital twin* in esercizio.

¹⁷ La *clash detection* è il processo di identificazione e risoluzione delle interferenze o dei conflitti tra diversi elementi all'interno di un modello BIM. In pratica, si tratta di un controllo che verifica se gli oggetti (strutture, impianti, architettura, ecc.) si sovrappongono o collidono in modo inaccettabile, prima che il progetto venga realizzato.

¹⁸ Il *naming* si riferisce alla pratica di assegnare nomi univoci e standardizzati agli elementi del modello, come muri, porte, finestre, ambienti. Questo processo è fondamentale per garantire la coerenza, l'organizzazione e la facilità di gestione del modello BIM durante l'intero ciclo di vita del progetto.



Fig. 2.8 – Le nuove figure specializzate nella progettazione con il BIM (Copyright 2025, Evgeniy Surzhan)

Il *CDE (Common Data Environment) Manager* (gestore dell’Ambiente di Condivisione Dati/ACDat) cura la piattaforma in cui si raccolgono, si governano e si distribuiscono i contenitori informativi del progetto. Secondo UNI 11337-5 e UNI EN ISO 19650, il *Common Data Environment* è la “fonte concordata” dell’informazione e combina regole, permessi, stati di revisione e tracciabilità. Il *CDE Manager* definisce *workflow*, metadati e tassonomie, garantisce sicurezza, integrità e tempestività dei rilasci e governa l’interoperabilità con gli applicativi di modellazione, verifica e gestione. È anche il presidio della *compliance* documentale: DoP/CE, EPD e report CAM, verbali di prova, collaudi e manuali vanno archiviati con versionamento e collegamenti ai modelli, così che gli obiettivi energetici/ambientali fissati a progetto possano essere dimostrati al collaudo e monitorati nel ciclo di vita.

Queste quattro figure non operano isolate l’una dall’altra, ma condividono dati, metodi e decisioni in modo coordinato: *Specialist* e *Coordinator* garantiscono qualità e coerenza dei dati di disciplina e di commessa; il *Manager* li rende aderenti a requisiti e obiettivi (inclusi quelli energetici e ambientali, come CAM e target EPBD), mentre il *CDE Manager* assicura che l’intero flusso sia sicuro, tracciabile e interoperabile.

La cornice normativa italiana e internazionale (UNI 11337-7:2018/UNI/PdR 78:2020 per i profili professionali; UNI EN ISO 19650 per la gestione informativa; UNI EN ISO 16739-1:2018 (IFC) per lo scambio dati;

rifusa 2024/1275 per la rotta di decarbonizzazione del costruito; DM 23 giugno 2022 CAM per gli acquisti pubblici verdi) conferma e rafforza questo assetto. In concreto, è grazie a queste professionalità che il BIM smette di essere una “tecnologia” e diventa il metodo integrato con cui portare in cantiere, e poi in esercizio, edifici meglio progettati, meglio documentati e più performanti.

2.3.12. *Digital Twin Manager*

Grazie all’avvento del BIM sta emergendo un ulteriore e importante innovazione di settore: il gemello digitale (*digital twin*).

Il gemello digitale è la rappresentazione strutturata – geometrica e informativa – dell’opera e dei suoi sistemi, organizzata in contenitori di dati che descrivono componenti, prestazioni, vincoli e relazioni lungo l’intero ciclo di vita. Non è un semplice “3D” dell’edificio, ma un patrimonio informativo condiviso che, attraverso regole di gestione e ambienti collaborativi (CDE), sostiene le decisioni di progetto, costruzione e gestione riducendo ambiguità e rilavorazioni.

In questo scenario il BIM agisce da infrastruttura metodologica della transizione digitale: standardizza i requisiti informativi, rende interoperabili i dati tra attori e software, e prepara il terreno al passo successivo, il gemello digitale in esercizio.

Come introdotto nella sezione precedente, anche questa innovazione sta contribuendo a definire nuove figure professionali di settore come il *Digital Twin Manager*.

Il *Digital Twin Manager* (DTM) è la figura che governa la vita del gemello digitale dell’opera, assicurando che il modello “vivo” dell’edificio, alimentato da dati reali di esercizio, rimanga coerente con gli obiettivi di progetto e con i fabbisogni gestionali.

A differenza dei ruoli BIM, centrati sulla produzione/gestione dell’informazione in fase di progetto, il DTM opera lungo la fase operativa e di manutenzione, orchestrando persone, processi e tecnologie per far sì che il *twin* serva decisioni concrete: comfort, energia, costi, continuità di servizio. In questo senso, la sua azione si innesta nella cornice dell’UNI EN ISO 19650-3:2021 per la gestione informativa in esercizio, e nei principi del *UK BIM Framework*¹⁹, che stabiliscono come i requisiti informativi dell’asset vadano tradotti in flussi di dati affidabili e riutilizzabili.

¹⁹ Il *UK BIM Framework* è l’approccio di riferimento per l’implementazione del BIM nel Regno Unito. Fornisce standard, linee guida e risorse per aiutare individui e organizzazioni

Sul piano metodologico, il DTM definisce gli scopi d'uso del *twin*, i requisiti informativi e i *Level of Information Need* per gli oggetti e i sistemi critici, così da raccogliere solo i dati necessari, con qualità e frequenza adeguate (sensori, BMS – *Building Management Systems*, contatori, impianti tecnici). Questa impostazione – oggi normata da UNI EN 17412-1:2020 – consente di legare attributi e indicatore chiave di prestazione a processi di verifica e ottimizzazione, evitando *data lake*²⁰ ridondanti e poco utilizzabili. Dal punto di vista della transizione energetica, il DTM costituisce il ponte tra progettazione e gestione: integra il *twin* con i sistemi di automazione e monitoraggio per abilitare misura e verifica delle prestazioni nonché ottimizzazione in esercizio. Ciò consente di dare attuazione agli obiettivi e agli obblighi della nuova EPBD rivista 2024/1275: accesso ai dati dei sistemi, interoperabilità, indicatori come lo *Smart Readiness Indicator*²¹ (SRI), Passaporto di Ristrutturazione e, dove previsto, *Digital Building Logbook*, così che le prestazioni *as-installed* siano tracciabili, verificabili e migliorabili lungo il ciclo di vita.

Sul piano della *governance* dei dati, il DTM assicura che il gemello digitale aderisca ai *Gemini Principles*²²: chiarezza dello scopo del *twin*, qualità ed etica dell'informazione, valore per l'organizzazione. In pratica, ciò significa curare semantiche e interoperabilità (*openBIM/IFC* dove opportuno), flussi sicuri e versionati nel CDE in raccordo con il *CDE Manager*, e stabilire politiche di aggiornamento che mantengano allineati il comportamento reale e il modello. Tali principi, nati nel programma britannico del *National Digital Twin*, sono oggi un riferimento ampiamente riconosciuto per i gemelli digitali del costruito.

Operativamente, il DTM presidia l'integrazione tra BIM e *Digital Twin*: gestisce il passaggio dall'informazione *as-designed/as-built* al *as-operated*, federando modelli, sensori e database in una piattaforma che consenta analisi predittive, simulazioni *what-if* e manutenzione basata sulle condizioni.

nella comprensione e nell'applicazione dei principi fondamentali della gestione delle informazioni tramite il BIM. In sostanza, rappresenta un insieme strutturato di regole e strumenti volto a migliorare collaborazione, gestione delle informazioni ed efficienza nei progetti di costruzione e infrastrutture.

²⁰ Un *data lake* è un *repository* centralizzato che archivia grandi quantità di dati eterogenei, in diversi formati e provenienti da più fonti, relativi a un progetto edilizio o infrastrutturale.

²¹ Lo *Smart Readiness Indicator* è uno strumento introdotto dalla Direttiva sul Rendimento Energetico nell'Edilizia (EPBD) per valutare la prontezza tecnologica di un edificio. Si tratta di un indice europeo che misura il grado di "intelligenza" dell'edificio, ossia la sua capacità di utilizzare tecnologie digitali per ottimizzare efficienza energetica e comfort.

²² I *Gemini Principles* sono un insieme di principi guida che mirano a definire e promuovere uno sviluppo e un utilizzo efficaci dei gemelli digitali, in particolare nel contesto delle costruzioni e delle infrastrutture. Elaborati dal Centre for Digital Built Britain, questi principi forniscono un quadro di riferimento volto a garantire che i gemelli digitali siano utili, affidabili e correttamente funzionanti.

La letteratura scientifica conferma che piattaforme integrate BIM+DT migliorano progettazione, cantiere e performance in esercizio, riducendo il divario tra prestazioni simulate e misurate e supportando decisioni di retrofit energetico.

Infine, il DTM mantiene lo sguardo sull'evoluzione degli standard di settore, tra cui i riferimenti ISO 23247 (framework per *digital twin* e *digital thread* nei contesti industriali) utili a impostare architetture, ruoli e requisiti trasversali anche per il costruito avanzato. L'allineamento a questi schemi concettuali aiuta a scalare i *twin* dal singolo edificio a portafogli e reti, con benefici crescenti in termini di efficienza, resilienza e decarbonizzazione.

In sintesi, il *Digital Twin Manager* è il regista della prestazione in esercizio: rende il gemello digitale una vera infrastruttura decisionale, collegata al CDE e ai sistemi di campo, capace di misurare e ottimizzare comfort, energia ed emissioni con processi robusti di informazione. È qui che la transizione digitale abilita la transizione energetica: grazie a dati affidabili, interoperabili e orientati allo scopo, l'edificio diventa misurabile, gestibile e migliorabile lungo tutto il suo ciclo di vita.

3. Procedure e strumenti di valutazione della qualità

3. Procedures and Tools for Quality Assessment

This chapter addresses the current procedures and tools for assessing quality in the construction process. Quality is understood not as an outcome alone, but as the result of systematic checks, inspections, and monitoring activities carried out along the entire building lifecycle.

The discussion highlights how design validation, production control, and site monitoring can reduce risks, improve compliance with technical requirements, and limit costly errors or delays. It also examines how the measurement of building performance in use, through post-occupancy evaluations and feedback mechanisms, contributes to continuous improvement.

Special attention is given to the role of digital tools, such as BIM methodologies and information systems, which enable greater transparency, traceability, and accountability. By integrating these approaches, the construction sector can move toward more reliable, efficient, and sustainable outcomes.

Keywords: *quality assessment; design validation; production control; construction monitoring; performance evaluation; BIM; information*

Come introdotto nel Capitolo 1, negli ultimi anni la valutazione della qualità nel settore delle costruzioni ha progressivamente abbandonato una logica di mera “conformità documentale” per abbracciare pratiche integrate che attraversano l’intero ciclo di vita dell’opera, dal briefing iniziale fino alla fase di esercizio dell’edificio.

A livello europeo, la cornice normativa e volontaria ha spinto in questa direzione: il quadro *Level(s)*¹ fornisce un linguaggio comune per misurare e comunicare le prestazioni di sostenibilità degli edifici, collegando aspetti ambientali, comfort, costi lungo il ciclo di vita e rischi futuri, e organizzando indicatori e metodi applicabili dalla progettazione all’uso e alla fine vita.

¹ Il quadro di riferimento europeo (*EU Level(s) framework*), sviluppato dalla Commissione Europea, è uno strumento per valutare la sostenibilità degli edifici, basato su indicatori chiave di performance (KPI) e sull’utilizzo di strumenti già esistenti. Esso mira a fornire un linguaggio comune a professionisti e committenti, al fine di migliorare le prestazioni ambientali, economiche e sociali degli edifici lungo l’intero ciclo di vita.

La recente rifusione della Direttiva EPBD, approvata il 24 aprile 2024, rafforza inoltre la centralità della prestazione in esercizio per ridurre consumi, bollette e impatti di rete, rendendo più stringente l'esigenza di strumenti affidabili per valutare gap prestazionali e risultati effettivi.

In Italia, gli operatori si muovono anche entro vincoli specifici: i Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'edilizia introducono requisiti su materiali, appalti, controllo e monitoraggio delle prestazioni ambientali del cantiere e dell'opera; il Codice dei contratti pubblici 2023 e i decreti sul BIM (DM 560/2017 aggiornato dal DM 312/2021) hanno accelerato la digitalizzazione dei flussi informativi e, con essa, pratiche di controllo qualità basate su modelli informativi e dati strutturati. Questi riferimenti stanno orientando, di fatto, procedure e strumenti oggi adottati da progettisti, industrie di prodotto, imprese di costruzione e gestori, come presentato nella parte che segue.

3.1. Verifica dell'attività progettuale

La prima forma di garanzia della qualità di un'opera risiede nella corretta validazione dei progetti. Il monitoraggio sistematico e la verifica documentale dei diversi livelli progettuali rappresentano infatti uno strumento decisivo per ridurre il rischio di errori, varianti e contenziosi nelle fasi successive. In linea con i principi del *project management*, la verifica consente di confrontare i risultati parziali con la *baseline* progettuale, individuando tempestivamente scostamenti e criticità.

In Italia, per le opere pubbliche, è in vigore una specifica attività di controllo del progetto, volta a garantire che gli elaborati progettuali rispondano alle esigenze indicate nel documento d'indirizzo e rispettino la normativa vigente. Questa verifica si svolge in itinere, in corrispondenza dei livelli progettuali previsti per la gara: nel caso di affidamento congiunto del progetto e dell'esecuzione (o partenariati pubblico-privati), il Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE) viene validato prima dell'affidamento, mentre il Progetto Esecutivo dell'aggiudicatario è verificato prima dell'avvio dei lavori². Tale attività assume particolare rilevanza in progettazioni complesse, dove la verifica preventiva riduce significativamente il rischio di varianti, contenziosi ed errori onerosi.

L'istituto della validazione progettuale fu introdotto con la "Legge Merloni" (1994), la quale prevedeva che il RUP dovesse approvare formalmente ogni livello progettuale – preliminare, definitivo ed esecutivo – prima

² Art.42 Nuovo codice contratti pubblici (D.Lgs. 36/2023) e suoi allegati.

dell'avvio dei lavori, configurando tale passaggio come una verifica chiave della qualità.

Oggi, ai sensi del D.Lgs. 36/2023, art. 42 e Allegato I.7, la verifica della progettazione è finalizzata ad accertare la conformità normativa e tecnica, la completezza e coerenza degli elaborati, l'affidabilità e l'appaltabilità della soluzione progettuale, la sicurezza, l'adeguatezza economica e la minimizzazione dei rischi di varianti e contenziosi.

In base al valore delle opere e al tipo di appalto, l'attività di verifica è effettuata da soggetti diversi, che possono essere:

- organismi di ispezione accreditati (di tipo A o C) ai sensi della norma europea UNI CEI EN ISO/IEC 17020:2012, in particolare per importi superiori a 20 milioni di euro;
- uffici tecnici della stazione appaltante o personale interno dotato di adeguato sistema di controllo della qualità;
- Responsabile unico del progetto, ove compatibile con le funzioni attribuite;
- organismi specifici come il Nucleo per la verifica dei progetti dell'Agenzia del Demanio (organismo di tipo C).

In ogni caso, le procedure adottate devono garantire imparzialità: il verificatore non può coincidere con chi ha redatto il progetto né con chi svolge compiti di direzione lavori, coordinamento della sicurezza o collaudo.

Le verifiche si applicano a ciascun livello della progettazione e si articolano nei seguenti ambiti principali:

- **affidabilità**, volta a controllare l'applicazione delle norme tecniche e di sicurezza e la coerenza delle ipotesi progettuali che fondano le elaborazioni ambientali, cartografiche, architettoniche, strutturali e impiantistiche;
- **completezza e adeguatezza**, volte ad accertare la presenza di tutti gli elaborati richiesti per il livello progettuale considerato, l'eshaustività delle informazioni rispetto al quadro esigenziale e la corretta sottoscrizione dei progettisti responsabili;
- **leggibilità, coerenza e ripercorribilità**, volte a verificare l'adozione di linguaggi convenzionali, la comprensibilità delle informazioni, la coerenza tra elaborati e la possibilità di ricostruire i calcoli effettuati;
- **compatibilità**, volta a garantire la conformità delle soluzioni progettuali agli elaborati della fase precedente, al documento di indirizzo della progettazione, alle normative e alle eventuali prescrizioni.

La presenza di difformità, incongruenze o omissioni in uno qualsiasi degli ambiti sopra indicati costituisce causa di errore di progettazione tale da compromettere, in tutto o in parte, la realizzabilità, la funzionalità o l'utilizzabilità dell'opera.



Fig. 3.1 – Ambiti principali della verifica dell'attività progettuale

3.2. Dalla progettazione alla consegna

Negli studi di progettazione più strutturati, la gestione dell'informazione secondo la serie UNI EN ISO 19650 (lo standard internazionale per la gestione delle informazioni nei progetti di costruzione) sta diventando il tessuto connettivo della qualità: si definiscono requisiti informativi del committente, si elaborano piani di gestione (*BIM Execution Plan*, BEP), si usano ambienti di condivisione dati (*Common Data Environment*, CDE) con regole di stato dei contenuti, tracciabilità e *versioning*, riducendo incoerenze e rilavorazioni.

In questa direzione, il *UK BIM Framework* mette a disposizione una serie di guide operative, gratuite, che traducono le prescrizioni della UNI EN ISO 19650 in istruzioni applicative. Queste guide spiegano con linguaggio concreto chi fa che cosa, quali informazioni devono essere scambiate, quando e con quali regole, sia durante la fase di realizzazione dell'opera (consegna) sia nella fase successiva di esercizio e manutenzione dell'edificio.

Un elemento centrale è il *Common Data Environment* (CDE), che come già descritto nelle sezioni precedenti, non è solo un software, ma soprattutto un metodo di lavoro che definisce passaggi e responsabilità per creare, controllare, approvare e archiviare i contenuti tecnici (disegni, modelli, relazioni). Nel CDE ogni informazione è associata a metadati coerenti (per esempio autore, versione, stato di approvazione), così da garantire tracciabilità, verifiche tecniche più rapide e una chiusura affidabile delle consegne.

A valle di questo processo, gli standard *openBIM* assicurano che i dati possano “circolare” senza perdite lungo tutta la filiera (progettisti, produttori, imprese, gestori), anche quando si usano software diversi. In particolare:

- IFC – *Industry Foundation Classes* (norma UNI EN ISO 16739-1:2018, sviluppata da *buildingSMART*): formato aperto che consente l’interoperabilità permettendo che un modello creato con un programma sia letto e controllato da un altro senza doverlo ricostruire;
- COBie – *Construction-Operations Building information exchange*: un modello dati per consegnare in modo standardizzato le informazioni patrimoniali (ambienti, impianti, apparecchiature, manuali, piani di manutenzione, codici e garanzie), cioè tutto ciò che serve a chi gestirà l’edificio durante la vita utile.

L’uso combinato di CDE, IFC e COBie non è più teorico: gli studi di progettazione più all’avanguardia li impiegano quotidianamente per validare che i dati siano coerenti, completi e idonei all’uso. Questi stessi dati alimentano in modo diretto i sistemi di gestione dell’edificio, come i *Computer-Aided Facility Management* (CAFM) e i *Computerized Maintenance Management System* (CMMS), riducendo gli “scarti informativi” e i passaggi manuali tra progettazione, cantiere e gestione e rendendo più affidabili manutenzioni, costi e prestazioni in esercizio.

Nella prospettiva della transizione energetica ed ecologica, la qualità progettuale oggi si valuta sempre più con modelli energetici “operazionali”.

Di particolare interesse sono le linee guida e gli standard tecnici per l’ingegneria degli impianti e, più in generale, per le prestazioni degli edifici prodotti da *Chartered Institution of Building Services Engineers* (CIBSE). Le sue *Technical Memoranda* (TM) sono documenti pratici molto usati da progettisti, imprese e committenze per impostare, verificare e misurare la qualità prestazionale degli edifici lungo il ciclo di vita.

In particolare:

- CIBSE TM54 – *Evaluating operational energy use at the design stage*: aiuta i progettisti a stimare i consumi reali già in fase di *concept* e sviluppo, andando oltre la mera conformità regolatoria;
- CIBSE TM63 – *Operational performance: Building performance modelling and calibration for evaluation of energy in use*: fornisce un quadro metodologico per calibrare i modelli con i dati in uso, individuando le cause del gap tra previsione e realtà.

Nella prassi, ciò si traduce in workshop con il committente per definire profili d’uso realistici, inclusi i carichi non regolamentati, e in una modellazione dinamica iterativa, così da impostare target credibili e verificabili.

Altro tassello è il *Plan for Use Guide 2021* del RIBA, che integra Valutazioni Post-Occupazione (POE) leggere e sistematiche, portando i team a

fissare fin dall’inizio esiti misurabili e a configurare la consegna in modo da facilitare la fase d’uso. Questa impostazione, derivata dal *RIBA Plan of Work 2020*, già introdotta nelle sezioni precedenti, ha cambiato il modo in cui molti studi impostano i brief e gli scambi informativi, massimizzando l’apprendimento dai feedback degli utenti e dai dati in esercizio.

Sul fronte della consegna e avviamento (*delivery*), la politica *Government Soft Landings* (GLS)³ e il framework *Soft Landings* hanno diffuso – anche oltre il Regno Unito – pratiche che prevedono una messa in servizio accurata (*commissioning*), la formazione del personale che gestirà l’edificio e una consegna ben pianificata (*handover*) con attività avviate in anticipo.

Queste pratiche includono piani di messa a punto prolungati e una fase di assistenza post-consegna (*aftercare*) strutturata nei primi mesi di esercizio. Il loro valore sta nel collegare ciò che è stato progettato con ciò che dovrà essere realmente gestito, riducendo difetti nascosti, interventi di richiamo e disservizi che spesso emergono durante il collaudo stagionale (*seasonal commissioning*), quando gli impianti vengono provati in condizioni climatiche diverse.



Fig. 3.2 – Strumenti e standard per la gestione dei dati di progetto e consegna

³ Il *Government Soft Landings* è un’iniziativa di *procurement* edilizio che mira a garantire una transizione agevole dalla fase di progettazione e costruzione alla fase operativa di un edificio pubblico. In sostanza, si tratta di un processo che coinvolge i progettisti e i costruttori anche dopo il completamento dell’opera, per assicurare che l’edificio funzioni come previsto e soddisfi le esigenze degli utenti finali.

3.3. Industria: controllo di produzione e tracciabilità

Nel settore industriale, i produttori di componenti e sistemi hanno rafforzato il Controllo della produzione in fabbrica (*Factory Production Control*) per assicurare conformità e costanza prestazionale. Linee guida operative chiariscono come strutturare procedure, controlli e registrazioni; parallelamente, il Regolamento prodotti da costruzione impone Dichiarazioni di prestazione e marcatura, creando la base per tracciabilità e audit a valle.

Sempre più operatori associano a questi obblighi un lavoro sul dato digitale: oggetti BIM aggiornati, EPD e schede ambientali collegabili a COBie o IFC affinano il “gemello informativo” consegnato al cliente.

Questo patrimonio informativo, quando gestito in un CDE e reso coerente con le richieste di capitolato informativo, riduce ambiguità in cantiere e semplifica la verifica di accettazione, con benefici diretti su tempi e costi. Le stesse piattaforme *openBIM* e i servizi *buildingSMART* sono già usati per controlli automatici di coerenza e per ridurre il rischio di conflitti tra oggetti e attributi in più software.



Fig. 3.3 – Controllo e tracciabilità nella produzione industriale dei componenti edilizi

3.4. In cantiere: qualità come affidabilità del flusso

In fase di cantierizzazione dell’opera, la qualità dipende sempre più dalla stabilità del flusso di lavoro e dalla capacità di anticipare i vincoli.

Il *Last Planner System* (LPS) è un sistema collaborativo di programmazione e controllo della produzione in cantiere: mette le squadre in condi-

zione di fare promesse eseguibili settimana per settimana, rendendo il flusso prevedibile e individuando in anticipo i blocchi che potrebbero rallentare i lavori. Una sua metrica chiave è il *Percent Plan Complete* (PPC), cioè la percentuale di attività pianificate effettivamente completate nel periodo: un indicatore semplice ma potente per comprendere se il piano sta funzionando e dove occorre intervenire (PPC = attività completate/attività pianificate).

Il LPS nasce nell'alveo della *Lean Construction*, l'approccio "snello" alla gestione dei progetti che mira a creare valore per il committente e ridurre gli sprechi attraverso collaborazione, trasparenza e miglioramento continuo. Manuali e glossari del *Lean Construction Institute* (LCI) documentano come la gestione dei vincoli, la pianificazione per fasi e i cicli brevi di apprendimento riducano variabilità e rilavorazioni, con impatti misurabili su tempi e costi.

Accanto agli strumenti organizzativi, si sono consolidate oggi prove strumentali di qualità su involucro e impianti (ad esempio tenuta all'aria secondo UNI EN ISO 9972:2015, termografia, collaudi funzionali, ecc.), che consentono di anticipare difetti e velocizzare la diagnosi.

Sul fronte delle tecnologie per l'ispezione di cantiere (*site-inspection*), grazie alla modellazione BIM dell'edificio, l'uso di realtà aumentata (*Augmented Reality*, AR) e rilevamento mobile (*mobile mapping*) è ormai passato dalla sperimentazione a impieghi mirati: la sovrapposizione del modello informativo sul costruito aiuta a confrontare lo *as-built* (quanto realmente costruito) con lo *as-designed* (quanto progettato), a individuare interferenze e a documentare in tempo reale non conformità e rilasci, con ritorni immediati sulla chiusura dei SAL (Stati di Avanzamento Lavori) e sulla riduzione di varianti tardive. Rassegne tecniche della *Federal Highway Administration* mostrano casi d'uso consolidati di AR per ispezioni, formazione e controllo qualità.

Passando dalla fase di cantiere a quella di consegna, la messa in servizio (*commissioning*) è oggi un vero processo di qualità che inizia in fase di progettazione e arriva ai primi mesi d'esercizio.

Le linee guida del *Whole Building Design Guide* (WBDG) descrivono il *commissioning* come una sequenza strutturata di attività e documenti (requisiti del committente, piani e procedure di prova, manuali di sistema, ruoli e responsabilità) finalizzata a consegnare impianti che raggiungano le prestazioni attese.

Organizzazioni pubbliche come la statunitense *General Services Administration* (GSA) e il *Department of Veterans Affairs* (VA) rendono obbligatorio il *commissioning* nei propri standard e pubblicano manuali operativi per applicarlo sia a edifici nuovi sia a ristrutturazioni.



Fig. 3.4 – Strumenti per la gestione della qualità in cantiere

3.5. In esercizio: misurare, verificare, apprendere

La qualità effettiva è quella misurata e validata in fase di esercizio. Per questo, molte committenze spostano oggi l'attenzione su metriche di prestazione operativa (dati misurati durante l'esercizio) e su schemi di certificazione basati su consumi reali.

Un esempio è NABERS UK (*National Australian Built Environment Rating System* – versione Regno Unito), che attribuisce un *rating* energetico operativo agli uffici sulla base di 12 mesi di consumi effettivi.

Il programma *Design for Performance* (DfP – Progettare per la prestazione reale) impegna i team fin dalla fase di progettazione a conseguire un risultato in esercizio. Sono previste:

- revisioni indipendenti del progetto;
- obiettivi contrattualizzati (target);
- regole chiare su perimetro e misure – ad esempio distinzione tra *base building* (parti comuni e impianti del fabbricato) e *tenant* (utenze degli occupanti), con prescrizioni su sotto contatori e tracciabilità dei dati.

Affiancato a obiettivi di intensità energetica ($\text{kWh/m}^2\text{a}$), questo approccio sta diventando un riferimento per ridurre il *performance gap* fra progetto ed esercizio, perché premia il risultato misurato, non solo la conformità ai calcoli. Le organizzazioni professionali raccomandano di fissare fin da subito obiettivi energetici operativi, accanto a quelli di emissioni di carbonio, e di utilizzare strumenti come CIBSE TM54 (valutazione dell'energia operativa in fase di progetto) e CIBSE TM63 (calibrazione del modello con dati reali)

(vedi paragrafo 3.2.). In pratica: si stima in modo realistico il consumo atteso (TM54), poi in esercizio si calibra il modello confrontandolo con i dati misurati (TM63), così da collegare progettazione e risultati in uso e individuare gli interventi correttivi (regolazioni, orari, set-point, formazione).

In parallelo, la *Post-Occupancy Evaluation* (POE – Valutazione dopo l’occupazione) è divenuta un processo strutturato: guide e manuali operativi hanno reso “di routine” l’ascolto degli occupanti, l’analisi dei dati di funzionamento, la ri-configurazione degli impianti e il miglioramento continuo. La POE non è un sondaggio occasionale: è un ciclo periodico di verifica che alimenta decisioni di gestione e futuri progetti.

Alla base di molte politiche di garanzia delle prestazioni c’è la Misurazione e Verifica (M&V). Il protocollo IPMVP (*International Performance Measurement and Verification Protocol*, a cura dell’*Efficiency Valuation Organization*) stabilisce principi, opzioni di M&V e contenuti minimi dei piani: definizione della *baseline* (consumo di riferimento), scelta dei confini di misura, regole per aggiustamenti ordinari e straordinari (*routine/non-routine adjustments*), incertezza e reporting.

Negli Stati Uniti, le linee guida FEMP (*Federal Energy Management Program*, in aggiornamento Versione 5.0) traducono questi principi in istruzioni operative per i contratti a prestazione: come predisporre piani e rapporti, quali matrici di rischio adottare e come verificare i risultati.

Nella pratica italiana ed europea, questi riferimenti sono sempre più usati nei contratti di servizio energia e negli EPC (*Energy Performance Contracting* – contratti a garanzia di risultato), nonché nei programmi di riqualificazione finanziati, perché assicurano risultati misurati e verificabili.



Fig. 3.5 – Strumenti e metodi per la verifica delle prestazioni operative

3.6. Governance dell'informazione

Guardando trasversalmente alle fasi descritte, emergono tre elementi ricorrenti nelle pratiche che oggi risultano più efficaci per ridurre gap prestazionali, tempi e costi.

Il primo riguarda la *governance* dell'informazione: requisiti chiari, ambienti di condivisione dati (CDE), standard *openBIM* e pacchetti dati come COBie consentono di evitare perdita di conoscenza nei passaggi di consegna e di automatizzare molti controlli qualità, dal *clash detection* alla completezza dei campi asset per la gestione. Ne derivano minori ambiguità contrattuali e un *handover* digitale effettivamente utilizzabile dai *facility manager*.



Fig. 3.6 – Principi trasversali per la qualità del processo edilizio

Il secondo elemento è l'integrazione tra previsioni e dati in uso. Le filiere più avanzate non si limitano a calcoli di conformità, ma impostano fin dall'inizio una catena di evidenze che comprende la stima operativa (TM54), il *commissioning* di sistema e involucro, la messa a punto con dati reali, la calibrazione del modello (TM63), la misurazione e verifica M&V secondo standard riconosciuti, e – quando opportuno – un rating basato su prestazioni effettive come NABERS UK. Questo ciclo chiuso, rinforzato da pratiche *Soft Landings* e *Plan for Use*, alimenta una cultura del miglioramento continuo.

Il terzo elemento riguarda l'affidabilità del flusso nei cantieri e nelle forniture. La qualità si misura sempre più in questi termini: pratiche *Lean*, checklist digitali, ispezioni strumentali e l'uso di tecnologie AR per verifiche in tempo reale stanno riducendo rilavorazioni e varianti tardive, con effetti immediati su tempi e costi. Le committenze più strutturate chiedono e verificano report di *commissioning* completi, registri delle non conformità con tracciabilità nel CDE e prove prestazionali su involucro e impianti prima della consegna.

4. Difformità, vizi e difetti delle opere

4. Non-conformities, Faults and Defects in Construction Works

This chapter deals with nonconformities, defects, and failures in construction works, analyzing their causes, consequences, and implications for the actors involved.

The discussion examines the regulatory and legal framework, the evaluation of the energy performance gap, and the identification of typical design and construction errors.

Finally, the chapter highlights the relationship between quality, responsibilities, and performance, providing an operational synthesis aimed at reducing risks, enhancing accountability, and improving quality management practices across the entire building process.

Keywords: *construction defects, nonconformities, energy performance gap, design errors, construction errors, accountability, quality management*

Il tema della qualità nel processo edilizio non può prescindere dall'analisi delle difformità, dei vizi e dei difetti che possono emergere in fase di progettazione, realizzazione o utilizzo dell'opera. Si tratta di aspetti che incidono in maniera determinante non solo sulla conformità tecnica e prestazionale del fabbricato, ma anche sulla tutela degli interessi della committenza e degli utenti finali.

L'individuazione e la classificazione delle principali criticità – dalle non conformità documentali e procedurali ai vizi costruttivi più ricorrenti, fino ai difetti che compromettono le prestazioni energetiche e funzionali – rappresentano un passaggio indispensabile per comprendere come la qualità sia un obiettivo da perseguire lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Il capitolo affronta quindi il tema da una prospettiva sia normativa che operativa: da un lato richiamando il quadro giuridico di riferimento, che disciplina responsabilità e garanzie; dall'altro evidenziando le cause più frequenti degli errori di progettazione ed esecuzione e le loro conseguenze in termini economici, tecnici e di immagine.

Infine, viene messo in luce il ruolo delle pratiche di monitoraggio, controllo e valutazione delle prestazioni, strumenti essenziali per prevenire l'insorgere di difformità e per rafforzare i meccanismi di responsabilità di tutti gli attori coinvolti nel processo edilizio, come presentato nel Capitolo 2.

4.1. Aspetti normativi e di giurisprudenza

Le difformità e i difetti dell'opera edilizia non sono soltanto un tema di qualità costruttiva e responsabilità contrattuale: incidono in modo sostanziale sulla prestazione energetica in uso, sui costi di conduzione e sulla soddisfazione degli utenti.

La letteratura internazionale ha mostrato che tra ciò che si prevede in fase di progetto e ciò che si osserva in esercizio permane, ancora oggi, un divario energetico significativo, dovuto a un intreccio di cause che includono errori di progettazione, errori di costruzione, carenze di messa in servizio (*commissioning*), gestione non ottimale dei sistemi e comportamento reale degli occupanti. Rassegne di ampio respiro – fra cui quelle di de Wilde, van Dronkelaar, Sunikka-Blank e Galvin e Zheng – hanno documentato ampiezza, variabilità e cause del fenomeno in diversi contesti tipologici e climatici.

L'evoluzione normativa europea va nella direzione di riconciliare calcoli e consumi misurati e di rappresentare condizioni operative e comportamenti d'uso tipici. La Direttiva (UE) 2024/1275 (EPBD rivista) stabilisce, fra l'altro, l'obbligo di esprimere la prestazione energetica sulla base di energia calcolata o misurata e di tener conto del comportamento tipico degli utenti e delle condizioni di esercizio, anche a fini di verifica e confronto.

Nel quadro italiano, il contratto d'appalto, per la realizzazione di un'opera edile secondo prescrizioni progettuali, è regolato dagli artt. 1655 ss. c.c. Sul piano dei vizi e delle difformità, la distinzione cardine si individua tra l'art. 1667 c.c. (garanzia per vizi e difformità "semplici") e l'art. 1669 c.c. (responsabilità decennale per rovina e gravi difetti). In termini essenziali, l'art. 1669 c.c. tutela il committente e i suoi aventi causa per dieci anni dal compimento dell'opera; la denuncia va fatta entro un anno dalla scoperta e l'azione proposta entro un anno dalla denuncia.

Negli anni, la giurisprudenza ha ampliato la portata applicativa dell'art. 1669 c.c.: le Sezioni Unite della Cassazione (sent. n. 7756/2017) hanno infatti chiarito che la responsabilità ex art. 1669 si applica anche a opere di ristrutturazione o a interventi manutentivi di lunga durata su immobili esistenti, e che i "gravi difetti" non riguardano soltanto la stabilità strutturale ma qualsiasi alterazione che incida in modo significativo su funzionalità, efficienza e normale utilizzazione del bene (ad esempio l'ammaloramento dei

rivestimenti di facciata o impianti mal funzionanti). Questa estensione interpreta come “gravi difetti” anche fenomeni che, pur non compromettendo la stabilità dell’edificio, ne pregiudicano l’idoneità all’uso secondo la destinazione (ad esempio: gravi carenze di tenuta all’aria con infiltrazioni e condense, malfunzionamenti impiantistici sistemici, isolamento termico posato in modo difettoso). Tale aspetto è cruciale perché collega direttamente difetti costruttivi e prestazione energetica in uso, spostando l’attenzione dall’aderenza formale al progetto alla capacità funzionale dell’opera.

Sul piano regolatorio europeo, oltre alla già citata EPBD rifusa 2024/1275, gli standard EN/ISO richiamati dall’*Annex I* della Direttiva (UNI EN ISO 52000-1:2018, UNI EN ISO 52120-1:2022, ecc.) indirizzano gli Stati membri verso metodologie trasparenti per il calcolo e, quando possibile, per la verifica con dati misurati, così da evitare quella che comunemente oggi è definita “difformità di prestazione energetica”. Tale requisito è rilevante per garantire edifici a energia quasi zero in fase di esercizio o, più semplicemente, prestazioni effettive negli edifici oggetto di profonde ristrutturazioni.

4.2. Difformità di prestazione energetica e approcci di valutazione

Per “difformità di prestazione energetica” (*energy performance gap*) si intende lo scostamento tra prestazioni energetiche previste, ricavate dal progetto o da modelli di conformità, e quelle misurate in esercizio. La letteratura evidenzia cause ricorrenti: assunzioni di input troppo ottimistiche (infiltrazioni, rendimenti impiantistici, carichi non regolamentati), strategie di controllo semplificate o non implementate in esercizio, *commissioning* incompleto, e differenze fra comportamento d’uso ipotizzato e reale (*occupant behaviour*).

La Misurazione e Verifica (M&V) – introdotta nel Capitolo 3 – rappresenta il passaggio che “chiude il cerchio” tra ciò che si promette in sede di progetto e ciò che si ottiene davvero in esercizio. In questo ambito emergono soluzioni consolidate a livello internazionale, che costituiscono la base per azioni di più ampia portata. Tra queste, il citato CIBSE TM54 propone già in fase di progettazione una stima dell’energia operativa, con scenari e analisi di sensitività su profili d’uso e carichi non regolamentati. Il CIBSE TM63 fornisce invece un quadro per calibrare i modelli con dati misurati, utile anche per la diagnosi delle cause del gap. Infine, gli schemi *outcome-based* come NABERS UK spostano l’attenzione dal modello al risultato in uso, basando il rating su dodici mesi di consumi effettivi; il percorso *Design for Performance* impegna il team a conseguire il rating in esercizio, con revisioni indipendenti, target contrattualizzati e regole di misura chiare.

Quando si dichiara che un intervento consentirà di risparmiare energia, non è sufficiente una stima preliminare: occorre misurare i consumi dopo l'intervento, mettere questi dati su basi comparabili con quelli "originari" e spiegare con trasparenza come si è arrivati al risultato finale. Questo è lo scopo dell'*International Performance Measurement and Verification Protocol* (IPMVP)¹, curato dall'*Efficiency Valuation Organization* (EVO) che fornisce principi condivisi, un linguaggio comune e un ventaglio di approcci riconosciuti per determinare i risparmi in modo chiaro e replicabile.

Nel quadro IPMVP, l'idea centrale è che il "risparmio" non si misuri direttamente, ma si deduca per differenza tra un consumo di riferimento (la *baseline*) e il consumo post-intervento, opportunamente normalizzati per tener conto delle condizioni che cambiano nel tempo. La *baseline*, cioè il comportamento atteso dell'edificio senza intervento, deve essere definita con cura, usando dati storici affidabili e dichiarando le ipotesi di partenza. Poiché clima, orari di utilizzo, livelli di occupazione o dotazione di apparecchiature possono variare, il protocollo richiede aggiustamenti "di routine" (per variabili previste e ricorrenti) e "non di routine" (per eventi straordinari). In questo modo i confronti prima/dopo risultano più corretti e i risparmi più credibili (EVO, *IPMVP Core Concepts*, 2022).

Per adattarsi ai diversi contesti, l'IPMVP propone quattro opzioni metodologiche:

1. Quando si valuta l'effetto di un singolo intervento, ben isolabile (per esempio la sostituzione di un infisso o di una Unità di Trattamento Aria), si può misurare solo ciò che conta davvero e stimare il resto, contenendo i costi di misura (opzione tipica delle soluzioni a "retrofit isolato" con misure parziali).
2. Se invece si desidera la massima precisione, sull'intervento isolato, si misurano tutti i parametri necessari.
3. Quando l'obiettivo è garantire un risultato a livello edificio – per esempio in un contratto di prestazione energetica che impegna l'appaltatore su tutto l'insieme dei consumi – si lavora direttamente sui contatori generali dell'edificio e si usa un modello statistico per separare l'effetto dell'intervento da quello di clima e uso.
4. Infine, quando mancano misure dirette comparabili o si devono valutare scenari complessi, si ricorre a un modello energetico calibrato sui dati reali, così da stimare in modo coerente il «cosa sarebbe successo senza l'intervento».

¹ Vedi paragrafo 3.5.

L'IPMVP non impone un'unica soluzione ma guida a scegliere consapevolmente l'approccio, a dichiararne i limiti e a documentarne la qualità. Proprio per tale motivo, la qualità del risultato non dipende solo dall'opzione scelta, ma anche da come si progetta la misura. In tal senso sono preziose le linee guida del *Federal Energy Management Program* (FEMP) del Dipartimento dell'Energia USA (Versione 5.0, in aggiornamento, 2024), che traducono i principi IPMVP in istruzioni operative pensate per i "contratti a prestazione".

Queste linee guida spiegano come redigere un piano di M&V completo (obiettivi, confini di misura, *baseline*, punti di misurazione, frequenza di acquisizione, responsabilità), come progettare la sotto-contabilizzazione (scelta e collocazione dei sotto-contatori, accuratezza, gestione e conservazione dei dati), come normalizzare i risultati per variabili esterne e come gestire gli eventi non di routine, definendo in anticipo chi decide gli aggiustamenti e con quali evidenze. Un altro contributo importante riguarda l'attenzione all'incertezza: le linee guida richiamano metodi statistici e criteri di qualità del dato in coerenza con la prassi consolidata.

Nella pratica, l'applicazione combinata di IPMVP e FEMP si configura come un percorso in tre mosse. Innanzitutto, si definisce la *baseline*, ad esempio con 12-36 mesi di dati storici, ripuliti e analizzati per evidenziare la relazione tra consumi e variabili come clima e occupazione. Successivamente si progetta la misura, scegliendo cosa monitorare e come: se si punta a un risultato complessivo "di sito", si adotta l'opzione 3, con attenzione al modello di regressione; se invece si vuole isolare una specifica misura (per esempio l'efficienza di una nuova centrale termica), si ricorre all'opzione 1 o 2 con strumenti e sensori dedicati. Infine, si misura, si normalizza e si documenta con trasparenza: a fine periodo si raccolgono i dati, si applicano gli aggiustamenti concordati, si calcolano i risparmi e si rendono disponibili formule, dati e controlli di qualità, così che un terzo possa ripetere i conti e giungere alle stesse conclusioni.

Per la verifica statistica dei modelli e degli errori di stima è prassi rifarsi alla *ASHRAE Guideline 14*, che fornisce criteri e indicatori – come gli indici di scostamento e la variabilità residua – utili a giudicare l'affidabilità del calcolo (ASHRAE, *Guideline 14*, 2014).

Il valore aggiunto di questo approccio non è solo contabile: misurare e verificare in modo strutturato consente di distinguere se lo scostamento tra consumi previsti e reali dipenda da un inverno particolarmente rigido, da orari di utilizzo estesi, da tarature impiantistiche non ottimali o, al contrario, da ipotesi di progetto troppo ottimistiche. Ne derivano maggiore trasparenza nei rapporti tra committente e fornitore, riduzione dei contenziosi e, soprattutto, un allineamento degli incentivi verso i risultati in uso: si premia ciò che l'edificio effettivamente consuma e risparmia, non solo la qualità di un

modello teorico (EVO, *IPMVP Core Concepts*, 2022; DOE, *FEMP M&V Guidelines v5.0*, 2024; ASHRAE, *Guideline 14*, 2014).

In contesti orientati a ridurre il divario di prestazione energetica tra progetto ed esercizio, l'M&V diventa quindi una leva decisiva. Collegando i dati misurati a procedure standard e a piani chiari, diventa più semplice individuare i correttivi: ritarare il sistema di regolazione (BMS), rivedere orari e set-point, correggere difetti di involucro o aggiornare le ipotesi di modello. In questo senso, l'M&V non è un adempimento finale, ma uno strumento di apprendimento continuo che aiuta a trasformare le evidenze di esercizio in decisioni operative e, nel tempo, in progetti futuri meglio calibrati.

Per quanto riguarda l'involucro e la qualità in opera, lo standard UNI EN ISO 9972:2015 descrive come eseguire la prova di tenuta all'aria con il cosiddetto metodo di pressurizzazione (*blower door test*). L'edificio viene posto in leggera depressione o sovrappressione (tipicamente 50 Pascal) e si misura quanta aria occorre spostare per mantenere stabile la differenza di pressione. Da qui si ricavano indicatori standard: ad esempio n_{50} , che indica il numero di ricambi d'aria/ora a 50 Pa (utile per residenziale e piccoli edifici), oppure q_{50} , che esprime la portata di fuga per metro quadrato di superficie disperdente (più adatta a grandi edifici). Durante il test, oltre alla misura numerica, le infiltrazioni sono localizzate con strumenti semplici (fumo tracciante, anemometri, termocamera), individuando con precisione i punti deboli come fori impiantistici, cassonetti, giunti e attacchi dei serramenti.

In ambito europeo è diffuso l'uso delle guide ATTMA TSL1/TSL2 (*Air Tightness Testing & Measurement Association*), che non cambiano il principio della prova ma uniformano la procedura: preparazione degli ambienti, sequenza dei passaggi, requisiti di calibrazione della strumentazione, controlli di qualità, struttura minima del rapporto di prova e criteri per la valutazione dell'incertezza. Queste regole riducono la variabilità fra operatori e rendono i valori misurati più confrontabili e difendibili in collaudo o in gara.

Accanto alla prova di tenuta, la termografia all'infrarosso secondo UNI EN 13187:1999 rappresenta un metodo qualitativo per evidenziare discontinuità termiche e difetti di posa dell'isolamento. La termocamera mostra la distribuzione di temperatura sulle superfici interne o esterne e, con condizioni ambientali adeguate (differenza termica interna/esterna sufficiente, assenza di sole diretto, poco vento, superfici asciutte) emergono chiaramente ponti termici, vuoti di isolante, umidità e talvolta percorsi di aria parassita. Combinando la termografia con un leggero stato di depressione ottenuto tramite *blower door*, i percorsi d'aria diventano ancora più visibili,

consentendo interventi correttivi prima delle chiusure definitive. La norma definisce inoltre modalità di esecuzione e di documentazione (immagini di riferimento, impostazioni di emissività, note sulle condizioni meteo), garantendo report utili e ripetibili.

Quando prove di tenuta all'aria e termografia vengono prescritte a capitolato e inserite nei piani di prova (idealmente con un pre-test in corso d'opera e un test finale di accettazione), i benefici sono immediati: i difetti vengono intercettati prima che diventino problemi costosi, l'incertezza dei modelli energetici diminuisce perché il parametro di infiltrazione è misurato e non assunto, si riducono i rischi di condensa e si migliora il comfort.

Infine, la messa in servizio degli impianti (*commissioning*) completa il quadro. Le linee guida WBDG (*Whole Building Design Guide*) e i manuali della GSA (*General Services Administration*), in coerenza con *ASHRAE Guideline 0* (la guida quadro del processo) e *ASHRAE Standard 202* (norma che ne formalizza fasi e deliverable), trattano il *commissioning* come un processo continuo che inizia dagli obiettivi del committente (*Owner's Project Requirements*), prosegue con le verifiche di progetto, definisce un piano prove chiaro e conduce test funzionali in cantiere fino alla consegna del manuale dei sistemi (*systems manual*) e alla formazione di chi gestirà l'edificio.

Quando questa catena si interrompe aumenta il rischio che l'edificio non si comporti in uso come previsto "sulla carta". È qui che nasce spesso il divario di prestazione: logiche di controllo non attivate, sensori mal posizionati o non tarati, orari e set-point diversi da quelli ipotizzati in progetto, piccole perdite o squilibri fluidodinamici che, sommati, portano a consumi più alti e comfort inferiore al previsto.

In sintesi, misurare la tenuta all'aria (UNI EN ISO 9972:2015/ATTMA), verificare i difetti con la termografia (UNI EN 13187:1999) e collaudare metodicamente gli impianti (WBDG/GSA, ASHRAE 0/202) non sono attività accessorie ma tasselli di uno stesso percorso di qualità. Se inseriti nei capitolati con soglie prestazionali chiare, responsabilità definite e piani di prova articolati in due tempi (in corso d'opera e a fine lavori), questi strumenti aiutano a ridurre gli errori, a rendere tracciabili le decisioni e, soprattutto, a chiudere il gap tra intenzione progettuale e prestazione reale dell'edificio.

4.3. Difetti delle opere: cause del divario di prestazione

Gli effetti di vizi e difformità si manifestano in forme diverse, dai disagi percepiti (discomfort, rumore, spifferi) fino a sovraconsumi energetici e/o degrado accelerato.

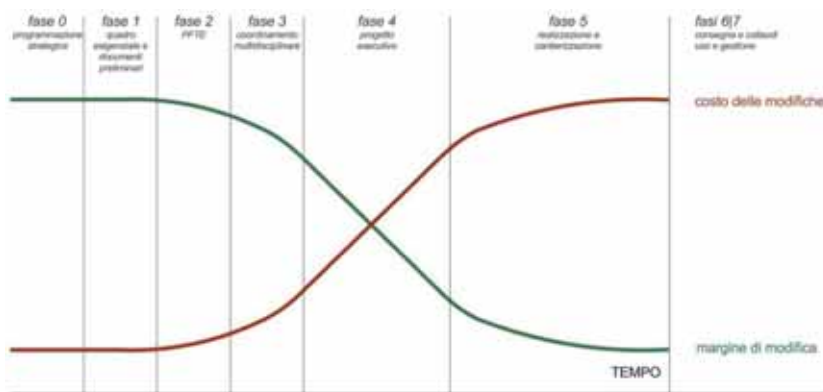


Fig. 4.1 – Rappresentazione della relazione tra flessibilità progettuale e costo delle modifiche nelle diverse fasi del processo edilizio. Nelle prime fasi (0-2) il margine decisionale è massimo e il costo delle varianti minimo; nelle fasi esecutive e di cantiere (4-5) il rapporto si inverte (Schema elaborato dagli autori e ispirato al RIBA Plan of Work)

La ricerca sul tema del “rilavoro” (*rework*) in edilizia mostra come errori e rilavorazioni siano ancora frequenti e costosi.

Prevenire i difetti non è soltanto un obiettivo qualitativo, ma rappresenta un modo per controllare tempi e costi di cantierizzazione e ridurre, soprattutto, il rischio di *performance gap* in un’epoca in cui gli edifici sono chiamati a essere conformi a nuovi ed elevanti standard prestazionali.

4.3.1. Errori di progettazione

Nel ciclo di vita di un edificio, il progetto è il primo luogo in cui si decide, in modo spesso irreversibile, quanto la prestazione in esercizio sarà vicina a quanto promesso in fase di *concept*.

Le ricerche sul *performance gap* mostrano che molti scostamenti tra consumi previsti e consumi reali nascono da scelte e assunzioni compiute a tavolino: dettagli d’involucro lasciati indeterminati, ipotesi di tenuta all’aria e di controllo impiantistico troppo ottimistiche, elaborati esecutivi incompleti, mancanza di regole chiare per lo scambio dei dati fra progettisti e per la consegna *as-built*. In breve, gli errori di progettazione sono spesso “immateriali” ma producono effetti molto concreti su dispersioni, comfort e costi operativi.

La letteratura sul *rework* conferma che lacune progettuali e incoerenze informative si traducono in rilavorazioni in cantiere, con impatti misurabili su tempi, costi e qualità finale dell’opera.

L'involucro è il primo "sistema" da cui dipende l'energia operativa di un edificio. Una fra le assunzioni più ricorrenti nei modelli di calcolo è una tenuta all'aria ideale; in realtà il tasso di infiltrazione è altamente sensibile al modo in cui si progettano e realizzano giunti, passaggi impiantistici, attacchi dei serramenti e connessioni di facciata. La norma UNI EN ISO 9972:2015 descrive il metodo di pressurizzazione con ventilatore per misurare la permeabilità all'aria del fabbricato, mettendo esplicitamente in guardia dal confondere una specifica "di carta" con una prestazione verificata. Gli schemi tecnici ATTMA (TSL1/TSL2), largamente adottati in Europa, precisano set-up, incertezze e criteri di validazione del test per edifici semplici e complessi. Inserire il test nei capitolati e, prima ancora, progettarlo, significa vincolare ogni nodo di tenuta a un obiettivo misurabile, riducendo il rischio di dispersioni latenti. Anche la termografia a infrarossi, impiegata secondo la UNI EN 13187:1999, consente di individuare in modo qualitativo discontinuità dell'isolamento, difetti di posa e infiltrazioni localizzate, offrendo un riscontro precoce su dettagli che i modelli semplificano.

L'effetto energetico di tenute d'aria scadenti, causate da situazioni di progetto, è ampiamente documentato. Il *National Institute of Standards and Technology* (NIST), una agenzia federale degli Stati Uniti che svolge ricerca applicata, sviluppa metodi e strumenti di misura e pubblica linee guida tecniche, da anni studia l'effetto dell'infiltrazione d'aria sui consumi energetici, producendo banche dati, modelli e studi di simulazione che sono diventati riferimenti internazionali. Tali analisi mostrano come infiltrazione, funzione di clima, tenuta dell'involucro e modalità d'esercizio degli impianti possano vanificare i risparmi calcolati con assunzioni standard oppure di natura progettuale. L'evidenza è chiara: tenute all'aria scadenti possono annullare una parte rilevante dei risparmi attesi "sulla carta".

In studi storici su uffici statunitensi, Emmerich e Persily hanno mostrato con simulazioni multizona che l'infiltrazione, governata da clima, ermeticità dell'involucro e modalità d'esercizio degli impianti, incide sensibilmente sui carichi di riscaldamento e raffrescamento; in pratica, se nei modelli di progetto si assumono perdite d'aria troppo basse, i consumi reali rischiano di superare sistematicamente le previsioni.

Il NIST ha inoltre quantificato il "peso" nazionale in USA dell'infiltrazione di aria: secondo stime richiamate nei loro report, l'aria che filtra attraverso l'involucro rappresentava circa il 6% dell'energia totale usata dagli edifici commerciali negli Stati Uniti (anno 2010), a testimonianza di un impatto non marginale.

Proprio per affrontare questo problema, il NIST ha sviluppato correlazioni meteo-dipendenti (*NIST infiltration correlations*) che permettono di impostare nei software energetici, impiegati in fase di progetto, dei profili di

infiltrazione più realistici rispetto ai coefficienti standard, con benefici evidenti sulla qualità delle stime. Valori di progetto per gli indici n_{50} (ricambi/ora a 50 Pa) o q_{50} (portata di fuga per metro quadrato di involucro a 50 Pa) troppo “bassi per default” non sono neutri. Se in progetto si assume, senza misure a supporto, un’infiltrazione molto inferiore alla realtà, l’equilibrio energetico dell’edificio si sposta: aumentano i carichi termici reali, cambiano i regimi di ventilazione/infiltrazione effettivi e le rese impiantistiche si discostano da quelle ipotizzate. Tale situazione diventa un errore “di input” che si propaga a valle e che i modelli, da soli, non possono correggere.

Le evidenze raccolte in studi e manuali operativi confermano inoltre che la “geometria del giunto”, parte dello sviluppo dei dettagli costruttivi e nodi tecnologici dell’involucro edilizio in sede di progettazione esecutiva, è cruciale: piccole incertezze dimensionali e interruzioni della continuità isolante (ad esempio a bordo finestra) hanno effetti diretti su valori di trasmittanza termica (U) *in situ*, ponti termici e comfort locale.

Per comprendere perché i dettagli costruttivi contino così tanto, è utile chiarire cosa si intende con “geometria del giunto”. Con questa espressione si indica la forma e la disposizione degli strati in corrispondenza delle interfacce tra elementi (per esempio il bordo finestra, l’attacco tra pannelli prefabbricati, il passaggio di un impianto), comprese le tolleranze dimensionali e la continuità effettiva di materiali isolanti, barriere all’aria e finiture. In questi punti il flusso di calore non attraversa più una parete “piana” ma si concentra e devia: è il fenomeno del ponte termico, che si descrive con grandezze come la trasmittanza termica lineica Ψ [$W/m \cdot K$] o, nei nodi puntuali, la trasmittanza puntuale χ [W/K]².

In altre parole, piccole variazioni di forma, spessori o continuità negli strati funzionali possono modificare in modo sensibile sia la U *in situ* sia la temperatura superficiale locale, con ripercussioni sulla dispersione e sul comfort.

Quando il giunto è imperfetto – per esempio un vuoto o una disallineatura dell’isolante a bordo finestra, un’interruzione della barriera all’aria al passaggio di un impianto o un giunto prefabbricato con tolleranze non presidiate – il risultato è duplice: da un lato il calore aggira l’isolante e aumenta la quota di scambio lungo il nodo (ponte termico conduttivo) e, dall’altro, la discontinuità può attivare *by-pass* d’aria, cioè micro-percorsi convettivi che fanno “scorrere” aria più calda o più fredda dentro lo spessore, aumentando ulteriormente

² Gli standard internazionali forniscono sia il metodo dettagliato (modellazione 2D/3D) per calcolare temperature superficiali e flussi nei giunti, sia metodi semplificati con valori di riferimento: la norma UNI EN ISO 10211:2018 definisce la procedura numerica per valutare Ψ/χ e le temperature minime superficiali, mentre la UNI EN ISO 14683:2018 raccoglie metodi semplificati e valori di default per i ponti più ricorrenti.

le perdite. La ricerca applicata ha mostrato che questi fenomeni sono reali e possono essere sostanziali, come documentato da indagini sperimentali e modellazioni su giunti e partizioni in diversi sistemi costruttivi.

Gli effetti energetici e igrotermici di una geometria di giunto non ottimale non si fermano alla dispersione. Un nodo con temperatura superficiale troppo bassa può portare a condensa superficiale e favorire la crescita di muffe; la norma UNI EN ISO 13788:2013 propone metodi semplificati per stimare la temperatura interna limite e il rischio di condensa, evidenziando come la correzione dei ponti termici aiuti non solo i kWh ma anche la salubrità degli ambienti. Per gli elementi opachi, inoltre, la UNI EN ISO 6946:2018 ricorda che la U “di progetto” si basa su strati continui e omogenei: qualsiasi interruzione reale (per esempio fissaggi, inserti, cavità) richiede adattamenti del modello o la valutazione esplicita dei contributi di ponte termico, pena una sottostima sistematica della dispersione.

Sul fronte delle finestre e dei loro bordi di installazione, gli standard dedicati confermano la centralità della geometria del giunto. La UNI EN ISO 10077-2:2018 definisce il calcolo numerico della trasmittanza del telaio e della trasmittanza lineica di installazione (la cosiddetta “ Ψ -installazione” al contatto tra telaio e vetro o pannello), proprio per catturare gli effetti del dettaglio costruttivo sul flusso di calore. Un posizionamento non corretto del telaio nello spessore, un distacco dell’isolante in mazzetta o una discontinuità dei nastri di tenuta possono peggiorare significativamente il valore complessivo di U *in situ* del serramento e generare discomfort locale (zone fredde, correnti parassite). L’uso congiunto di UNI EN ISO 10211:2018 per i ponti termici, UNI EN ISO 10077-2:2018 per i telai e UNI EN ISO 9869-1:2015/ UNI EN 13187:1999 per la verifica in opera consente di chiudere il ciclo progetto-cantiere-collaudato con evidenze misurabili.

In prospettiva operativa, questo significa che la “geometria del giunto” va decisa e provata, non lasciata alle interpretazioni in cantiere. Nei progetti esecutivi occorre esplicitare la linea di continuità dell’isolamento e delle barriere, le tolleranze ammissibili, i materiali e le sequenze di posa; nei capitoli vanno indicate le prove e i criteri di accettazione; in fase di collaudo servono misure in campo per confermare che la prestazione “attesa” sia stata effettivamente ottenuta. La ragione fisica è semplice e consolidata: nei giunti, pochi millimetri contano. La ragione normativa è altrettanto chiara: gli standard internazionali forniscono metodi per calcolare, misurare e documentare questi effetti, riducendo l’incertezza e rendendo la qualità esigibile. Inoltre, si evidenzia che molti gap nascono da progetti esecutivi che non “chiudono” le interfacce. Mancano tavole e specifiche che rendano inequivoca la continuità dell’isolamento e dei freni al vapore, che definiscano tolleranze costruttive, tenute ai passaggi impiantistici e requisiti di prova. La

letteratura internazionale sul *rework* identifica proprio nella incompletezza degli elaborati tecnici e nella scarsa gestione delle modifiche le cause più frequenti di rilavorazioni, ritardi e costi extra. È nella fase esecutiva che bisogna tradurre le prestazioni attese in dettagli costruttivi con responsabilità chiare su chi disegna, chi coordina e chi verifica.

Il tema non è solo “quantità” di disegni, ma qualità informativa. La serie UNI EN ISO 19650 sul *management* informativo in BIM, e in particolare la guida applicativa del Regno Unito, offre un lessico e un processo per impostare requisiti informativi, ruoli, scambi e consegne lungo la *delivery*. Ciò aiuta a specificare cosa deve essere deciso e verificato in ogni fase, riducendo ambiguità che si trasformano in difetti.

Un tassello complementare è il già citato standard europeo *Level of Information Need* (UNI EN 17412-1:2020), che aiuta a definire in modo proporzionato il contenuto informativo (geometrie, alfanumerici, documenti) che ogni attore deve produrre e scambiare. Applicarlo ai nodi dell’involucro significa, per esempio, chiarire quali parametri termofisici, tolleranze e schemi di posa vanno consegnati per permettere verifiche in cantiere e in collaudo.

Infine, una causa classica di errori di progettazione è il “mancato coordinamento” o *misunderstanding* tra i progettisti. Gli attraversamenti dell’involucro, gli appoggi dei serramenti su telai strutturali, le staffe di facciata e i percorsi impianti sono spesso trattati in modo separato, con l’effetto di lasciare scoperte le linee di tenuta all’aria e di continuità isolante.

Come ampiamente descritto nel Capitolo 3, l’adozione coerente del BIM come processo (non come solo modello) richiede un ambiente di condivisione (CDE), regole per lo scambio, e standard aperti. Le guide del *UK BIM Framework* dedicano capitoli specifici all’uso di *openBIM* e COBie, offrendo indicazioni operative su come pianificare scambi, verifiche e consegne dati per l’uso e la manutenzione, in coerenza con UNI EN ISO 19650. COBie, standard aperto per i dati patrimoniali, è pensato proprio per evitare che i parametri energetici critici vadano persi tra progetto e gestione. Definisce schema, regole e test di qualità per consegnare in modo strutturato attrezzature, schemi di regolazione, caratteristiche di resa e riferimenti di tatura, facilitando l’integrazione nei sistemi di gestione (CAFM/CMMS)³. La sua ampia adozione e le risorse ufficiali (NIBS; *buildingSMART*) lo rendono un riferimento per la consegna *as-built* orientata all’operatività.

A livello di committenza pubblica, l’*Handbook dell’EU BIM Task Group* indica come definire “Requisiti Informativi del Committente” (EIR, *Exchange Information Requirements/AIR, Asset Information Requirements*) e

³ Vedi Capitolo 3.2.

assegnare ruoli e responsabilità lungo il ciclo di vita; se questi requisiti mancano, le discipline lavorano “al buio” e le consegne finiscono per essere disallineate alle reali esigenze di esercizio.

Un secondo ceppo di errori di progetto, non meno importante, riguarda le ipotesi di calcolo. Molti modelli assumono profili d’uso, rendimenti, recuperi di calore e set-point di controllo semplificati, poco rappresentativi del funzionamento reale dell’edificio. Le linee guida, precedentemente citate, CIBSE TM54 aiutano a stimare l’energia operativa già in fase di progettazione, facendo lavorare il team su scenari e analisi di sensitività; quando si entra in esercizio, CIBSE TM63 fornisce invece un quadro per calibrare i modelli con dati misurati e svolgere una “diagnosi” delle cause dello scostamento tra previsione e realtà. Questo passaggio, dal “modello ideale” al “modello aderente ai dati”, è ciò che rende verificabili i target energetici in uso. Nel progettare edifici ad alte prestazioni, inoltre, non si può ignorare il ruolo degli utenti. L’*Annex 66* del programma IEA-EBC ha costruito una tassonomia e dei metodi per rappresentare in modo coerente le interazioni degli occupanti con involucro e impianti (aperture, set-point, apparecchiature, ecc.), mostrando quanto assunzioni “medie” possano generare scarti rilevanti nelle simulazioni. Integrare nei modelli profili realistici e parametri sensibili al comportamento riduce il rischio di sovra o sottostima dei consumi.

Nella parte introduttiva di questa sezione è stata citata l’importanza di adozione di un Piano di Misurazione e Verifica (M&V). Infatti, un errore frequente da non commettere è progettare l’edificio senza “progettare” il sistema di misura delle prestazioni. Se la modalità di misurazione non è pensata dall’inizio, il modello non è calibrabile: le zone termiche del simulatore non corrispondono ai sotto contatori, i punti di acquisizione mancano, i dati non sono abbastanza granulari per diagnosticare.

La buona pratica internazionale suggerisce di impostare un Piano M&V coerente con l’IPMVP già in fase progettuale, e di usare le linee guida FEMP 5.0 (DOE) come riferimento operativo, soprattutto per progetti a prestazione e gare in cui i risultati in uso sono contrattualizzati. In questo modo, target e responsabilità diventano tracciabili e le incertezze vengono dichiarate.

4.3.2. Errori di costruzione

Nel cantiere, la qualità energetica non dipende solo da buone scelte progettuali o dall’impiego di componenti performanti, ma soprattutto da come vengono realizzati nodi e installazioni, da come vengono gestite le interfacce e le tolleranze, nonché da quanto le squadre riescono a trasformare i disegni esecutivi in un manufatto continuo, ermetico e coerente.

Gli errori di esecuzione che si insinuano “sotto traccia” durante le lavorazioni emergono spesso più tardi, sotto forma di consumi inattesi, discomfort o necessità di rilavorazioni. La letteratura internazionale, i rapporti tecnici e le rassegne di difetti in opera convergono su un punto: la fase esecutiva è un generatore critico sia di extra-costi e ritardi (per rifacimenti, varianti, contestazioni) sia di scostamenti energetici fra edificio previsto e edificio reale.

Il primo grande ambito di errore riguarda l’involucro edilizio – pareti, coperture, serramenti, attacchi e connessioni – dove anche piccoli scarti geometrici o discontinuità negli strati funzionali si traducono in dispersioni e ponti termici persistenti.

Ricerche scientifiche – tra cui il progetto H2020-INSITER, da cui nasce questa pubblicazione – hanno evidenziato come diverse criticità costruttive possano compromettere le prestazioni reali degli edifici. Discrepanze geometriche, giunti non serrati correttamente, discontinuità nell’isolamento o sigillature assenti o irregolari generano infatti “vuoti” che facilitano l’ingresso di aria e umidità, riducendo la trasmittanza termica effettiva *in situ*.

Sono ricorrenti anche gli errori alle interfacce, in particolare nei punti critici come il bordo finestra, i passaggi impiantistici e i giunti di elementi o componenti prefabbricati, dove la continuità dell’isolamento e della barriera all’aria risulta più vulnerabile. Queste famiglie di difetti sono associate a effetti misurabili in termini di dispersione, comfort locale e rischio di condensa.

Tra i meccanismi più insidiosi vi è il by-pass termico: non si tratta soltanto del calore che attraversa un materiale, ma di moti d’aria non previsti che scorrono attraverso, dietro o lungo l’isolante a causa di micro-fessure, cavità o percorsi laterali.

Queste ricerche hanno contribuito a far emergere il tema del *performance gap as-built* e a documentare come gli errori di posa e di dettaglio amplifichino le dispersioni anche in edifici con involucri nominalmente ben isolati e ben progettati.

L’infiltrazione d’aria, cioè il passaggio non intenzionale attraverso l’involucro, è un altro fattore-chiave che nasce in cantiere: sigillature non continue attorno ai telai, cassonetti, giunti prefabbricati o attraversamenti impiantistici, unitamente a tolleranze non presidiate, creano vie preferenziali per l’aria.

Gli studi del *National Institute of Standards and Technology* (NIST), l’agenzia federale statunitense che sviluppa metodi e strumenti di misura, stimano da tempo l’impatto energetico dell’infiltrazione negli edifici per uffici: analisi su stock rappresentativi indicano contributi dell’ordine del 13% dei carichi di riscaldamento e una quota non trascurabile dei carichi estivi,

evidenziando quanto ipotesi troppo “ottimistiche” di tenuta all’aria in fase di progetto possano portare a consumi reali superiori. Il dato, consolidato in successive pubblicazioni e strumenti del NIST, è rilevante proprio perché ricondotto a cause di natura esecutiva: continuità e tenuta dei giunti.

Un sottoinsieme frequente di errori riguarda le installazioni dei serramenti: posizionamento non corretto nello spessore della parete, rientranze e mazzette non coibentate, nastri e guarnizioni interrotti o non compressi come previsto. Anche pochi millimetri di disallineamento possono alterare i campi di temperatura superficiale, innescando discomfort (zone fredde, correnti parassite) e aumentando la trasmittanza termica (U) “in opera” del sistema finestra. Documenti tecnici su ponti termici e telai richiamano proprio l’importanza della geometria del giunto e del trattamento dei fissaggi metallici, i quali possono agire da ponti conduttivi se non opportunamente mitigati.

Va ricordato, inoltre, il ruolo dell’umidità di cantiere: l’isolante bagnato o stoccato in condizioni improprie, le cavità esposte alla pioggia durante fasi intermedie, l’assenza di protezioni temporanee o di tempi di asciugatura compatibili con i materiali, producono degradi prestazionali duraturi e, in alcuni casi, patologie (muffe) che costringono a interventi successivi. Rapporti tecnici del *Building Research Establishment* (BRE) e indagini su casi post-installazione (ad esempio per cappotti esterni su edilizia esistente) descrivono proprio catene causali tipiche: materiali umidi, dettagli non isolati in corrispondenza di imbotti e spigoli, lavorazioni in condizioni meteo avverse che sfociano in dispersioni maggiori, degrado dei rivestimenti e richieste di rifacimento con evidenti impatti su tempi e costi.

La crescita di soluzioni prefabbricate (*off-site*) degli ultimi decenni, in tutta Europa e non solo, ha migliorato molti aspetti di qualità, ma ha reso ancora più sensibili i giunti di assemblaggio. L’esperienza maturata in numerosi cantieri mostra che, anche quando i componenti prefabbricati sono correttamente realizzati, in fase di montaggio possono non combaciare come previsto a causa di tolleranze che si sommano, allineamenti non controllati o danneggiamenti avvenuti durante il trasporto; ciò genera fessurazioni e discontinuità nei punti finiti dell’involucro – facciate, attacchi a terra e coperture – con effetti negativi sulla continuità termica e sulla tenuta all’aria.

A valle, la non perfetta “geometria del nodo” moltiplica i ponti termici e apre varchi all’aria. La letteratura tecnico-operativa segnala cause organizzative ricorrenti: interpretazioni errate degli elaborati, impiego di materiali non conformi alle specifiche, posizionamenti impropri dei componenti e passaggi di cantiere omessi o svolti in modo incompleto. Queste criticità alimentano rilavorazioni e varianti, con inevitabili ricadute sui tempi (ri-lavorare giunti critici, riprendere sigillature, sostituire pannelli), sui costi extra

(noli, ponteggi, scarti di materiale, ore-uomo) e con una deriva energetica (perdite nei punti “rifatti” in emergenza, soluzioni di fortuna che rimangono definitive).

La letteratura metodologica sui nodi di interfaccia mette in evidenza che i giunti tridimensionali sono, statisticamente, le zone più vulnerabili a errori con ricadute sulla prestazione energetica. Le criticità ricorrenti riguardano soprattutto la configurazione geometrica del nodo, la continuità dell’isolamento e la tenuta all’aria.

Sul versante impiantistico, alcuni errori di cantiere hanno effetti diretti su consumi e comfort. Nelle reti aerauliche, la perdita d’aria lungo le canalizzazioni – dovuta a giunzioni non serrate, applicazioni di nastro adesivo provvisorie mai sostituite, micro-fori e fessure, serrande non correttamente alloggiare – riduce la portata utile, altera le pressioni di progetto e costringe i ventilatori a funzionare più a lungo o a carichi maggiori; a ciò si aggiunge la conduzione termica attraverso tratti non isolati o con isolamento danneggiato.

Studi e rassegne internazionali mettono in relazione le classi di tenuta dei condotti con penalità energetiche rilevanti, riconosciute anche dai manuali ASHRAE e da rapporti recenti sul parco terziario. È un tipico esempio di errore esecutivo che genera doppio costo: si spreca sia l’energia dei ventilatori sia l’energia termica per riscaldare/raffrescare portate che poi non arrivano agli ambienti.

Nelle reti idroniche, gli effetti emergono quando gli isolamenti mancano nei tratti “caldi” o “freddi” (colonne, dorsali, attraversamenti), quando valvole e organi di regolazione sono installati in posizioni difformi dai disegni o quando spurghi e pulizie preliminari sono lacunosi: le temperature di ritorno si alzano, i generatori modulano fuori campo ottimale, l’energia distribuita non coincide più con quella prevista ai terminali. Anche qui l’impatto è *triple-face*: comfort disomogeneo, consumi maggiori, rilavorazioni per riprendere la posa o sostituire tratti.

Un’ulteriore fonte di scostamenti sono le interferenze tra impianti e involucro: fori imprevisi o sovradimensionati per passaggi, non corretti dal punto di vista della sigillatura, diventano sedi strutturali di infiltrazioni; stoffaggi metallici passanti o ponti meccanici possono interrompere la continuità dell’isolamento e trasferire calore. Le ricognizioni di cantiere includono “liste di errori” ormai note: attraversamenti non trattati, componenti danneggiati in posa, montaggi in conflitto con il progetto e materiali non idonei. Tutti elementi che si sommano, in esercizio, a consumi extra e a costi di correzione.

Agli aspetti sopra menzionati si aggiunge un tema emergente e rilevante legato alle automazioni e sensoristiche che contraddistinguono gli edifici di

nuova generazione. Quando i sensori sono collocati vicino a fonti di calore o di irraggiamento, o quando gli attuatori hanno limiti di corsa non coerenti con i componenti reali, le logiche di controllo lavorano su segnali distorti: i set-point risultano non rispettati, i cicli on/off aumentano e il sistema consuma di più per inseguire una condizione mal percepita. Anche l'implementazione parziale o disallineata delle logiche di supervisione (BMS) rispetto alle ipotesi progettuali è un errore di cantierizzazione digitale: la strategia “esiste” su carta, ma non è quella effettivamente programmata in campo. La conseguenza, oltre agli *overrun* energetici, è una spirale di interventi correttivi dopo il collaudo che allunga tempi e budget. Questi fenomeni sono documentati in manuali tecnici e casi di studio sul *fault impact* negli edifici commerciali, dove impianti tecnici dell'edificio (per esempio unità di trattamento aria, ventilatori, pompe, caldaie, gruppi frigo, recuperatori, estrattori di parcheggi, illuminazione di aree non di sicurezza) restano accesi e in marcia quando gli ambienti sono vuoti (di notte, nel weekend o durante fasce orarie non operative) generando perdite nei condotti le quali diventano cause principali di sprechi. In pratica, l'edificio continua a ventilare, riscaldare/raffrescare o movimentare fluidi senza alcun bisogno reale, accumulando consumi che non portano alcun beneficio agli utenti.

Un altro errore tipico di “processo” che nasce in cantiere è la documentazione incoerente o incompleta: assenza di schemi aggiornati, curve caratteristiche dei componenti non allegate, parametri effettivamente impostati non registrati, etichettature carenti dei punti di misura. La conseguenza non è solo gestionale: in mancanza di una tracciabilità minima, i consumi reali non si riescono a ricondurre a cause puntuali e le correzioni diventano tentativi. Le esperienze raccolte da *NIBS/buildingSMART* su COBie – il tracciato dati per il passaggio delle informazioni dall'opera al gestore – spiegano proprio che la “consegna informativa” è parte integrante della qualità del prodotto edilizio: quando manca, aumentano interventi ex post, fermi impianto e costi di diagnosi.

Sulla base di quanto introdotto, il *rework* è la conseguenza più tangibile degli errori di cantierizzazione: rifare un nodo, riaprire una facciata per correggere una sigillatura, smontare e rimontare tratti di impianto, riposizionare sensori. Studi longitudinali e rapporti di settore mostrano come il *rework* pesi in modo sistematico su tempi e costi, in particolare se attuato in fase avanzata di cantiere, arrivando a rappresentare quote percentuali rilevanti del budget.

Infatti, le analisi della *Navigant Construction Forum* e del *Construction Industry Institute* stimano costi diretti medi dell'ordine di alcuni punti percentuali del costo totale, a cui vanno aggiunti gli effetti indiretti (ritardi, *claims*, perdita di produttività). Questo “doppio conto” ha anche un riflesso

energetico: le soluzioni temporanee adottate per “far tornare il programma” e i compromessi presi in corsa lasciano spesso ponti e perdite che si trascinano in esercizio.

Oltre agli esempi sopra presentati, se si percorre la linea che va dal difetto alla conseguenza emergono traiettorie ricorrenti.

La discontinuità dell’isolamento e i ponti termici di posa nascono tipicamente da tempi stretti, assenza di *mock-up* di nodo e coordinamento carente tra figure tecniche; generano dispersioni locali e condense che non solo peggiorano le prestazioni ma innescano rilavorazioni (rifacimento rasature, sostituzione componenti), con ritardi e costi aggiuntivi. La tenuta all’aria insufficiente deriva da dettagli non trasferiti in campo, fori non riconfigurati o sigillature irregolari: in esercizio produce carichi termici maggiori, umidità non controllata e correzioni successive.

Le perdite e gli squilibri delle reti aria/acqua provengono da subappalti frammentati e assenza di coerenza fra elaborati e posa: in uso diventano rendimenti stagionali inferiori e comfort disomogeneo, cui seguono interventi tardivi e varianti.

La sensoristica mal posata e le logiche non implementate creano cicli di settaggio e ri-programmazione dopo l’apertura, con settimane aggiuntive di presidio tecnico e consumi extra nel frattempo.

Infine, la documentazione di consegna lacunosa rende la gestione reattiva, allunga le diagnosi e rende più probabili scelte operative “di compromesso” che si portano dietro sprechi energetici.

Collocati in sequenza, i fattori sopra delineati spiegano perché, pur a disegni conformi, si osservi il divario tra prestazioni previste e misurate: l’involucro eseguito con discontinuità e vie d’aria si comporta peggio del modello; gli impianti con perdite e tarature incoerenti richiedono più energia per garantire le stesse condizioni; la complessità delle interfacce e le carenze documentali aumentano i tempi e spingono verso soluzioni provvisorie che restano.

Le rassegne di *Zero Carbon Hub*⁴ sul *closing the gap* hanno mostrato proprio come il cantiere sia uno dei luoghi principali di generazione del *performance gap*, con evidenze su bypass termici, inerzie esecutive e scelte di dettaglio che ribaltano l’esito energetico finale. A supporto, gli studi NIST quantificano l’impatto dell’aria “indesiderata” e i lavori sulle perdite nei condotti chiariscono il peso delle reti incomplete. È la combinazione di queste variabili che produce, per cumulo, consumi superiori, ritardi, reclami e costi.

⁴ Zero Carbon Hub è stato un organismo britannico attivo tra il 2008 e il 2016, sostenuto da governo e industria, con l’obiettivo di promuovere edifici a zero emissioni. Ha prodotto rapporti fondamentali sul *performance gap* tra prestazioni progettate e reali degli edifici.

Le cause di questi errori non hanno solo una natura tecnica. La filiera europea delle costruzioni è altamente frammentata in un processo edilizio spesso lungo, complesso e caratterizzato da numerosi attori (si rimanda al Capitolo 2) e composta in prevalenza da realtà imprenditoriali di minori dimensioni – micro, piccole e medie imprese –, con filiere di subappalto lunghe e disomogenee. Inoltre, l'*European Construction Sector Observatory* segnala che la digitalizzazione procede a velocità differenziate e che le barriere più citate sono mancanza di competenze e consapevolezza, oltre ai costi iniziali; il risultato è che strumenti e processi digitali faticano a tradursi in prassi quotidiane sul campo ritardando il loro supporto alla riduzione del gap prestazionale. In parallelo, l'Europa registra carenze di manodopera e *skill mismatch* crescenti: secondo la *Fédération de l'Industrie Européenne de la Construction* (FIEC) e la *European Labour Authority* (EURES/ELA) le carenze nel comparto sono oggi quasi triplicate rispetto a dieci anni fa, con effetti diretti sulla qualità dell'esecuzione, sulla capacità di gestire interfacce complesse e sulla tenuta dei tempi.

Queste condizioni strutturali alimentano proprio il terreno in cui gli errori di cantierizzazione attecchiscono e si moltiplicano.

4.3.3. Persistenza del performance gap energetico e cause sistemiche

Nonostante il rapido avanzamento di strumenti e procedure digitali lungo l'intero ciclo di vita dell'opera, la letteratura più recente conferma la persistenza di un divario significativo tra le prestazioni attese in progetto e quelle misurate in esercizio, soprattutto sul piano energetico.

Questo *building energy performance gap* (divario di prestazione energetica dell'edificio) presenta ampiezza variabile a seconda della destinazione d'uso, del contesto climatico e delle ipotesi di calcolo adottate, ed è il risultato dell'intreccio di più fattori: semplificazione nei modelli, qualità dell'esecuzione, procedure di messa in servizio (*commissioning*), gestione in esercizio e comportamento degli occupanti. Le rassegne più autorevoli e i lavori di riferimento mettono in evidenza la natura “multicausale” di tale gap.

Il quadro è coerente con il nuovo recepimento della Direttiva europea sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD rivista 2024/1275), che chiede di collegare i calcoli di progetto ai consumi effettivamente misurati e di rappresentare meglio le condizioni operative reali, includendo esplicitamente il comportamento dell'utente nella valutazione delle prestazioni energetiche. In pratica, non basta un modello “a norma”: occorre dimostrare come l'edificio performa in uso.

Tra le cause più documentate del gap emerge il comportamento degli occupanti (*occupant behaviour*): utilizzo degli impianti, apertura delle finestre,

valori di regolazione (set-point) adottati, intensità e modalità d'uso delle apparecchiature “non regolamentate”. La comunità internazionale IEA-EBC, con l'*Annex 66*, ha sviluppato un lessico condiviso, insiemi di dati e metodi per descrivere in modo coerente queste interazioni e per integrarle nei modelli energetici, proponendo anche approcci di calibrazione che rendono trasparente l'incertezza associata alle scelte d'uso.

Ridurre il gap significa spostare l'attenzione dall'“intento di progetto” alle prestazioni effettivamente osservate in esercizio. Se ci si interroga sulle ragioni della persistenza del gap, nonostante la maturità degli strumenti disponibili, emergono vincoli organizzativi e di capacità che ostacolano la piena attuazione della transizione digitale nel settore AECO (*Architecture, Engineering, Construction & Operations*).

I report dell'*European Construction Sector Observatory* (ECSO) evidenziano come la filiera edilizia resti tra le meno digitalizzate, con forti differenze tra Paesi e tra imprese di diversa dimensione. Molte Piccole e Medie Imprese (PMI) incontrano difficoltà a investire in competenze, infrastrutture digitali e processi collaborativi necessari per sfruttare BIM (metodo informativo), CDE (ambiente comune di dati) e sistemi di sensorizzazione e *Information Communication Technologies* (ICT) in esercizio. Il risultato tipico è rappresentato da consegne informative incomplete, scarsa tracciabilità delle ipotesi di calcolo e difficoltà a chiudere il ciclo dati-progetto-esercizio.

Le barriere di adozione sono particolarmente evidenti negli studi di progettazione di piccole dimensioni, che costituiscono la maggioranza del mercato: mancanza di competenze BIM, percezione elevata dei costi di transizione, complessità nell'allineamento lungo la *supply chain* e rapida evoluzione dei requisiti informativi pubblici.

L'*Handbook* dell'EU BIM Task Group sottolinea come sia necessaria una committenza capace di definire requisiti informativi, ruoli e responsabilità lungo il ciclo di vita; tuttavia, la sua attuazione rimane disomogenea. Gli studi su Paesi *late adopters* confermano che la combinazione di barriere tecniche e organizzative nelle PMI rallenta l'adozione e ne attenua i benefici su qualità e costi.

A tali difficoltà si sommano carenze strutturali di manodopera e *mismatch* di competenze. Analisi della Federazione dell'Industria Europea delle Costruzioni (FIEC) e rapporti EURES/ELA documentano carenze persistenti di profili professionali qualificati nel settore edilizio nell'UE, con impatti diretti sulla qualità dell'esecuzione e sulla capacità delle imprese di attuare procedure digitali di controllo, tracciabilità e *commissioning*. In Italia e in altri Paesi si moltiplicano iniziative e accademie aziendali volte a colmare i gap, segnali positivi ma non ancora sufficienti rispetto al fabbisogno di *upskilling* nelle filiere regionali e nelle PMI.

Un ulteriore fattore è la cosiddetta “frizione d’uso” degli edifici ad alto contenuto tecnologico. La crescente complessità dei sistemi *Building Management System* (BMS), delle logiche di controllo e delle interfacce utente può generare prestazioni inferiori al potenziale se gli utenti non sono formati o se i set-point si discostano dai valori di progetto. Oltre alla già citata EPBD rivista 2024/1275, la letteratura tecnico-scientifica sull’*occupant behaviour* evidenzia come programmi di training, feedback costante e coinvolgimento attivo degli utenti riducano in maniera significativa gli scostamenti, mentre la loro assenza conduce a derive nei consumi rispetto alle attese.

In sintesi, monitoraggio, feedback e periodiche ri-tarature si confermano strumenti essenziali per ridurre il *performance gap*.

4.4. Qualità, responsabilità e prestazioni: una sintesi operativa

Le evidenze emerse sulle cause del *performance gap* – dalle assunzioni progettuali troppo ottimistiche agli errori di posa che generano ponti termici e vie d’aria, fino agli impianti non tarati e alle logiche di controllo non trasferite in campo – dimostrano che la qualità si costruisce lungo una “catena” unica che connette obiettivi, informazioni, decisioni tecniche e risultati in uso.

Un primo passaggio decisivo consiste nello spostare l’attenzione dai soli indicatori “di progetto” agli obiettivi energetici operativi. Schemi *outcome-based* come *NABERS UK – Energy for Offices* e il percorso *Design for Performance* fissano un traguardo espresso sui consumi reali di 12 mesi, con regole chiare su perimetro, orari e copertura di misura, prevedendo revisioni indipendenti a supporto del raggiungimento del rating in esercizio. Questo approccio riallinea gli incentivi lungo la filiera e riduce l’ambiguità tra simulazioni e realtà.

La qualità dell’involucro resta il fondamento della prestazione. In fase contrattuale, è ormai prassi internazionale ancorare le ipotesi di progetto a prove oggettive: la UNI EN ISO 9972:2015 definisce la misurazione in campo della permeabilità all’aria con pressurizzazione/depressurizzazione del fabbricato, mentre gli standard ATTMA TSL1/TSL2 armonizzano preparazione, esecuzione e reportistica per edifici semplici e complessi. Parallelamente, la UNI EN 13187:1999 chiarisce come condurre la termografia IR per l’individuazione qualitativa di discontinuità termiche. Collegare questi riscontri ai nodi “critici” di facciate, serramenti e passaggi impiantistici consente di trasformare valori assunti (n_{50} , q_{50}) in prestazioni verificabili.

Sul fronte impiantistico, il *commissioning* avviato sin dalle prime fasi connette i requisiti del committente (*Owner’s Project Requirements*) alla progettazione (*Basis of Design*), fino ai test funzionali e alla consegna del

systems manual con formazione del gestore. Il quadro tecnico delineato da *ASHRAE Guideline 0* e *Standard 202*, insieme alle guide operative WBDG e GSA, descrive fasi, *deliverable* e responsabilità necessarie ad evitare il “corto circuito” fra ciò che viene modellato e ciò che è realmente programmato e regolato negli impianti.

La misurazione e verifica (M&V) rappresenta l’anello di chiusura che rende trasparenti i risultati in uso. L’*IPMVP – Core Concepts* (2022) fornisce principi, terminologia e opzioni standard per determinare i risparmi (definizione di *baseline*, aggiustamenti “routine” e “non-routine”, qualità e incertezza del dato), mentre le *FEMP M&V Guidelines v5.0* del Dipartimento dell’Energia USA traducono tali principi in istruzioni operative per contratti a prestazione (piani M&V, confini, misurazioni, gestione dei rischi). Inserire questi riferimenti negli atti di gara e nei contratti rende verificabili gli impegni e allinea le parti al risultato in uso.

La continuità informativa costituisce il fattore abilitante. L’*Handbook* dell’EU BIM Task Group indica alla committenza pubblica come definire requisiti informativi (EIR/AIR), ruoli e processi per garantire che i dati di progetto, cantiere ed esercizio rimangano collegati in un “filo d’oro” che sostiene conduzione, manutenzione e M&V. In questo quadro, schemi interoperabili come COBie strutturano la consegna dei dati patrimoniali (asset, parametri, tarature, punti di misura), riducendo i vuoti informativi che alimentano costi e inefficienze in esercizio.

La prestazione in uso dipende anche dalle modalità di utilizzo dell’edificio. La comunità *IEA-EBC Annex 66* ha consolidato un lessico e metodi per rappresentare il comportamento degli occupanti nei modelli (presenza, interazioni con finestre, schermature e set-point, carichi “plug”), dimostrando come assunzioni semplificate portino scarti sistematici tra previsione e realtà. L’integrazione di scenari realistici e di parametri sensibili costituisce quindi un requisito essenziale della qualità progettuale.

Nonostante i metodi siano consolidati, difetti e gap permangono a causa di procedure e criticità organizzative. In Europa, la filiera delle costruzioni resta frammentata e la digitalizzazione avanza in modo disomogeneo: l’*European Construction Sector Observatory* documenta tra le principali barriere la carenza di competenze, la scarsa consapevolezza e i costi percepiti per l’adozione di tecnologie e processi digitali (BIM, CDE, ICT, ecc.), con effetti più marcati nelle PMI. Queste condizioni limitano la capacità di definire requisiti informativi credibili, di coordinare le interfacce e di trasformare i controlli digitali in prassi quotidiane di cantiere.

La domanda pubblica ha un ruolo chiave nel colmare il divario: il già citato *EU BIM Task Group Handbook* ribadisce che leadership, requisiti chiari e sviluppo delle competenze sono essenziali per rendere scalabile

l'uso del BIM come processo e non solo come modello, garantendo che i dati necessari alla conduzione e alla M&V siano previsti e raccolti fin dall'avvio dei progetti. In assenza di tale regia, l'adozione resta lenta e disomogenea, soprattutto tra gli operatori più piccoli.

Sul piano tecnico-scientifico, il contributo del comportamento d'uso impone di connettere progettazione ed esercizio in un ciclo di apprendimento continuo: profili realistici in ingresso, misure affidabili in uscita, confronto sistematico tra dati e modelli. Anche da questa prospettiva, i risultati dell'*Annex 66* e le pratiche *outcome-based* come NABERS UK suggeriscono che il vero miglioramento si ottiene quando obiettivi, responsabilità e dati sono messi in relazione lungo l'intero il processo – dalla gara al cantiere, fino all'uso quotidiano dell'edificio.

In conclusione, la riduzione del *performance gap* richiede un patto esplicito tra qualità dell'involucro, coerenza tra progettazione-posa-controllo, obiettivi operativi verificabili e continuità informativa. Dove questi elementi sono presenti, le difformità si riducono, i tempi e i costi di realizzazione si stabilizzano, e i risultati energetici in uso diventano coerenti con le attese. Dove mancano, il disallineamento tra ciò che è stato progettato e ciò che viene costruito e gestito continua a produrre scarti, contenziosi e sprechi che la sola tecnologia non è in grado di risolvere.

5. Costruire un edificio energeticamente efficiente: indicatori di prestazione

5. Construction of Energy-efficient Buildings: Key Performance Indicators

This chapter examines the framework and methodologies for defining and applying performance indicators in energy-efficient buildings. It begins by outlining the European and Italian regulatory frameworks, with particular attention to the evolution of the EPBD directives and the national decrees that have progressively tightened the minimum requirements for building performance.

The discussion then turns to specific indicators such as non-renewable primary energy consumption, renewable energy share, thermal transmittance, airtightness, summer performance, daylight availability, and smart readiness, each of which is presented as a critical parameter for assessing efficiency, user comfort, and environmental quality.

Finally, the chapter addresses aggregated performance indicators, which integrate multiple dimensions – energy, comfort, indoor air quality, and smart control – into comprehensive evaluation tools. By embedding these indicators into both design and operational phases, it becomes possible to link regulatory compliance, technological innovation, and user-centered performance assessment, thereby supporting both new construction and deep renovation strategies in the broader pursuit of climate neutrality.

Keywords: *energy performance indicators, EPBD, building regulations, comfort, smart readiness, aggregated KPIs, energy efficiency*

L'attenzione verso l'efficienza energetica nel settore edilizio non è soltanto il riflesso di un'evoluzione normativa, ma rappresenta un vero e proprio cambiamento di paradigma che coinvolge l'intero ciclo di vita dell'opera, dalla fase di concezione progettuale fino alla gestione in esercizio. Gli edifici, responsabili di una quota significativa dei consumi energetici e delle emissioni di gas climalteranti, sono al centro delle strategie europee e nazionali di decarbonizzazione. Le più recenti direttive e regolamenti comunitari – fra cui la rifusione della EPBD, nota anche come Direttiva “Case Green” – spingono verso standard sempre più ambiziosi, chiedendo non solo di ridurre i consumi, ma anche di integrare fonti rinnovabili, migliorare il comfort interno e garantire livelli più elevati di monitoraggio e controllo.

In questo contesto, il ricorso a indicatori di prestazione energetica (*Key Performance Indicators*, KPI) diventa indispensabile. Essi consentono di tradurre esigenze e obiettivi, a volte complessi e multidimensionali, in parametri misurabili, comparabili e verificabili. Non si tratta, quindi, di meri strumenti di controllo, ma di vere e proprie leve per guidare scelte progettuali, verificare la conformità normativa, misurare la qualità delle soluzioni adottate e supportare la gestione in esercizio.

La definizione di un set di indicatori coerente e condiviso permette inoltre di ridurre l'asimmetria informativa tra i diversi attori del processo edilizio – progettisti, imprese, committenti, gestori – favorendo un linguaggio comune e un sistema di valutazione trasparente. Ciò è particolarmente rilevante nei progetti di riqualificazione energetica, dove la misurazione puntuale delle prestazioni consente di dimostrare l'efficacia degli interventi e di accedere a forme di incentivazione economica legate ai risultati conseguiti.

Un aspetto chiave riguarda anche l'evoluzione verso indicatori aggregati, in grado di integrare dimensioni tra loro interdipendenti: consumi energetici, comfort termoigrometrico e acustico, qualità dell'aria interna, illuminazione naturale e “prontezza digitale” degli edifici. Questi strumenti aprono la strada a valutazioni più complesse e sistemiche, capaci di andare oltre la mera efficienza energetica per abbracciare il benessere dell'utente, la sostenibilità ambientale e l'ottimizzazione dei costi di gestione lungo il ciclo di vita.

5.1. Quadro normativo di riferimento

L'efficienza energetica degli edifici è una leva decisiva per centrare gli obiettivi europei di decarbonizzazione. Nell'UE il costruito assorbe circa il 40% dei consumi energetici finali e genera il 36% delle emissioni climalteranti correlate all'energia. Inoltre, l'85% del parco è stato costruito prima del 2000 e tre quarti degli edifici presentano prestazioni insufficienti, a fronte di tassi di ristrutturazione ancora bassi. Questi dati spiegano perché il settore sia al centro del *Green Deal*¹ e della strategia *Renovation Wave*².

¹ Il *Green Deal* europeo è una strategia di crescita dell'Unione Europea presentata nel 2019, con l'obiettivo di rendere l'Europa il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050. Mira a trasformare l'UE in una società equa e prospera, con un'economia moderna, competitiva e sostenibile, che non utilizza più le risorse naturali in modo eccessivo.

² Il *Renovation Wave*, o “Ondata di Ristrutturazioni”, è una strategia dell'Unione Europea, parte integrante del *Green Deal*, che mira a promuovere la riqualificazione energetica degli edifici per ridurre le emissioni e migliorare l'efficienza energetica. Questa strategia è stata

Negli ultimi vent'anni il quadro regolatorio europeo si è evoluto con le direttive EPBD: dalla 2002/91/CE, al *recast* 2010/31/UE, fino all'aggiornamento 2018/844/UE, che ha aperto alle tecnologie “smart” e alle strategie di lungo periodo per la riqualificazione. L'ultimo passo è la Direttiva (UE) 2024/1275 (“Case Green”), che fissa l'orizzonte verso edifici a emissioni zero: tutti i nuovi edifici dovranno essere “*zero-emission*” dal 2030; introduce il passaporto di ristrutturazione, aggiorna e uniforma l'APE e richiede anche dati nazionali sugli APE.

In Italia, questo percorso è stato recepito e progressivamente rafforzato: dal D.Lgs. 192/2005 (impianto base su requisiti minimi e APE), alla Legge 90/2013 (introduzione degli edifici a energia quasi zero – nZEB e rafforzamento degli obblighi progettuali), ai Decreti 26 giugno 2015 (“Requisiti minimi” e “Relazione tecnica”), fino al D.Lgs. 48/2020 che attua la 2018/844/UE e promuove sistemi di automazione, monitoraggio e gestione energetica. Il recepimento della 2024/1275 è in corso: la nuova EPBD (*recast*) sostituirà la 2010/31/UE dal 30 maggio 2026, con scadenze intermedie per alcuni adempimenti.

La parte che segue approfondisce, rispettivamente, l'evoluzione delle direttive europee e il loro recepimento nel quadro italiano.

5.1.1. *Direttive europee*

La normativa europea in materia di efficienza energetica degli edifici si è evoluta in modo progressivo negli ultimi vent'anni, attraverso una serie di direttive conosciute come EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*), che hanno segnato le tappe fondamentali della regolazione in questo ambito.

In parallelo, altri pilastri del *Green Deal* completano il quadro: la nuova Direttiva Efficienza Energetica (EED) 2023/1791, che innalza gli obblighi di risparmio e rende più stringente il ruolo esemplare del settore pubblico; la Direttiva Energie Rinnovabili “RED III” 2023/2413, che fissa un target indicativo del 49% di rinnovabili nei consumi del settore edifici al 2030; e l'ETS2 (Direttiva 2023/959), che introduce la *carbon pricing* per i combustibili usati nei trasporti e negli edifici. A ciò si aggiunge il nuovo Regolamento (UE) 2024/573 sui gas fluorurati, rilevante per gli impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (*Heating, Ventilation and Air Conditioning* – HVAC).

lanciata dalla Commissione Europea nell'ottobre 2020 e ha come obiettivo principale la trasformazione degli edifici esistenti in edifici “verdi”, più efficienti e con un minore impatto ambientale, migliorando al contempo la qualità della vita e riducendo la povertà energetica.

Questi atti, insieme all'EPBD, orientano progettazione, cantiere ed esercizio verso la decarbonizzazione effettiva.

La prima formulazione, rappresentata dalla Direttiva 2002/91/CE, ha posto le basi del sistema normativo europeo introducendo requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici e istituendo la certificazione energetica obbligatoria.

A questa ha fatto seguito la Direttiva 2010/31/UE, che ha consolidato e rafforzato il quadro esistente, introducendo il concetto innovativo di edifici a energia quasi zero (nZEB) e potenziando i meccanismi di ispezione degli impianti. Con la Direttiva 2018/844/UE, l'attenzione si è spostata sulle strategie di lungo termine per la ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente, promuovendo interventi gradualmente e sistemici, nonché l'integrazione di tecnologie intelligenti (*Building Automation and Control Systems* – BACS) per il monitoraggio e la gestione energetica. Tali obblighi sono stati ulteriormente rafforzati dal nuovo testo di Direttiva 2024/1275 per gli edifici non residenziali di maggiore potenza.

Infine, l'evoluzione più recente e ambiziosa è rappresentata appunto dalla Direttiva (UE) 2024/1275, pubblicata l'8 maggio 2024 nella Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea e conosciuta come Direttiva "Case Green". Essa costituisce uno dei pilastri normativi del *Green Deal* europeo e della strategia *Renovation Wave*, e stabilisce un orizzonte di riferimento chiaro verso un parco edilizio a emissioni zero. Le principali innovazioni introdotte comprendono:

- l'obbligo per tutti i nuovi edifici di essere a emissioni zero entro il 2030 (anticipato al 2028 per gli edifici pubblici);
- l'introduzione di requisiti minimi di prestazione energetica per tutti gli elementi dell'involucro edilizio oggetto di interventi;
- l'adozione dei passaporti di ristrutturazione, digitali e aggiornabili, redatti da esperti qualificati a seguito di sopralluogo in sito e integrabili con il database nazionale;
- la revisione dei Certificati di Prestazione Energetica (APE) con scala chiusa A-G (A = edifici a emissioni zero; G = peggiori in stock nazionale) e procedure semplificate di aggiornamento;
- l'incentivazione della mobilità sostenibile con obblighi mirati di predisposizione/ricarica in edificio;
- l'interruzione dei sussidi ai generatori autonomi a combustibili fossili dal 1° gennaio 2025 e il rafforzamento degli incentivi alle *deep renovation*³;

³ La definizione di *deep renovation* è contenuta nella Direttiva europea sull'efficienza energetica degli edifici, dove viene descritta come un intervento di ammodernamento in grado di ridurre in modo significativo i consumi energetici e di condurre l'edificio a un livello di prestazione molto elevato. In particolare, la Raccomandazione UE 2019/786 dell'8 maggio

- il potenziamento del BACS negli edifici non residenziali >290 kW entro fine 2024 e >70 kW entro fine 2029, con funzioni di monitoraggio continuo e diagnostica delle perdite di efficienza;
- la possibilità di usare energia misurata per verificare la correttezza dei calcoli e confrontare prestazioni di progetto e reali (riduzione dell'*energy performance gap*) nonché il rinvio esplicito alla famiglia di standard EPB (UNI EN ISO 52000-52018, 52120, 16798) come riferimento metodologico.

La Direttiva (UE) 2024/1275 rafforza un approccio integrato alla prestazione energetica degli edifici, sottolineando il ruolo centrale dell'involucro edilizio nella riduzione dei consumi e delle emissioni. In particolare, gli obblighi sulla qualità esecutiva dei componenti richiederanno una revisione delle pratiche ispettive, promuovendo protocolli di controllo oggettivi e strumenti digitali per verificare la conformità ai requisiti prestazionali.

La nuova EPBD richiede infatti schemi di ispezione regolare per sistemi >70 kW e ammette misure alternative come strumenti digitali e checklist per certificare che le opere consegnate raggiungano le prestazioni progettate; impone sistemi di controllo indipendente con verifiche a campione, incluse ispezioni in sito (anche virtuali) su almeno il 10% dei certificati, e banche dati nazionali che integrano certificati, ispezioni, passaporti e dati misurati. Questi elementi delineano l'architettura normativa per controlli *from-design-to-as-built* e per la successiva verifica in esercizio.

Per tradurre la norma in pratiche ispettive efficaci capaci di ridurre l'*energy performance gap*, la EPBD incoraggia l'uso di strumentazione certificata EN/ISO; in questo alveo rientrano test *in situ* come UNI EN ISO 9972:2015 (*blower door* per la permeabilità all'aria), UNI EN ISO 9869-1:2015 (trasmissanza in opera) e UNI EN 13187:1999/ UNI EN ISO 6781-3:2021 (termografia), utili per validare la qualità esecutiva dell'involucro e dei ponti termici rispetto ai valori di progetto. L'adozione sistematica di questi metodi, integrata con BACS e con il confronto calcolato/misurato previsto dall'*Annex I*, è coerente con la logica della Direttiva.

Infine, l'introduzione dell'ETS2 (*carbon pricing* per combustibili negli edifici) e del nuovo quadro RED III (quota di rinnovabili negli edifici) rende economicamente più rilevante che le prestazioni reali corrispondano a quelle progettate: la misurabilità richiesta dalla EPBD (banche dati nazionali, EPC digitali/scala A-G, passaporti, SRI) offre la base per collegare incentivi, tariffe e responsabilità contrattuali a risultati verificati.

2019 sulla ristrutturazione degli edifici qualifica come "ristrutturazioni profonde" (*deep renovation*) quegli interventi che comportano un miglioramento sostanziale della prestazione energetica, con incrementi di efficienza superiori al 60%.

Tab. 5.1 – Evoluzione normativa

Anno	Riferimento normativo	Contenuto principale	Stato attuale
2002	Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico nell’edilizia	Prima formulazione della EPBD: introduce requisiti minimi di prestazione energetica e certificazione degli edifici	Abrogata dalla 2010/31/UE
2010	Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell’edilizia (rifusione)	Rifusione della 2002/91/CE; introduce il concetto di edifici a energia quasi zero (nZEB)	Abrogata dalla 2024/1275
2018	Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018	Modifica la 2010/31/UE (EPBD) e la 2012/27/UE (EED); rafforza gli obiettivi di ristrutturazione e <i>smartness</i>	Superata dalla 2024/1275
2024	Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 aprile 2024, sulla prestazione energetica nell’edilizia (rifusione) – nota come Direttiva “Case Green”	Rifusione completa della EPBD: nuovi target di decarbonizzazione del patrimonio edilizio entro il 2050	In vigore

5.1.2. Normativa italiana

Anche il quadro normativo italiano si è evoluto in parallelo con le direttive europee, dando vita a un sistema articolato e coerente che combina leggi nazionali, norme tecniche e strumenti di incentivazione economica.

In tale cornice rientrano, oltre alla disciplina EPBD recepita nel settore edilizio, anche le misure nazionali sulla efficienza energetica orizzontale (Direttiva EED) che incidono sul parco immobiliare e sui controlli.

Il punto di partenza è rappresentato dal Decreto Legislativo 192/2005, che ha recepito la Direttiva 2002/91/CE. Esso ha definito i criteri generali per la prestazione energetica degli edifici, introducendo obblighi relativi alla certificazione energetica, ai requisiti minimi di efficienza e ai controlli sugli impianti di climatizzazione.

La Legge 90/2013 ha successivamente rafforzato questo impianto normativo, estendendo gli obblighi previsti e introducendo per la prima volta

nel quadro legislativo italiano la definizione degli edifici a energia quasi zero (nZEB), nonché l'obbligo di allegare una relazione tecnica ai progetti edilizi.

Un passaggio decisivo è stato compiuto con i Decreti del 26 giugno 2015:

- il decreto “Requisiti minimi” (schemi e modalità della relazione tecnica – ex “Legge 10”), che ha stabilito le metodologie di calcolo e i valori limite da rispettare;
- il decreto di adeguamento delle Linee guida nazionali per l'APE. Tali atti hanno reso più stringente l'allineamento fra progetto, cantiere e controllo documentale.

Il Decreto Legislativo 48/2020, di recepimento della Direttiva (UE) 2018/844, ha introdotto il concetto di edificio predisposto all'intelligenza e rafforzato il ruolo dei sistemi di automazione/monitoraggio, inserendo anche elementi della strategia nazionale di ristrutturazione a lungo termine.

Attualmente è in corso il recepimento della Direttiva (UE) 2024/1275, che richiederà significative modifiche alla normativa nazionale. Tra le misure attese figurano l'aggiornamento del sistema di certificazione energetica, l'introduzione dei passaporti di ristrutturazione e nuovi requisiti minimi per gli interventi sull'involucro edilizio, con possibili impatti sui protocolli di verifica in opera e sui controlli indipendenti⁴.

Accanto alle norme “di progetto”, l'Italia dispone di un corpus specifico per esercizio, manutenzione e ispezione degli impianti termici: il D.P.R. 74/2013 definisce criteri generali e frequenze di ispezione per climatizzazione invernale/estiva e acqua calda sanitaria, demandandone a Regioni e Province autonome l'attuazione (catasti impianti termici, accertamenti e ispezioni). Questo è il perno regolatorio che consente di verificare in esercizio il mantenimento delle prestazioni progettate e ridurre il divario tra consumi attesi e reali.

Sempre in chiave di qualità e tracciabilità, il D.P.R. 75/2013 ha fissato i requisiti dei soggetti abilitati per la certificazione energetica, rafforzando l'indipendenza del valutatore e la credibilità dell'APE; dal 2020, inoltre, è operativo il SIAPE (Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica), banca dati nazionale gestita da ENEA che raccoglie gli APE regionali, abilitando controlli e analisi *data-driven* sull'evoluzione delle prestazioni del patrimonio edilizio. Questi strumenti sono funzionali a individuare sistematicamente gli scostamenti prestazionali e a calibrare le azioni ispettive.

⁴ Queste disposizioni si pongono in continuità con la Direttiva 2018/844/UE già recepita e si intrecciano con la futura revisione dei decreti nazionali su APE e impianti.

Tab. 5.2 – Evoluzione della EPBD e recepimento italiano

Anno	Direttiva UE	Contenuto principale	Recepimento in Italia
2002	Direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico nell’edilizia	Prima EPBD: requisiti minimi di prestazione energetica, certificazione degli edifici, ispezione impianti	D.Lgs. 192/2005, modificato dal D.Lgs. 311/2006
2010	Direttiva 2010/31/UE (rifusione EPBD)	Introduce obiettivi nZEB (<i>nearly Zero Energy Buildings</i>), rafforza certificazione ed ispezioni	D.L. 63/2013 convertito in L. 90/2013; successivi Decreti attuativi 26 giugno 2015
2018	Direttiva (UE) 2018/844	Modifica la 2010/31/UE: <i>Smart Readiness Indicator</i> (SRI), strategie di ristrutturazione a lungo termine, infrastrutture di ricarica veicoli elettrici	D.Lgs. 48/2020
2024	Direttiva (UE) 2024/1275 (“Case Green”, rifusione EPBD)	Decarbonizzazione del patrimonio edilizio entro il 2050; nuovi target vincolanti di ristrutturazione energetica	Recepimento nazionale in corso (entro 2026)

A supporto di questo quadro normativo, sono stati sviluppati standard tecnici fondamentali:

- la serie UNI/TS 11300, che fornisce i metodi di calcolo della prestazione energetica e costituisce la base tecnica nazionale per progetto, APE e verifiche;
- la UNI 10349 (dati climatici convenzionali), a supporto dei calcoli coerenti sul territorio;
- per gli elementi prefabbricati in calcestruzzo, la UNI EN 13369, aggiornata nel 2023 (sostituisce l’edizione 2018) con regole comuni su requisiti e AVCP (Autorità per la vigilanza sui contratti pubblici di lavori, servizi e forniture), utile a presidiare tolleranze e qualità esecutiva dell’involucro.

Per il collegamento operativo con l’ispezione edilizia, va sottolineato che il decreto “Requisiti minimi” e le Linee guida APE prevedono contenuti e metadati che alimentano la tracciabilità delle verifiche; l’attuazione regionale di catasti e procedure, insieme a metodi di prova in opera (ad esempio, UNI/EN/ISO applicate al *blower door*, termografia, trasmittanza *in situ*), consente di validare la qualità esecutiva dell’involucro – nodo cruciale per chiudere l’*energy performance gap*. In prospettiva, l’implementazione delle misure EPBD rifusa 2024/1275 rafforzerà i controlli indipendenti, l’uso di strumenti digitali e i pasaporti di ristrutturazione come *roadmap* di interventi verificabili nel tempo.

Sul fronte economico, l'Italia ha adottato negli ultimi anni una serie di strumenti incentivanti determinanti per il successo delle politiche di efficienza energetica:

- Ecobonus, detrazioni fiscali (in via generale fino al 65% per molte tipologie di intervento), con obbligo di trasmissione dei dati a ENEA;
- Superbonus 110%, introdotto con il D.L. 34/2020, che ha fortemente accelerato interventi su involucro e impianti (aliquote e condizioni sono variate nel tempo);
- Conto Termico 2.0 (D.M. 16/02/2016, GSE), incentivo diretto per PA e privati su efficienza e rinnovabili termiche.

Questi strumenti, oltre a sostenere economicamente gli interventi, hanno innescato meccanismi di verifica tecnica (asseverazioni, controlli a campione GSE e Agenzia Entrate) che contribuiscono alla riduzione del gap prestazionale fra progetto ed esercizio.

5.2. Indicatori di prestazione

Gli indicatori chiave di prestazione costituiscono strumenti essenziali per valutare, monitorare e migliorare la qualità degli edifici attraverso parametri oggettivi e misurabili. Nel settore dell'efficienza energetica, sia per edifici di nuova costruzione sia per quelli oggetto di riqualificazione, i KPI hanno assunto un ruolo centrale: supportano le decisioni nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione, consentendo di confrontare le prestazioni con standard di riferimento, obiettivi normativi e buone pratiche internazionali.

Particolare attenzione va rivolta ai KPI relativi all'involucro edilizio, poiché è quest'ultimo a determinare i carichi di base per riscaldamento e raffrescamento, a influenzare direttamente comfort e rischi igrometrici e a risultare – a differenza degli impianti – difficile e costoso da correggere una volta costruito. Difetti o infiltrazioni introdotti in questa fase generano infatti scostamenti ricorrenti che i sistemi tecnici possono solo compensare con consumi aggiuntivi, ampliando il divario tra prestazioni previste e reali.

Le sezioni seguenti presentano i principali KPI da monitorare nelle varie fasi del processo edilizio, con particolare attenzione alla costruzione e al collaudo dell'involucro.

5.2.1. Indice di prestazione energetica globale non rinnovabile

L'Indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (EP_{gl,nren}) misura il consumo annuo di energia primaria non rinnovabile di un edificio

per soddisfare i suoi bisogni energetici standard, come riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione e, per il settore non residenziale, illuminazione.

Espresso in kWh/m²a, rappresenta il parametro principale utilizzato in Italia per l'attribuzione della classe energetica di un immobile, che va da G (la meno efficiente) ad A4 (la più efficiente). Un valore più basso di EP_{gl,nren} indica un edificio con consumi ridotti e maggiore efficienza.

Il riferimento normativo nazionale per la definizione dell'EP_{gl,nren} e dei requisiti minimi di prestazione energetica è il Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 ("Decreto Requisiti Minimi"), attuativo del D.Lgs. 192/2005, che stabilisce metodologie di calcolo e valori limite, integrati dalle norme tecniche UNI/TS 11300.

Le soglie per la classificazione energetica sono definite rispetto a un edificio di riferimento, con caratteristiche standard ma coerenti con i requisiti minimi di legge. Esse variano in funzione della zona climatica e sono espresse come percentuali dell'indice di riferimento (EP_{gl,nren,rif}). A titolo indicativo:

- Classe A4: $EP_{gl,nren} \leq 0,40 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$;
- Classe A3: $0,40 < EP_{gl,nren} \leq 0,60 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$;
- Classe A2: $0,60 < EP_{gl,nren} \leq 0,80 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$;
- Classe A1: $0,80 < EP_{gl,nren} \leq 1,00 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$;
- Classe B: $1,00 < EP_{gl,nren} \leq 1,20 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$;
- Classe C: $1,20 < EP_{gl,nren} \leq 1,50 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$;
- Classe D: $1,50 < EP_{gl,nren} \leq 2,00 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$;
- Classe E: $2,00 < EP_{gl,nren} \leq 2,60 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$;
- Classe F: $2,60 < EP_{gl,nren} \leq 3,50 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$;
- Classe G: $EP_{gl,nren} > 3,50 \times EP_{gl,nren,rif,standard}$.

Per gli edifici di nuova costruzione e per gli interventi di ristrutturazione importante, è obbligatorio rispettare i requisiti minimi di prestazione, allineati ai valori delle classi più elevate. L'obiettivo è la realizzazione di edifici a energia quasi zero (nZEB), caratterizzati da un fabbisogno molto basso, coperto in larga misura da fonti rinnovabili.

5.2.2. Quota rinnovabili

La quota rinnovabili indica la percentuale di energia consumata da un edificio che proviene da fonti rinnovabili, quali pannelli solari termici, fotovoltaici, pompe di calore, impianti geotermici e altre tecnologie simili.

Il principale riferimento normativo è il Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011, che recepisce la Direttiva Europea 2009/28/CE. Tale decreto stabilisce che i progetti di nuova costruzione e di ristrutturazione importante

debbano integrare fonti rinnovabili per coprire una quota significativa dei consumi energetici. Successivamente, il Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 (“Decreto Requisiti Minimi”) ha specificato modalità di calcolo e percentuali obbligatorie.

Le quote minime da soddisfare con energia rinnovabile si riferiscono al fabbisogno di energia primaria complessiva per climatizzazione invernale, estiva e produzione di acqua calda sanitaria, e sono così definite:

- Edifici di nuova costruzione:
 - 50% del fabbisogno di acqua calda sanitaria;
 - 50% del fabbisogno energetico complessivo per climatizzazione invernale, estiva e produzione di acqua calda sanitaria (percentuale elevata al 60% per i titoli edilizi richiesti dopo il 1° gennaio 2018).
- Edifici sottoposti a riqualificazioni importanti:
 - si applicano le stesse percentuali, purché l'intervento interessi oltre il 50% della superficie utile e preveda il rifacimento dell'impianto termico.

La verifica del rispetto di tali obblighi spetta al tecnico incaricato della progettazione energetica, che deve asseverare la conformità attraverso la relazione tecnica ex Legge 10. Queste verifiche risultano indispensabili sia per il rilascio del titolo abilitativo (ad esempio il permesso di costruire) sia per il conseguimento dell'agibilità dell'immobile.

5.2.3. *Trasmittanza termica*

La trasmittanza termica (U) è un parametro fondamentale per la valutazione della qualità dell'involucro edilizio. Essa misura la quantità di calore che attraversa un elemento costruttivo (parete, solaio, finestra o copertura) in condizioni stazionarie, rapportata alla sua superficie e alla differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno. L'unità di misura è $W/(m^2K)$.

Un valore di trasmittanza più basso corrisponde a una maggiore capacità isolante e, quindi, a minori dispersioni di calore durante la stagione invernale.

I riferimenti normativi principali sono il Decreto Requisiti Minimi (26 giugno 2015) e il D.Lgs. 192/2005, che stabiliscono i valori limite massimi di trasmittanza da rispettare in caso di nuova costruzione, riqualificazione energetica o ristrutturazione importante.

I limiti variano in funzione della zona climatica di appartenenza dell'edificio. L'Italia è suddivisa in sei zone (da A a F), con valori più severi (U più bassi) nelle aree a clima rigido (zone E e F) rispetto a quelle più miti (zone A e B), per rispondere alle diverse esigenze di isolamento termico. A titolo esemplificativo, per un intervento di riqualificazione importante in zona climatica E, i valori limite di trasmittanza sono:

- Chiusura verticale opaca: $U \text{ limite} \leq 0.29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
- Chiusura orizzontale-inclinata superiore (tetto): $U \text{ limite} \leq 0.26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
- Chiusura orizzontale inferiore: $U \text{ limite} \leq 0.29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
- Chiusura verticale trasparente (finestre e porte finestre): $U \text{ limite} \leq 1.40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Nel tempo, la normativa ha previsto un progressivo inasprimento dei limiti di trasmittanza, per promuovere edifici sempre più efficienti dal punto di vista energetico. Dal 1° gennaio 2021, i valori limite per i nuovi edifici e per le ristrutturazioni importanti sono stati ulteriormente ridotti, in linea con gli standard degli edifici a energia quasi zero (nZEB).

5.2.4. Prestazione estiva dell'involucro

Oltre alla dispersione termica invernale, la normativa italiana prende in considerazione anche la prestazione estiva degli edifici, ovvero la capacità dell'involucro di limitare il surriscaldamento dovuto all'irraggiamento solare e alle elevate temperature esterne.

L'obiettivo è ridurre la dipendenza dagli impianti di climatizzazione estiva, migliorando il comfort abitativo e contenendo i consumi energetici.

Il parametro principale utilizzato è la massa superficiale (m), espressa in kg/m^2 , che rappresenta la capacità dell'involucro di accumulare calore e rallentarne la trasmissione verso l'interno. Un valore elevato di massa superficiale conferisce maggiore inerzia termica, consentendo di mantenere più fresco l'ambiente interno durante le ore diurne e di rilasciare gradualmente il calore accumulato nelle ore notturne.

Il Decreto Requisiti Minimi del 26 giugno 2015, integrato dalla Legge 90/2013, stabilisce requisiti minimi di prestazione estiva, in particolare per le zone climatiche più calde. La verifica può essere condotta attraverso diversi parametri:

- Massa superficiale (m): per le chiusure opache verticali, è previsto un valore minimo di $230 \text{ kg}/\text{m}^2$. Qualora questo requisito non sia rispettato, deve essere verificato che la trasmittanza termica periodica (Y_{ie}) risulti inferiore a una soglia definita dalla normativa.
- Fattore di attenuazione (f) e sfasamento termico (ϕ): lo sfasamento, misurato in ore, indica il ritardo con cui il calore attraversa la parete dall'esterno verso l'interno; valori più elevati sono desiderabili. Il fattore di attenuazione, invece, quantifica la riduzione dell'onda termica attraverso la chiusura: un valore basso segnala un'efficace capacità dell'involucro di smorzare le variazioni di temperatura esterna.

In alternativa al rispetto del requisito di massa superficiale, la normativa ammette una verifica più articolata, che considera anche il fattore di ombreggiamento e le proprietà di trasmittanza dei serramenti.

L'obiettivo rimane lo stesso: garantire condizioni di comfort estivo adeguate, riducendo il ricorso a sistemi di climatizzazione artificiale e favorendo un uso più sostenibile delle risorse energetiche.

5.2.5. *Tenuta all'aria dell'edificio*

La tenuta all'aria è un parametro fondamentale per valutare la qualità costruttiva di un edificio e il suo impatto sull'efficienza energetica.

Essa esprime la capacità dell'involucro edilizio di limitare le infiltrazioni d'aria incontrollate attraverso fessure, giunti e difetti esecutivi. Tali dispersioni, note come "ventilazione parassita", non solo aumentano i consumi per riscaldamento e raffrescamento, ma compromettono anche il comfort termogrometrico e acustico degli ambienti interni.

Il parametro di riferimento è il tasso di ricambio d'aria a 50 Pa (n_{50}), espresso in h^{-1} , che indica quante volte il volume d'aria interno viene ricambiato in un'ora quando l'edificio è sottoposto a una differenza di pressione di 50 Pascal. Un valore basso di n_{50} corrisponde a un edificio più ermetico e, di conseguenza, più efficiente dal punto di vista energetico.

Sebbene non rappresenti un requisito obbligatorio per tutti gli interventi, il Decreto Requisiti Minimi del 26 giugno 2015 fornisce valori di riferimento sia per i nuovi edifici sia per le ristrutturazioni importanti. La norma tecnica di riferimento è la UNI EN ISO 9972:2015, che descrive la metodologia per l'esecuzione del *blower door test*, strumento ormai consolidato per la misurazione della permeabilità all'aria.

Il miglioramento della tenuta all'aria è fortemente incoraggiato, poiché costituisce un prerequisito essenziale per l'adozione di sistemi di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC). Questi garantiscono un ricambio d'aria salubre e regolato, con recupero di calore nella stagione invernale e di fresco in quella estiva.

I valori di riferimento comunemente adottati sono i seguenti:

- Edifici con sistemi VMC: è fortemente raccomandato un valore di n_{50} inferiore a 1.5 h^{-1} ;
- Edifici senza VMC: il valore di riferimento è inferiore a 3.0 h^{-1} .

La tenuta all'aria è quindi un fattore cruciale, spesso sottovalutato, che incide in maniera significativa sul fabbisogno energetico complessivo. In edifici ben isolati, le dispersioni dovute alle infiltrazioni d'aria possono rappresentare una quota rilevante dei consumi totali. Migliorarla significa non

solo ridurre i costi energetici, ma anche prevenire la formazione di condense superficiali, la crescita di muffe e l'ingresso di rumore esterno, contribuendo in modo determinante al benessere abitativo.



Fig. 5.1 – Porta soffiante in posizione per misurare la perdita d'aria complessiva della struttura con finestre, porte e tutte le altre aperture esterne in posizione (Fonte: National Institute of Standards and Technology, Public domain, via Wikimedia Commons)

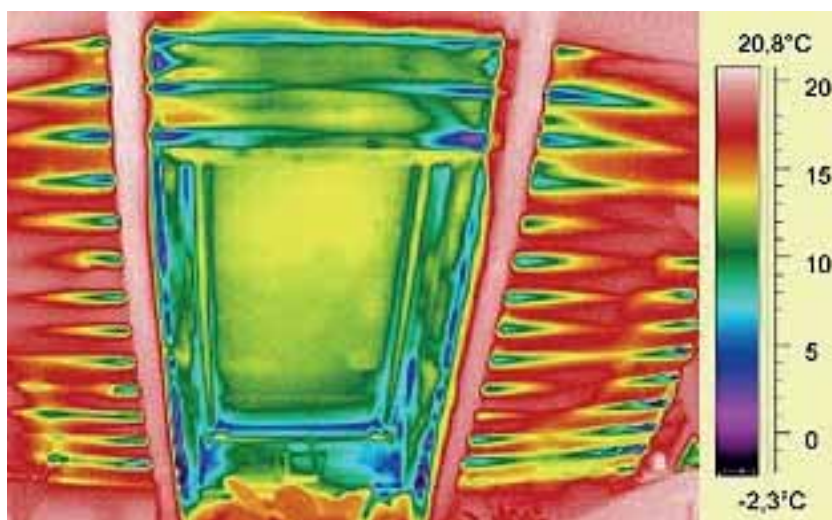


Fig. 5.2 – Immagine a infrarossi di una finestra da tetto sottoposta a prova di pressione utilizzando il blower test (Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FensterIR_Blower_Door.jpg)

5.2.6. Localizzazione e intensità dei ponti termici

I ponti termici sono zone circoscritte dell'involucro edilizio in cui il flusso di calore si intensifica notevolmente a causa di discontinuità costruttive o geometriche.

Si manifestano tipicamente agli angoli degli edifici, in corrispondenza di pilastri, travi, balconi o nei punti di giunzione tra pareti e solai, e costituiscono vie preferenziali di dispersione del calore in inverno e di ingresso di calore in estate. Il loro mancato trattamento compromette non solo l'efficienza energetica dell'edificio, ma anche la qualità igrometrica degli ambienti interni, favorendo la formazione di umidità e muffa.

Il Decreto Requisiti Minimi del 26 giugno 2015, in attuazione del D.Lgs. 192/2005, impone l'obbligo di considerare e correggere i ponti termici nel calcolo della prestazione energetica dell'edificio. La loro influenza è quantificata attraverso il coefficiente di trasmittanza termica lineare (ψ), espresso in W/(mK), che rappresenta la dispersione di calore aggiuntiva per unità di lunghezza del ponte termico.

La normativa distingue diverse modalità di trattamento:

- Ponti termici di progetto: negli edifici di nuova costruzione o nelle riqualificazioni importanti, il calcolo deve essere condotto con il massimo livello di precisione, utilizzando:
 - metodi di calcolo agli elementi finiti, che simulano il flusso di calore in modo dettagliato;
 - abachi o librerie standard, che forniscono valori precalcolati per le configurazioni più comuni.
- Ponti termici corretti: la progettazione deve prevedere soluzioni atte a ridurre l'intensità. La posa di uno strato isolante continuo, come nel sistema a cappotto, rappresenta una delle strategie più efficaci per eliminare gran parte dei ponti termici strutturali.

In funzione del loro impatto, il Decreto distingue ulteriormente:

- Ponti termici "corretti": soddisfano i requisiti normativi e presentano un coefficiente ψ inferiore ai valori limite stabiliti, tale da evitare la formazione di condensa superficiale.
- Ponti termici "non corretti": non rispettano i limiti prescrittivi e devono pertanto essere trattati e risolti in fase di progetto e di realizzazione.

L'analisi dei ponti termici costituisce parte integrante della relazione tecnica (ex Legge 10) e concorre al calcolo dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (EP_{gl,nren}), incidendo in modo significativo sulla classe energetica complessiva dell'edificio.



Fig. 5.3 – Documentare i punti deboli dell'involucro termico dell'edificio (Fonte: YellowstoneNPS)

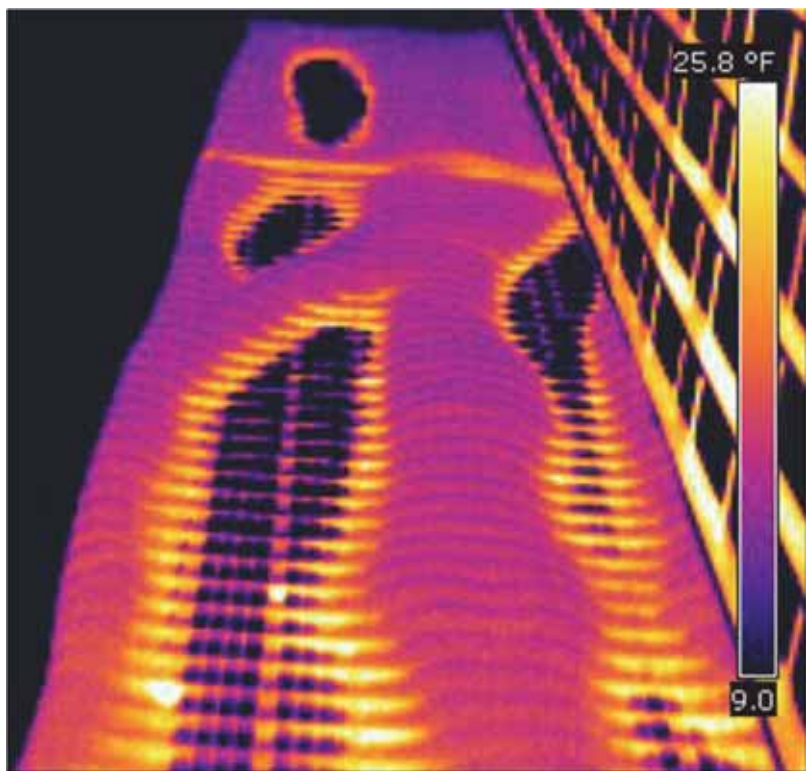


Fig. 5.4 – L'immagine termica mostra la dispersione di calore dell'edificio attraverso le solette che interrompono l'involucro isolato per formare i balconi. (Fonte: Jim D'Aloisio)

5.2.7. Ventilazione e qualità dell'aria interna

La qualità dell'aria interna (*Indoor Air Quality* – IAQ) è un parametro determinante per la salute e il comfort degli occupanti di un edificio. Essa dipende da vari fattori, tra cui la concentrazione di inquinanti (formaldeide, Composti Organici Volatili – COV), anidride carbonica (CO₂), umidità relativa e altre sostanze potenzialmente nocive. Per garantire un ambiente salubre è necessario assicurare un adeguato ricambio d'aria, ottenibile mediante ventilazione naturale o meccanica.

Sebbene il Decreto Requisiti Minimi del 26 giugno 2015 non imponga l'installazione di sistemi di ventilazione meccanica, stabilisce criteri generali volti a mantenere una corretta qualità dell'aria. In ambito residenziale, il ricambio minimo è regolato dalla norma UNI 10339, che definisce le portate d'aria in funzione del numero di occupanti e della destinazione d'uso dei locali.

L'adozione di sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) è particolarmente raccomandata negli edifici ad alta efficienza energetica (come gli nZEB), caratterizzati da elevata ermeticità dell'involucro. Questi sistemi garantiscono un ricambio costante e controllato senza necessità di apertura manuale delle finestre, contribuendo a ridurre le dispersioni termiche e i consumi energetici. Si distinguono due tipologie principali:

- VMC a singolo flusso, che estrae l'aria viziata da locali come cucine e bagni, consentendo l'ingresso di aria esterna attraverso aperture dedicate nei serramenti o nelle pareti;
- VMC a doppio flusso con recupero di calore, la soluzione più efficiente, in cui un'unità centrale gestisce i due flussi d'aria scambiando calore tramite un recuperatore che consente di trattenere fino al 90% dell'energia termica, pre-riscaldando l'aria in inverno o pre-raffreddandola in estate.

Anche la ventilazione naturale, che avviene tramite l'apertura manuale o automatica dei serramenti, rappresenta un metodo essenziale per il ricambio d'aria. La sua efficacia dipende da vari fattori, quali la differenza di temperatura tra interno ed esterno, l'azione del vento e la configurazione degli spazi.

Per la progettazione della ventilazione naturale, un parametro di riferimento è il rapporto di ventilazione naturale, calcolato in base alla superficie apribile delle finestre e alla loro distribuzione in relazione al volume dei locali da ventilare. Pur non essendo definito in modo univoco da una normativa specifica, questo valore è fondamentale per garantire che, in assenza di sistemi meccanici, il ricambio d'aria minimo sia sufficiente a mantenere la salubrità dell'ambiente. La norma UNI EN 15251:2008 fornisce criteri per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici, includendo indicazioni relative alla ventilazione naturale. In particolare, essa raccomanda che la superficie netta apribile dei serramenti non sia inferiore a una percentuale della

superficie utile del locale (generalmente compresa tra il 5% e il 10%), così da assicurare un adeguato ricambio d'aria.

Ignorare l'importanza della qualità dell'aria interna può determinare conseguenze rilevanti, come la cosiddetta “sindrome dell'edificio malato”, caratterizzata da sintomi quali mal di testa, affaticamento e irritazione delle mucose. Una progettazione che integri strategie di ventilazione, sia naturali che meccaniche, contribuisce invece a creare ambienti più salubri, confortevoli ed efficienti dal punto di vista energetico.

5.2.8. Comfort termico

Il comfort termico è uno stato di benessere in cui una persona non percepisce né caldo né freddo. Non si tratta di un valore assoluto, bensì di una sensazione soggettiva influenzata da sei fattori principali:

- temperatura dell'aria: la temperatura dell'aria circostante;
- temperatura media radiante: la temperatura delle superfici circostanti (pareti, soffitti, finestre);
- umidità relativa dell'aria: la quantità di vapore acqueo presente nell'aria;
- velocità dell'aria: i movimenti d'aria che possono generare correnti;
- metabolismo: l'energia prodotta dal corpo in base all'attività fisica;
- abbigliamento: la capacità isolante dei vestiti.

Per la valutazione del comfort, la normativa italiana, in linea con le direttive europee, fa riferimento a indici scientifici come il PMV (*Predicted Mean Vote*) e il PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), definiti dalla norma UNI EN ISO 7730:2006.

Il PMV stima la sensazione termica media di un gruppo di persone su una scala che va da -3 (molto freddo) a +3 (molto caldo), dove lo 0 rappresenta il comfort ideale.

Il PPD, strettamente correlato al PMV, indica la percentuale di persone che si dichiarano insoddisfatte delle condizioni termiche.

L'obiettivo progettuale è mantenere il valore di PMV il più vicino possibile allo zero e garantire un PPD inferiore a soglie prestabilite, generalmente comprese tra il 10% e il 15%.

5.2.9. Ore di surriscaldamento

Le ore di surriscaldamento rappresentano un indicatore che quantifica il numero di ore, nell'arco di un anno, in cui la temperatura operativa all'interno

di un edificio non climatizzato (o dotato di climatizzazione passiva) supera una soglia di comfort prestabilita.

Questo parametro è fondamentale per valutare la prestazione estiva passiva di un edificio e la sua capacità di mantenere condizioni di benessere senza l'impiego di sistemi di climatizzazione attiva. Un numero ridotto di ore di surriscaldamento indica una progettazione efficace, capace di diminuire la necessità di raffrescamento meccanico e di contribuire al risparmio energetico.

Il Decreto Requisiti Minimi del 26 giugno 2015 richiama la normativa UNI EN 15251:2008 e UNI EN ISO 7730:2006, che stabiliscono i criteri per la progettazione e la valutazione dell'ambiente interno.

L'analisi si basa su una simulazione dinamica oraria dell'edificio, che considera l'interazione tra diversi fattori:

- involucro edilizio: spessore e qualità dell'isolamento, inerzia termica delle pareti, prestazioni dei serramenti e delle schermature solari;
- orientamento e irraggiamento solare: esposizione dell'edificio e quantità di energia solare incidente;
- apporti interni: calore generato da persone, illuminazione e apparecchiature;
- ventilazione: naturale o meccanica.

La simulazione consente di calcolare la temperatura operativa ora per ora e di confrontarla con le soglie di comfort definite in funzione della zona climatica e della destinazione d'uso. La UNI EN 15251:2008 individua diverse categorie di comfort (da I a IV), con limiti di temperatura più o meno stringenti. L'obiettivo progettuale è mantenere i valori di PMV prossimi allo zero e garantire valori di PPD inferiori al 10-15%.

Per gli edifici residenziali non climatizzati, il decreto prevede che il numero di ore in cui la temperatura interna supera una soglia definita (generalmente 28 °C o 26 °C a seconda della zona climatica) sia inferiore a un valore limite, solitamente compreso tra 50 e 100 ore all'anno. Considerare il comfort termico fin dalle prime fasi della progettazione è quindi cruciale: strategie passive come un'adeguata inerzia termica, l'impiego di schermature solari, l'uso di colori chiari e la ventilazione notturna consentono di ridurre drasticamente la dipendenza dagli impianti di climatizzazione, migliorando l'efficienza energetica complessiva e il benessere degli occupanti.

5.2.10. Illuminazione naturale

L'illuminazione naturale è un parametro di fondamentale importanza nella progettazione edilizia e riguarda la capacità di un edificio di sfruttare

la luce solare per illuminare gli ambienti interni. Un adeguato livello di illuminazione naturale non solo riduce il consumo di energia elettrica per l'illuminazione artificiale, ma contribuisce al comfort visivo e al benessere psico-fisico degli occupanti. La normativa italiana ne tiene conto nella valutazione complessiva della prestazione energetica.

Non esiste un unico parametro numerico in grado di definire l'illuminazione naturale in maniera esaustiva: la valutazione avviene attraverso diversi indicatori normati, richiamati dal Decreto Requisiti Minimi del 26 giugno 2015 e da norme tecniche come la UNI 11165:2005 e la UNI EN 17037:2019. Tra i parametri principali si annoverano:

- Fattore di Luce Diurna (FLD): rapporto tra l'illuminamento in un punto di un ambiente interno e l'illuminamento all'esterno, su una superficie orizzontale in condizioni di cielo coperto. Un FLD più elevato indica una migliore penetrazione della luce naturale. La normativa edilizia prescrive valori minimi di FLD per garantire livelli adeguati di illuminazione negli spazi interni.
- Superficie dei serramenti: la legge impone un rapporto minimo tra la superficie vetrata utile e la superficie calpestabile del locale. In Italia questo rapporto è generalmente regolato in base alla destinazione d'uso dell'ambiente e, a titolo di esempio, per gli ambienti residenziali è 1/8 (12,5%), assicurando non solo un'illuminazione sufficiente, ma anche un adeguato ricambio d'aria.
- Fattore di vista cielo: parametro che valuta la porzione di cielo visibile da un punto all'interno di un ambiente; un valore elevato corrisponde a un'ampia apertura in grado di catturare efficacemente la luce naturale.

Un'illuminazione naturale adeguata rappresenta quindi un requisito essenziale per la progettazione di edifici passivi, orientati al raggiungimento della massima efficienza energetica e alla riduzione dell'uso di sistemi impiantistici attivi.

5.2.11. Automazione/controllo (BACS) e prontezza smart

L'automazione e il controllo degli edifici (*Building Automation and Control Systems* – BACS) e la “prontezza smart” rappresentano parametri che valutano il livello di intelligenza, automazione e connettività di un edificio. Questi sistemi consentono di gestire e ottimizzare in modo automatico gli impianti di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione e schermature solari, utilizzando dati raccolti da sensori e algoritmi basati su logiche predefinite. L'obiettivo è massimizzare l'efficienza energetica, migliorare il comfort degli occupanti e garantire l'interoperabilità tra i diversi sottosistemi impiantistici.

In Italia, il concetto è stato introdotto dal D.Lgs. 48/2020, che recepisce la Direttiva Europea 2018/844/UE (EPBD) e modifica il D.Lgs. 192/2005, rendendo obbligatoria – per i nuovi edifici e per le ristrutturazioni rilevanti di edifici non residenziali – la valutazione della fattibilità tecnica ed economica dell’installazione di sistemi BACS.

La “prontezza *smart*” di un edificio viene misurata attraverso lo *Smart Readiness Indicator* (SRI), un indice europeo che valuta la capacità di un edificio di:

- adattare il funzionamento alle esigenze degli occupanti;
- ottimizzare la prestazione energetica e la gestione degli impianti;
- interagire in modo flessibile con la rete elettrica.

Sebbene l’SRI non sia ancora obbligatorio in Italia per tutti gli edifici, la sua valutazione costituisce un parametro chiave per i progetti più innovativi. L’integrazione dei sistemi BACS e il calcolo dell’SRI consentono infatti di superare un concetto statico di efficienza energetica, basato unicamente sulla qualità dell’involucro, a favore di un approccio dinamico che include anche la gestione attiva dell’edificio.

Un edificio con un alto indice SRI è in grado di:

- ridurre i consumi ottimizzando l’uso degli impianti;
- garantire un comfort elevato agli occupanti;
- aumentare il valore di mercato dell’immobile;
- facilitare l’integrazione con fonti rinnovabili e veicoli elettrici.

5.3. Indicatori di prestazione aggregati

Accanto agli indicatori tradizionali, la letteratura scientifica ha proposto e validato strumenti avanzati per la valutazione delle prestazioni energetiche. Negli ultimi anni si sono affermati modelli che superano l’approccio “a silos” dei KPI, introducendo cruscotti aggregati capaci di mettere in relazione energia, qualità ambientale interna, emissioni/clima, costi lungo il ciclo di vita e intelligenza dell’edificio. Si tratta di un approccio olistico in cui l’energia è letta come parte di un sistema più ampio e il comfort viene assunto come indicatore diretto della dimensione sociale, così da permettere che le decisioni progettuali ottimizzino più obiettivi contemporaneamente, senza penalizzare gli ambiti “non energetici”.

Il vantaggio dei KPI combinati consiste nella possibilità di leggere la qualità edilizia in chiave multidimensionale – prestazioni, benessere, qualità dell’aria e della luce, uso razionale delle risorse – restituendo un quadro più fedele del comportamento in esercizio e della sostenibilità complessiva dell’intervento. Integrare indicatori energetici con misure di qualità ambientale interna (temperatura, umidità, ventilazione, illuminazione) e/o di

impatto climatico permette di confrontare opzioni progettuali e strategie di riqualificazione non solo in termini di kWh risparmiati, ma anche rispetto alla salubrità e al comfort percepito dagli occupanti, alla resilienza a condizioni meteorologiche future e alla convenienza economica lungo il ciclo di vita.

Questa lettura aggregata risulta particolarmente utile nella definizione delle priorità di intervento e nella costruzione di *roadmap* verso edifici a energia quasi zero (nZEB) e, sempre più spesso, a emissioni operative nulle, in linea con il nuovo quadro europeo.

In questo scenario si colloca il framework europeo *Level(s)*, che fornisce 16 indicatori chiave articolati in 6 macro-obiettivi (energia e *GreenHouse Gas* – GHG operativi e lungo ciclo di vita, uso efficiente di materiali e acqua, salute/comfort, resilienza/adattamento, costo/valore), pensati per essere letti in modo integrato e utilizzati per confronti tra opzioni di progetto e di riqualificazione. La documentazione tecnica del Centro Comune di Ricerca (*Joint Research Centre* – JRC) mostra come *Level(s)* abiliti valutazioni multicriterio e *scorecard* a livello di progetto o portafoglio, mentre studi recenti analizzano la struttura dei KPI e le modalità di aggregazione per sintesi decisionali⁵.

Un secondo tassello è lo *Smart Readiness Indicator* (SRI) previsto dalla EPBD, che introduce un indice composito dell'attitudine dell'edificio a erogare servizi *smart* (efficienza energetica, manutenzione predittiva, comfort/salubrità, informazione all'utente, flessibilità alla rete, ecc.), aggregando punteggi per domini e impatti in un valore unico (0-100). La Commissione Europea ha già reso disponibili linee guida e strumenti di calcolo per applicazioni operative, e diversi Stati membri stanno avviando schemi nazionali. Report di stato e contributi scientifici recenti documentano metodologie di audit SRI integrate con le diagnosi energetiche.

Per la qualità ambientale interna (*Indoor Environmental Quality* – IEQ), il progetto H2020 ALDREN ha sviluppato TAIL (*Thermal, Air, Individual control, Light*), un indicatore sintetico di IEQ applicabile in edifici sottoposti a *deep renovation* e collegato al *Building Renovation Passport*, così da integrare miglioramenti energetici e benefici su salute, benessere e valore immobiliare. La letteratura tecnico-scientifica e le linee metodologiche ALDREN mostrano come TAIL si combini con i risultati energetici in un quadro multi-indice per il supporto alle decisioni.

Nel solco dell'evoluzione degli Attestati di Prestazione Energetica, il progetto X-tendo propone i cosiddetti *next-generation EPCs*, che integrano

⁵ Vedi <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/8/2027>.

nuovi indicatori – *comfort/IEQ*, *smart readiness*, dati di consumo reale, interazione con la rete, inquinamento *outdoor* – in griglie aggregate utili per la comparabilità tra edifici e per l’orientamento degli investimenti. I *deliverable* pubblici illustrano metodi di normalizzazione e ponderazione da innestare nell’EPC per ottenere punteggi compositi interpretabili anche dagli utenti finali.

Sul piano metodologico, la ricerca scientifica più recente converge su KPI orientati all’occupante e su approcci multicriterio capaci di integrare in un’unica lettura energia, IEQ e resilienza climatica (ad esempio ore di surriscaldamento futuro), riducendo il rischio di «ottimizzare l’energia penalizzando il comfort».

Questa evoluzione si collega anche ai risultati del progetto H2020-INSITER, che ha sviluppato procedure di auto-ispezione e un *toolset software* integrato basato su BIM/AR per misurare sul campo KPI dell’involucro e degli impianti (tenuta all’aria, *U-value*, ponti termici, portate/efficienze HVAC, comfort), collegandoli a soglie normative e integrandoli in flussi di lavoro digitali.

L’obiettivo da perseguire negli approcci futuri è orientare la valutazione avanzata delle prestazioni energetiche oltre il mero parametro dei kWh, integrando comfort, salute, intelligenza, resilienza e costi in KPI aggregati supportati da schemi e strumenti riconosciuti a livello europeo. In questo modo, le decisioni progettuali e di riqualificazione diventeranno più consapevoli, robuste e resistenti al cambiamento, capaci di adattarsi nel tempo ed evitare l’obsolescenza delle scelte.

6. Costruire un edificio energeticamente efficiente: l'involucro

6. Building an Energy-efficient Building: the Envelope

This chapter explores the critical role of the building envelope in achieving energy efficiency and environmental quality. As the primary interface between indoor and outdoor environments, the envelope determines thermal balance, airtightness, daylight penetration, and ventilation, all of which directly affect energy demand, comfort, and health.

The discussion highlights how envelope performance contributes to reducing heating and cooling loads, which account for the majority of energy use in European buildings. In this regard, European and international policies increasingly emphasize envelope design as a cornerstone of decarbonization, linking it to prefabrication, industrialized construction methods, and large-scale deep renovation strategies.

The chapter analyzes the main envelope components – foundations, walls, windows, and roofs – by focusing on technical solutions, construction quality, and performance assessment methods. By integrating off-site technologies, advanced materials, and digital tools such as BIM and monitoring systems, the building envelope emerges as a strategic lever for delivering high-performance, resilient, and sustainable buildings.

Keywords: *building envelope, energy efficiency, thermal performance, airtightness, daylight, prefabrication, deep renovation, BIM*

L'involucro edilizio – inteso come l'insieme delle parti dell'edificio che separano l'ambiente climatizzato da quello non climatizzato – è l'elemento che più incide sulla domanda di energia. Infatti, la sua configurazione determina il bilancio termo-igrometrico, la disponibilità di luce naturale e la ventilazione, con effetti diretti su comfort, salubrità e benessere degli occupanti. A scala di sistema, come anticipato nei capitoli precedenti, gli edifici rappresentano circa il 30% del consumo finale di energia e oltre un quarto delle emissioni di CO₂; all'interno di tali consumi, riscaldamento e raffrescamento costituiscono la quota più rilevante degli usi finali nelle unità abitative europee (secondo i dati Eurostat del 2023, il riscaldamento domestico rappresenta

il 62,5 % del consumo finale di energia nel settore residenziale UE). Questi ordini di grandezza spiegano perché le principali *roadmap* internazionali collochino l'involucro al centro delle strategie di riduzione della domanda di energia e decarbonizzazione.

Le politiche europee convergono su un punto: per raggiungere gli obiettivi climatici occorre ridurre, in modo strutturale, i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento. La Commissione Europea sottolinea che tali fabbisogni pesano attorno alla metà dei consumi energetici complessivi dell'UE e che negli edifici rappresentano la gran parte degli usi finali.

Intervenire sull'involucro è quindi condizione necessaria per la neutralità climatica. Tale quadro sostiene le iniziative europee sull'industrializzazione del processo edilizio e sull'adozione di soluzioni prefabbricate, con particolare attenzione alla riqualificazione profonda del patrimonio esistente.

Negli ultimi dieci anni l'Europa ha conosciuto una crescente transizione verso soluzioni *off-site*, spinta da tre fattori convergenti:

- scarsità di manodopera qualificata;
- necessità di ridurre tempi e costi garantendo una qualità più stabile;
- obiettivi climatici che richiedono riqualificazioni profonde e scalabili.

Studi e progetti europei dedicati alla *industrialised renovation* documentano, con casi dimostrativi e *business case*, la fattibilità di facciate e coperture prefabbricate per retrofit profondi, con riduzione delle lavorazioni in sito, tempi certi e più alto controllo della qualità rispetto agli interventi tradizionali. Una rassegna scientifica sull'approccio *plug-and-play* (ad esempio il progetto H2020 P2ENDURE) riporta, per moduli di facciata integrati con impianti, riduzioni significative dei tempi di cantiere (fino a ~50% in casi studio) e maggiore ripetibilità delle prestazioni, a parità di requisiti energetici e acustici.

La "lezione" dei lavori IEA-EBC (*Energy in Buildings and Communities Programme*) avviati in Europa – in particolare *Annex 50 Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings* – mostra come un approccio "orientato al prodotto" (moduli standardizzati, controllo di produzione in fabbrica, collaudi ripetibili, ecc.) consenta di trasformare la riqualificazione in un processo industriale, riducendo l'alea tipica del cantiere e aumentando la conformità ai KPI energetici e non solo dell'involucro. Le linee guida operative sviluppate nell'*Annex 50* (rilievi digitali, progettazione dei giunti, assemblaggio a secco, integrazione dei servizi) sono oggi ampiamente recepite nei programmi europei più recenti.

La qualità costruttiva dell'involucro assume pertanto enorme rilevanza tanto nella nuova costruzione quanto nella riqualificazione. Se nel primo caso l'involucro può essere concepito ex novo, nel secondo si opera entro i vincoli imposti dallo stato di fatto. Negli interventi di nuova costruzione

– soprattutto nel prefabbricato – l’involucro assume un ruolo sistemico: elementi prodotti in stabilimento, tolleranze controllate, giunti progettati e testati, ispezioni ripetibili e tracciabili riducono le variabilità tipiche del cantiere tradizionale. Il vantaggio non è solo prestazionale (trasmissioni più basse, maggiore tenuta all’aria, ponti termici ridotti), ma anche gestionale: tempi di posa più certi, minore esposizione agli errori e possibilità di collaudi standardizzati *as-built*. Evidenze sperimentali su facciate modulari prefabbricate mostrano inoltre una più agevole integrazione impiantistica (ventilazione, recupero calore, canalizzazioni) e una migliore controllabilità dei nodi sensibili.

Negli interventi di riqualificazione profonda e retrofit energetico, pacchetti integrati sull’involucro (isolamento continuo di pareti e coperture, sostituzione dei serramenti, tenuta all’aria e ventilazione meccanica con recupero) consentono riduzioni dei consumi fino al 70-80% rispetto allo stato di fatto quando accompagnati da adeguata progettazione dei ponti termici e bilanciamento impiantistico adeguato. Gli esiti dimostrativi di *Annex 50* e dei progetti europei di facciata/tetto prefabbricati confermano la fattibilità tecnica di “avvolgere” l’edificio esistente con un nuovo guscio ad alte prestazioni, limitando interferenze con gli occupanti e tempi in sito.

Va chiarito, tuttavia, che spostare in fabbrica gran parte della qualità dell’involucro non elimina i rischi tipici delle interfacce: giunti progettati in modo incompleto, tolleranze di posa cumulative, discontinuità negli strati di tenuta e drenaggio possono compromettere le prestazioni globali. Nei sistemi a pannelli (calcestruzzo prefabbricato, legno a telaio o pannelli multistrato con cappotti integrati, pannelli “sandwich” con anima isolante), gli errori più frequenti riguardano: disallineamento dei moduli con fessurazioni in facciata; interruzioni dell’isolante in corrispondenza degli ancoraggi; nastature/sigillature incomplete; raccordi finestra-parete discontinui; drenaggi non funzionali nelle facciate leggere. Tali difetti si traducono in KPI peggiori rispetto alle attese: valori di trasmittanza termica (U) superiore al progetto, incremento delle dispersioni per ponte termico (Ψ), aumento dell’indice di permeabilità all’aria (n_{50} o q_{50}), rischio di condense interstiziali (f_{Rsi} insufficiente) e peggioramento del comfort acustico.

Il settore è oggi però in grado di adottare procedure di controllo lungo le principali fasi del processo edilizio, al fine di garantire le qualità attese, in particolare in termini di prestazione energetica:

- Nella **fase di progettazione esecutiva** è possibile eseguire procedure di modellazione termo-igrometrica (UNI EN ISO 10211:2018 e /13788:2013) dei nodi, calcolo e ottimizzazione delle ψ -lineari; predefinizione dei piani qualità di produzione (materiali, tolleranze, sigillanti, membrane) con tracciabilità dei lotti.

- Nella **fase di produzione** si possono eseguire campionamenti dimensionali e di densità/conduktività dell'isolante; prove su serramenti e facciate (permeabilità all'aria, tenuta all'acqua, resistenza al vento) secondo norme di famiglia; ispezioni visive assistite da checklist digitali.
- Nella **fase di montaggio** è importante il controllo geometrico con stazione totale o laser-scanner; test di adesione dei nastri; endoscopie per cavedi e giunti; verifiche di continuità degli strati di tenuta.
- Nella **fase di collaudo** è possibile svolgere prove di tenuta all'aria dell'unità o dell'edificio con metodo della pressurizzazione (n50/q50 secondo UNI EN ISO 9972:2015); termografia IR per evidenziare discontinuità (UNI EN 13187:1999 e UNI EN ISO 6781-3:2021); misure *in situ* della trasmittanza con metodo HFM (UNI EN ISO 9869-1:2015).

Queste pratiche, sempre più diffuse, permettono di validare in opera i KPI di progetto e di definire eventuali azioni correttive prima che diventino troppo onerose o impraticabili.

Basandosi sulla classificazione adottata nella prassi italiana e riportata nella norma UNI 8290 (serie), nelle sezioni successive si inquadra l'involucro nelle sue principali articolazioni:

- chiusure orizzontali inferiori;
- chiusure verticali opache;
- chiusure verticali trasparenti;
- chiusure superiori.

Per ciascuna tipologia sono descritti i principali errori costruttivi da evitare e le relative soluzioni, insieme a strumenti e metodi di controllo da applicare nelle diverse fasi del processo edilizio, così da garantire il rispetto delle soglie prestazionali dei principali indicatori di performance.

6.1. Chiusure orizzontali inferiori

Le chiusure orizzontali inferiori – pavimenti contro terra, solai su vespaio/intercapedine ventilata e solai su locali non climatizzati – sono uno dei “nodi sensibili” dell'involucro edilizio.

In questo punto dell'edificio si concentrano dispersioni termiche lineari lungo il perimetro, rischi igrotermici (risalite capillari, condense superficiali/interstiziali), discontinuità della tenuta all'aria e potenziali ingressi di gas dal suolo (ad esempio radon o Composti Organici Volatili), aspetti che possono inficiare tanto le prestazioni energetiche quanto aspetti legati all'*Indoor Environmental Quality* (IEQ) degli ambienti.

6.1.1. Errori ricorrenti da evitare lungo il processo edilizio

Nella fase di “progettazione” l’errore più frequente è sottostimare gli scambi verso il terreno e la rilevanza del rapporto perimetro/area (P/A). Per i pavimenti contro terra la trasmittanza di progetto non è un semplice “U di strato”, ma dipende dai calcoli secondo UNI EN ISO 13370:2019 (o metodi conformi), che includono l’effetto bordo e le dispersioni ai margini. Trascurare la modellazione del nodo parete-pavimento, affidandosi a valori tabellari non pertinenti, porta a ponti termici lineari (Ψ) perimetrali sottovalutati e a trasmittanze termiche effettive peggiori. La normativa (UNI EN ISO 13370:2019; UNI EN ISO 10211:2018 per il dettaglio, UNI EN ISO 14683:2018 per i metodi semplificati) definisce in modo chiaro come calcolare le perdite lineari e le temperature minime di superficie; ignorarle in fase esecutiva significa “disperdere” gran parte del fabbisogno proprio lungo i bordi dell’edificio.

Nell’ambito delle sperimentazioni attuate nel progetto di ricerca INSITER (vedi Capitolo 7) è emerso che i giunti fondazione-piano terra e i giunti con le partizioni interne verticali sono riconosciuti tra i rischi tecnici primari per l’insorgere di ponti termici e tenuta all’aria. La raccomandazione è modellare e specificare i giunti con tolleranze e liste controllo, prima della fase di produzione e/o cantierizzazione.

Un potenziale ulteriore macro-errore da evitare è sottovalutare l’igrotermia dell’attacco a terra del fabbricato. L’assenza di tagli capillari efficaci, l’inversione di barriere (vapore/gas) o la continuità interrotta della linea di drenaggio portano a rischi di umidità di risalita, condense sul battiscopa e potenziale degrado dell’isolante oltre che delle finiture superficiali.

Infine, è rilevante monitorare in fase di progettazione anche le scelte attuate in merito ad una idonea tenuta all’aria. Spesso la “linea” di tenuta si interrompe proprio al passaggio parete-platea/soletta, in corrispondenza di soglie e passaggi impiantistici. Un nodo non continuo si traduce in n50 peggiori e discomfort locale. Non solo, anche il rischio gas-radon va affrontato come requisito di base: l’Organizzazione Sanitaria Mondiale (OMS) raccomanda un livello di riferimento di 100 Bq/m³ per gli ambienti residenziali e la progettazione deve prevedere barriere continue e/o predisposizioni alla depressurizzazione sotto-platea, specie per gli edifici pubblici. Linee guida di progetto insistono su piani di qualità che fissino membrane, nastri, primer e punti di prova già in officina, con tracciabilità dei lotti e check su tolleranze prima dell’assemblaggio.

Nella fase di produzione di componenti ed elementi in fabbrica gli errori tipici riguardano disallineamenti dimensionali dei moduli base (basamenti prefabbricati, pannelli di zoccolatura isolati, “casseri isolanti” per platee) e

saldature incomplete delle membrane antigas pre-applicate. A tale scopo si suggerisce di eseguire prove campione su accoppiamenti e materiali (ad esempio densità e conducibilità termica dell'isolante, adesione nastri, compressibilità delle guarnizioni, ecc.) e la creazione di “kit di giunto” standardizzati con istruzioni *Augmented Reality* (AR) e *Virtual Reality* (VR) e *Quick Response* (QR) code per l'assemblaggio in cantiere.

Invece, nella fase di montaggio, assemblaggio e/o posa in opera si riscontrano spesso discontinuità dell'isolamento al bordo platea, giunti non serrati tra soglia e telaio, sovrapposizioni e sigillature delle membrane non conformi al piano qualità, attraversamenti impiantistici senza guarnizioni, mancata sigillatura dei fori di cassetta. Tali difetti generano ponti termici lineari di bordo elevati, cali del fattore di temperatura f_{Rsi} e infiltrazioni d'aria localizzate. INSITER raccomanda controlli geometrici (stazione totale/laser-scanner) e checklist digitali “prima della chiusura” per anticipare la non conformità.

Nella fase di collaudo ed esercizio il rischio potenziale da evitare è attuare misure di controllo specifiche come *blower-door* (UNI EN ISO 9972:2015), termografia (UNI EN 13187:1999) e, dove utile, misure *in situ* di trasmissioni termiche (UNI EN ISO 9869-1:2015).

Come anticipato nelle sezioni precedenti, nei capitolati tecnici è opportuno indicare non solo le specifiche dei materiali, ma anche le procedure e i criteri di controllo (metodi, soglie di accettazione, frequenze e responsabilità) per validare gli indicatori chiave di prestazione – *Key Performance Indicators* (KPI) – evitando che rimangano meri valori non verificati.

Di seguito si riportano, in modo puntuale, i principali KPI da presidiare per le “chiusure orizzontali inferiori”.

6.1.2. KPI da monitorare

6.1.2.1. Trasmittanza verso il terreno

È il KPI primario dei pavimenti contro terra e dipende da geometria e rapporto Perimetro/Area (P/A) del pavimento controterra, a parità di superficie; un pavimento con tanto bordo rispetto all'area disperde di più perché i margini sono considerati i punti più “deboli”.

Per il calcolo in fase di progetto si usa la norma europea/internazionale UNI EN ISO 13370:2019, che considera gli scambi di calore con il terreno. Quando invece serve analizzare un dettaglio (per esempio il punto in cui pavimento e parete si incontrano), si sviluppano modelli bidimensionali o tridimensionali secondo UNI EN ISO 10211:2018 al fine di stimare le perdite

aggiuntive lungo il bordo (i cosiddetti ponti termici lineari) e controllare le temperature minime superficiali; in alternativa, in casi semplici, si può ricorrere ai metodi semplificati della UNI EN ISO 14683:2018.

Per edifici a energia quasi zero (nZEB) e per interventi di riqualificazione profonda (*deep renovation*) in climi temperati è sensato mirare ad un valore di trasmittanza termica del pavimento (U_{floor}) $\leq 0,20-0,25$ W/m²K. Le pratiche più spinte – come lo standard Casa Passiva (*Passivhaus*) nei nuovi edifici – scendono a 0,10-0,15 W/m²K. Come riferimento, alcuni quadri normativi europei collocano i requisiti per i pavimenti tra 0,15 e 0,26 W/m²K. In Italia il valore dipende dalla fascia climatica in cui è collocato l'edificio. Questi numeri aiutano a capire l'ordine di grandezza da mettere a capitolato e a progetto.

Infine, verificare in opera è importante per evitare che i valori restino solo “sulla carta”. La misura può essere fatta con piastre termoflussimetriche (metodo *Heat Flow Meter* – HFM, norma UNI EN ISO 9869-1:2015) durante la stagione più fredda, quando il salto di temperatura è sufficiente a ottenere dati affidabili.

Così si conferma che il pavimento isola davvero quanto previsto e, se necessario, si interviene prima che i consumi ne risentano.

6.1.2.2. Trasmittanza termica lineare del bordo

Nel punto di incontro tra platea e parete si concentra spesso una parte rilevante delle dispersioni di calore, perché qui si forma un ponte termico lineare.

L'indicatore da controllare è la trasmittanza termica lineare del giunto, indicata con Ψ e misurata in W/mK. Il suo valore si determina con calcolo agli elementi finiti bidimensionale o tridimensionale secondo UNI EN ISO 10211:2018, oppure – quando il dettaglio lo consente – con i metodi semplificati della UNI EN ISO 14683:2018.

Per edifici nZEB è prudente progettare il nodo in modo da ottenere Ψ compresa tra 0,01 e 0,05 W/mK. Il risultato si raggiunge curando la continuità dell'isolamento tra parete e platea, impiegando zoccolature pre-isolate che proteggono il piede della muratura e adottando elementi di taglio termico in corrispondenza delle soglie delle aperture, così da evitare interruzioni dello strato isolante e temperature superficiali troppo basse. Il contributo complessivo dei ponti termici lineari dell'edificio si riassume nel “valore Y” (fattore di correzione dei ponti termici), espresso in W/m²K. Questo termine va incluso nel bilancio energetico insieme ai contributi di superficie ($U \cdot A$).

Le applicazioni sviluppate nel progetto europeo INSITER mostrano che il bordo platea-parete e i giunti con muri interni portanti possono incidere in modo significativo su Y, motivo per cui la loro progettazione e verifica devono essere prioritarie già in fase esecutiva.

6.1.2.3. Fattore di temperatura superficiale

Il fattore di temperatura superficiale f_{Rsi} è un indicatore adimensionale che misura quanto la temperatura della superficie interna di un nodo costruttivo si mantiene “calda” rispetto all’aria esterna. Valori più alti di f_{Rsi} indicano superfici più calde e quindi minor rischio di condensa superficiale e di crescita di muffe. Questo parametro è definito come:

$$f_{Rsi} = (\theta_{si} - \theta_e) / (\theta_i - \theta_e)$$

dove θ_{si} è la temperatura della superficie interna, θ_i quella dell’aria interna e θ_e quella esterna.

La verifica si esegue calcolando la temperatura minima della superficie del dettaglio. Per i casi semplici si applica la UNI EN ISO 13788:2013 (metodo stazionario con condizioni igrometriche di progetto); quando invece il nodo è complesso – come nel punto platea-parete o in presenza di elementi di taglio termico – la temperatura θ_{si} si ricava da un modello 2D/3D secondo UNI EN ISO 10211:2018 e si confronta con il valore minimo ammissibile $\theta_{si,min}$ corrispondente alle condizioni termo-igrometriche interne.

Nella pratica molte linee guida europee assumono come riferimento $f_{Rsi} \geq 0,75$ per ambienti residenziali a 20 °C con umidità relativa interna moderata; in presenza di umidità più alta o di esterni più rigidi, il valore minimo richiesto aumenta.

Il controllo del f_{Rsi} va pianificato già nel piano della qualità progettuale: si definiscono i nodi critici, si modellano le configurazioni previste e si fissano i valori obiettivo per ciascun dettaglio. Ciò è particolarmente importante quando si adottano soglie prefabbricate con elementi di taglio termico o quando si utilizza isolamento sottile su pavimenti esistenti, perché piccole discontinuità dell’isolante o dei giunti possono abbassare la temperatura superficiale nel bordo.

Nella fase esecutiva, la continuità degli strati (isolante, membrane, sigillature, ecc.) e la corretta posa degli accessori vanno documentate; in collaudo, la termografia infrarossa in condizioni idonee può evidenziare eventuali punti freddi, da approfondire con misure puntuali di temperatura per verificare il rispetto del f_{Rsi} di progetto.

6.1.2.4. Tenuta all'aria

La continuità della linea di tenuta all'aria attraverso il nodo pavimento-parete è decisiva: eventuali interruzioni lungo soglie, passaggi impiantistici o giunti di dilatazione diventano punti di perdita che aumentano i consumi e riducono il comfort.

L'indicatore più usato è n_{50} [h^{-1}], cioè il numero di ricambi d'aria all'ora misurato con una differenza di pressione di 50 Pa tra interno ed esterno:

$$n_{50} = \dot{V}_{50} / V$$

dove \dot{V}_{50} è la portata d'aria che attraversa l'involucro a 50 Pa e V è il volume interno riscaldato. In alternativa alcuni quadri normativi usano q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$], la permeabilità d'aria riferita all'area dell'involucro.

Per edifici ad alta efficienza energetica, i valori di riferimento comunemente adottati sono: $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ per nuovi edifici conformi allo standard *Passivhaus* e $n_{50} \leq 1,0 \text{ h}^{-1}$ per interventi di riqualificazione avanzata *EnerPHit*. La determinazione deve essere eseguita secondo UNI EN ISO 9972:2015 (metodo della pressurizzazione tramite ventilatore): si misura la curva portata-pressione in pressurizzazione e depressurizzazione, si calcola n_{50} e, contestualmente, si effettua la ricerca delle perdite (*smoke test*, termografia in condizioni idonee, anemometri/sonde).

In fase di progetto la linea di tenuta va disegnata e specificata: continuità tra la barriera all'aria del solaio/platea (ad esempio calcestruzzo finito, membrane o strati continui) e quella della parete (intonaco a tutta superficie, pannelli strutturali nastrati, membrane interne), con dettagli per soglie, passaggi impiantistici e giunti.

Nei sistemi prefabbricati è utile prevedere kit di giunto con nastri, primer e guarnizioni certificati, oltre a prove preliminari di adesione su supporto reale. In cantiere la corretta posa si controlla con ispezioni visive e test rapidi, mentre il *blower door* secondo la UNI EN ISO 9972:2015 – preferibilmente anche in fase intermedia, prima delle chiusure – consente di intercettare le discontinuità e correggerle.

6.1.2.5. Qualità igrometrica e gas-suolo

Nelle aree a rischio, l'indicatore chiave è la concentrazione di radon rilevata negli ambienti interni dopo la conclusione dei lavori. Come riferimento sanitario già citato, l'Organizzazione Mondiale della Sanità indica 100 Bq/m^3 (media annua) quale livello di riferimento; l'attuale normativa europea richiede che ogni Stato membro fissi un livello di riferimento nazionale non

superiore a 300 Bq/m³ (Direttiva 2013/59/Euratom). Questi valori guidano la fase di progetto, di collaudo e, se necessario, interventi di mitigazione.

La qualità del nodo a terra si valuta verificando la continuità della barriera antigas (membrane e nastri correttamente sovrapposti e sigillati, attraversamenti impiantistici con guarnizioni) e predisponendo, ove opportuno, sistemi di depressurizzazione sotto-platea: *Sub-Slab Depressurization* (SSD), attivo con ventilatore, o *Active Soil Depressurization* (ASD), che sono le tecniche più efficaci per ridurre l'ingresso di gas dal suolo e mantenere stabili le concentrazioni nel tempo.

La predisposizione nella fase di cantiere di tubi, pozzetti e/o passaggi è una misura di sicurezza a basso costo che facilita eventuali attivazioni successive. Per la misura si adottano metodi conformi alla serie UNI EN ISO 11665:

- misure integrate di lunga durata con rivelatori a tracce alfa (indicative della media stagionale/annuale);
- misure in continuo con monitor elettronici (utili per il *follow-up* e per osservare l'andamento giornaliero/stagionale).

Le linee guida OMS raccomandano campagne abbastanza lunghe da rappresentare la media annua. I monitoraggi in continuo, inclusi dispositivi connessi con *Internt of Things* (IoT), sono sempre più usati in edifici scolastici, edifici pubblici o in abitazioni a rischio per il controllo periodico.

6.1.2.6. KPI geometrici e di posa

Gli aspetti geometrici – planarità, livello altimetrico, allineamento, squadratura, verticalità dei fronti e geometria dei giunti – condizionano direttamente trasmissanza, ponti termici e tenuta all'aria del nodo a terra.

Per questo, nel corso del progetto INSITER, la geometria è stata trattata come un KPI a tutti gli effetti e ne prevede misure dedicate “prima della chiusura”, con soglie di accettazione e procedure di autocontrollo digitali.

Per il pavimento/platea contano: la planarità (deviazioni locali della quota su lunghezze di misura definite), la quota assoluta rispetto agli assi di riferimento, l'allineamento dei bordi rispetto alle linee guida del progetto e la squadratura degli angoli; per il bordo pavimento-parete sono decisivi la verticalità dell'alzato e la geometria dei giunti (larghezza utile per nastri/guarnizioni, continuità dei risvolti di membrane, posizionamento delle soglie). Errori cumulati fra fondazioni, lastre prefabbricate e moduli di parete generano disallineamenti che degradano Ψ al bordo, abbassano il f_{Rsi} e aprono vie preferenziali all'aria.

Per definire soglie e metodi di verifica, INSITER rimanda alla DIN 18202:2019 – *Tolerances in Building Construction*, non come elenco rigido

di numeri ma come metodologia per fissare tolleranze coerenti con il progetto. La norma distingue controlli su punti, linee e piani: si misurano dimensioni, angoli, deviazioni di planarità e deviazioni di allineamento e si confrontano con valori limite tabellati per diverse lunghezze di misura. A tale scopo diventa importante, già in fase di progettazione, definire esempi e tabelle di tolleranze dimensionali (*flatness* e *alignment*) invitando i singoli produttori a compilare le colonne con i propri limiti di accettazione da contrattualizzare in capitolato.

Il controllo può essere scalabile: dalla regola/livella digitale fino a stazione totale e laser-scanner 3D per rilievi densamente campionati, con confronto al modello BIM e calcolo automatico delle differenze dimensionali per elementi e posizionamenti.

Nello specifico le migliori procedure di controllo dovrebbero includere: il rilievo della fondazione (quota e planarità), la verifica del giunto pavimento-fondazione, il controllo della planarità e posizione delle lastre prefabbricate, la verifica dei giunti tra lastre e del giunto pavimento-parete.

Per evitare rilavorazioni, INSITER raccomanda controlli in progress: *laser-levelling/laser-scanner* per la planarità, check di allineamento con stazione totale, documentazione fotografica geo-referenzata e checklist digitali collegate a QR code dei componenti; le non conformità vengono registrate con testo, coordinate, *timestamp* e immagini e ritornano al capocantiere tramite piattaforma condivisa.

Il tutto si inserisce nel ciclo Osserva-Pianifica-Esegui-Verifica-Agisci o (O)PDCA: pianificare le soglie di tolleranza, montare, controllare le tolleranze accettabili, approvare o correggere, con standardizzazione dei protocolli di auto-ispezione.

Importante è osservare anche la planarità. Infatti, la deviazione di planarità è la differenza tra la superficie reale e il piano teorico su una lunghezza di misura definita (ad esempio 2m, 4m, 10m, secondo le classi di controllo). Il dato si esprime come scostamento massimo ammesso $\Delta_z(L)$. Un'eccessiva ondulazione del sottofondo rende instabili soglie e telai, ostacola la continuità del taglio termico e compromette la tenuta dei nastri.

Nell'ambito della geometria rientrano anche l'allineamento e la verticalità. L'allineamento controlla lo scostamento di un bordo dalla retta di riferimento: si misura la deviazione massima lungo il perimetro $\Delta_y(L)$ e la si confronta con il limite di accettazione. La verticalità verifica lo scostamento dal piombo su un'altezza definita; errori che qui si traducono in giunti disomogenei e pressioni irregolari su guarnizioni/sigillanti.

La soglia delle aperture è un punto critico: va verificata la quota finita rispetto al pavimento, la planarità locale, l'allineamento col telaio e la continuità del taglio termico sottosoglia (moduli isolati, profili a taglio termico,

risvolti di membrane). Tolleranze e larghezze utili di giunto devono rispettare le schede dei produttori per garantire corretta compressione delle guarnizioni e continuità della barriera all'aria.

6.2. Chiusure verticali opache

Le chiusure verticali opache (pareti esterne “piene”, con o senza intercapedine/ventilazione e con eventuali strati di rivestimento) hanno un peso decisivo sulla domanda di energia e sul comfort perché controllano dispersioni per trasmissione, ponti termici nei giunti (con solai, con coperture e con serramenti), tenuta all'aria e gestione del vapore/acqua meteorica.

Nelle soluzioni prefabbricate il controllo qualità è potenzialmente più alto, ma resta essenziale presidiare i giunti e le tolleranze geometriche.

6.2.1. Errori ricorrenti da evitare lungo il processo edilizio

Nella fase di “progettazione” gli errori più dannosi nascono da sottostime “di sistema”. Calcolare la trasmittanza termica (U) della parete come somma di strati senza verificare i ponti termici dei giunti (nodi chiusura verticale con solaio intermedio, solaio a terra, fondazione, copertura, ecc.) porta a scarti importanti tra atteso e costruito. La norma per il calcolo della U è la UNI EN ISO 6946:2018; per i ponti termici si usano modelli 2D/3D secondo la UNI EN ISO 10211:2018 (con la definizione di temperatura minima superficiale e Ψ lineare) o, nei casi semplici, i metodi semplificati proposti dalla UNI EN ISO 14683:2018.

Altra criticità frequente è trascurare il percorso continuo della barriera all'aria e degli strati di controllo del vapore e del vento. Se il progetto non considera adeguatamente la linea di tenuta e i risvolti delle membrane, in cantiere si moltiplicano le discontinuità.

Nella fase di produzione in fabbrica di pannelli prefabbricati per facciate esterne (ad esempio calcestruzzo sandwich, legno a telaio/XLAM con cappotto, telai metallici con rivestimento e isolante, ecc.) gli errori tipici sono: disallineamenti dimensionali, vuoti d'isolante in corrispondenza di inserti/ancoraggi, nastrature o saldature di membrane incomplete e interruzioni della barriera al vento sul lato esterno. A tale scopo si raccomanda campionamenti dimensionali e di materiali, kit di giunto standardizzati. Nel corso della ricerca INSITER sono state messe in pratica anche azioni innovative come la definizione di istruzioni digitali (AR/VR, QR) per l'assemblaggio da fornire a chi opererà nella fase di cantiere (vedi Capitolo 7).

Nella fase di montaggio e assemblaggio in sito, gli errori più ricorrenti riguardano: discontinuità dell'isolamento ai giunti tra moduli; larghezze di giunto non compatibili con nastri/guarnizioni; staffaggi dei rivestimenti senza taglio termico; raccordi finestra-parete non continui; piani di posa fuori tolleranza che stressano i sigillanti. Si consiglia sempre di eseguire controlli geometrici con stazione totale/laser-scanner e di osservare metodologicamente checklist digitali “prima della chiusura” e tracciabilità delle non conformità.

Infine, nella fase di collaudo ed esercizio il rischio più grande è non misurare accuratamente le prestazioni, accelerando la fase di consegna dell'edificio. Ad esempio, non applicare la verifica con *blower door test* (UNI EN ISO 9972:2015), termografia IR (UNI EN 13187:2001) e, quando serve, misure *in situ* della trasmittanza (HFM, UNI EN ISO 9869-1:2015) pregiudica il risultato finale.

6.2.2. KPI da monitorare

6.2.2.1. Trasmittanza termica della parete

La trasmittanza termica di una parete U (W/m^2K) esprime quanta energia termica attraversa $1 m^2$ di parete quando tra interno ed esterno c'è $1 ^\circ C$ di differenza: più il valore è basso, più la parete isola.

In fase di progetto si calcola seguendo la UNI EN ISO 6946:2018, sommando le resistenze degli strati e tenendo conto dei casi non omogenei, ad esempio quando l'isolante è attraversato da ordini o fissaggi che “accorciano” il percorso del calore. Questo valore riguarda la porzione “piena” del componente: le perdite dovute ai giunti (come l'incontro con solai, coperture o spalle finestra) sono ponti termici che si sommano a parte e che vanno valutati con metodi dedicati; in letteratura sono spesso sintetizzati nel cosiddetto “valore Y ”, cioè l'apporto lineare complessivo dei ponti termici ai flussi di calore dell'involucro. Per questo INSITER propone di affiancare al calcolo della U un'attenzione esplicita ai dettagli, perché il contributo dei bordi può diventare rilevante sul bilancio energetico finale.

Il valore U atteso dipende dagli obiettivi di progetto e dalla fascia climatica. In contesti ad alta efficienza, come quelli ispirati al *Passivhaus*, i componenti opachi si collocano tipicamente entro $0,10-0,15 W/m^2K$; sono valori che aiutano a contenere in modo strutturale i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento. In generale, per climi temperati un obiettivo progettuale prudente per le pareti si attesta nell'intervallo $0,20-0,25 W/m^2K$, mentre i limiti cogenti in Italia variano per zona climatica e normativa locale.

Per evitare che i numeri restino “sulla carta”, la trasmittanza può essere misurata in opera con il metodo del termoflussimetro (*Heat Flux Meter*) descritto dalla UNI EN ISO 9869-1:2015. In pratica si applicano sensori di flusso e di temperatura per alcune giornate e si ricava la U reale del componente. Nel corso del progetto INSITER sono state determinate le condizioni che rendono affidabile la misura: differenza di temperatura interno/esterno di almeno 5 °C, buon contatto dei sensori, scelta di zone rappresentative lontane dai ponti termici e un periodo di monitoraggio non inferiore a 72 ore (per elementi molto isolati può servire più tempo). A supporto, l’uso della termografia aiuta a posizionare i sensori nella zona più omogenea. Il riferimento UNI EN ISO 9869-1:2015 consente, in condizioni adeguate, stime con errore dell’ordine di grandezza dell’8%, mentre approcci integrati con termografia e modello numerico, testati nel progetto, possono ridurre i tempi di prova mantenendo coerenza con gli standard.

In sintesi, la qualità energetica della parete nasce da tre attenzioni: un calcolo corretto della U secondo UNI EN ISO 6946:2018, la progettazione e verifica dei dettagli per limitare i ponti termici, e una misura *in situ* quando è utile validare le prestazioni *as-built*. Questa impostazione rende più solido il collegamento fra progetto, cantiere e risultato finale.

6.2.2.2. Ponti termici lineari a giunti e discontinuità

I ponti termici lineari sono le “fughe” di calore che si concentrano nei giunti: l’incontro tra solaio e parete, tra parete e copertura, le spalle e i sottosoglia delle finestre, gli attacchi dei rivestimenti o delle staffe. In questi punti la geometria cambia, i materiali si interrompono o compaiono elementi molto conduttivi (ad esempio staffaggi metallici): il flusso di calore trova una scorciatoia e aumenta localmente le dispersioni, con effetti anche sulle temperature superficiali interne.

Per descrivere in modo quantitativo questo fenomeno si usa la trasmittanza termica lineare, indicata con Ψ e misurata in W/m·K: dice quanta potenza termica si disperde per ogni metro lineare di giunto e per ogni grado di differenza termica tra dentro e fuori. Il suo calcolo di progetto si svolge con modelli numerici bidimensionali o tridimensionali secondo la UNI EN ISO 10211:2018, che consente anche di verificare le temperature minime di superficie; nei casi semplici si possono usare i metodi semplificati e i valori di riferimento messi a disposizione dalla UNI EN ISO 14683:2018. Queste due norme sono il riferimento internazionale per la progettazione e la verifica dei ponti termici nei giunti dell’involucro.

Quando si guarda all’edificio nel suo insieme, il contributo di tutti i giunti si riassume nel cosiddetto “valore Y ”, cioè l’apporto globale delle dispersioni

lineari normalizzato all'area dell'involucro: in pratica, si sommano i prodotti $\Psi \times$ lunghezza del giunto e si dividono per l'area disperdente; il risultato si aggiunge ai contributi “di superficie” ($U \times A$) per costruire il bilancio delle perdite per trasmissione. È l'approccio usato sia nella pratica progettuale sia in diversi schemi nazionali di calcolo.

Dal punto di vista dei valori obiettivo, nei retrofit ad alta efficienza energetica e nelle nuove costruzioni a energia quasi zero ha senso puntare a Ψ nell'ordine dei centesimi di $W/m \cdot K$ per i giunti più critici. Il valore dipende da geometrie, materiali e clima, ma l'ordine di grandezza è quello di ottenere 0,01-0,05 $W/m \cdot K$, che è realistico quando c'è continuità dell'isolante attraverso il giunto, zoccolature pre-isolate al piede, tagli termici in corrispondenza di soglie e staffaggi e, più in generale, quando si evitano elementi metallici passanti non isolati. I cataloghi conformi a UNI EN ISO 14683:2018 mettono a disposizione valori di default prudenziali e criteri per l'uso di dettagli tipo, utili come riferimento quando non è possibile modellare ogni singolo nodo.

Perché questi numeri non restino teorici, è utile capire come si controllano. In progettazione si eseguono modelli 2D/3D (gli stessi previsti da UNI EN ISO 10211:2018) per i nodi rappresentativi e si documentano le soluzioni costruttive che garantiscono la continuità degli strati.

In cantiere, l'esperienza condotta nella ricerca INSITER mostra che la qualità dei giunti dipende molto dalla geometria: planarità e allineamento fuori tolleranza generano fessure non previste, giunti troppo larghi o troppo stretti per nastri e guarnizioni, e alla fine peggiorano Ψ . Per questo è importante, progetto per progetto, proporre checklist di controllo “prima della chiusura”. Controlli geometrici con stazione totale o laser-scanner e tracciabilità digitale delle non conformità sono pratiche che possono ridurre gli errori tipici di posa ai giunti tra moduli e ai raccordi con i serramenti.

In esercizio e in collaudo, la termografia a infrarossi è un ottimo strumento di pre-diagnosi: permette di individuare zone anomale (più fredde d'inverno o più calde d'estate) compatibili con ponti termici o discontinuità dell'isolamento.

Questi strumenti non sostituiscono il calcolo di progetto, ma aiutano a validare l'*as-built* e a dare priorità agli interventi correttivi quando emergono scarti significativi.

6.2.2.3. Fattore di temperatura superficiale contro muffa/condensa

Il fattore di temperatura superficiale f_{Rsi} serve a capire quanto la superficie interna di un nodo (per esempio l'incontro parete-solaio o la spalla di una finestra) rimanga “calda” rispetto all'aria esterna ed è definito da:

$$f_{Rsi} = (\theta_{si} - \theta_e) / (\theta_i - \theta_e)$$

Più il valore è alto, più la superficie resta sopra la soglia critica in cui possono formarsi condensa e muffe. Il calcolo in progetto si svolge con la norma UNI EN ISO 13788:2013 quando il dettaglio è semplice, oppure con modelli numerici 2D/3D secondo EN ISO 10211:2018 quando il nodo è complesso e occorre stimare con precisione temperature minime e flussi ai giunti.

Molte linee guida europee assumono come riferimento $f_{Rsi} \geq 0,75$ per ambienti residenziali con aria interna a circa 20 °C e umidità moderata: è il criterio riportato, ad esempio, nei documenti tecnici del Regno Unito (BS 5250:2021 e IP 1/06) e in prassi nazionali affini; altri quadri, come la DIN tedesca, indicano soglie dell'ordine di 0,70-0,75 a seconda delle condizioni. In pratica, significa progettare nodi capaci di mantenere la superficie interna sufficientemente “temperata” anche in giornate fredde; con 20 °C all'interno e 0 °C all'esterno, un f_{Rsi} di 0,75 corrisponde a una temperatura superficiale minima di circa 15 °C ($\theta_{si} = \theta_e + f_{Rsi} (\theta_i - \theta_e)$), riducendo il rischio di condensa e crescita biologica.

Perché il valore sia credibile anche “sul campo”, la verifica in collaudo parte spesso dalla termografia a infrarossi, utile a evidenziare zone fredde dove il fattore potrebbe essere insufficiente adottando l'uso del metodo UNI EN 13187:2001 per la rilevazione qualitativa delle irregolarità.

Le anomalie termografiche guidano poi misure puntuali di temperatura per stimare f_{Rsi} nel punto più critico e confrontarlo con il valore di progetto. Sul piano progettuale, ottenere f_{Rsi} elevati significa curare la continuità dello strato isolante attraverso i giunti, limitare gli elementi passanti molto conduttivi, inserire tagli termici in soglie e staffaggi e definire tolleranze geometriche che evitino fessure e disallineamenti capaci di abbassare la temperatura superficiale.

Insistere su modellazione dei dettagli a rischio, check “prima della chiusura” – incrociate con checklist digitali e termografia –, tracciabilità delle non conformità per correggere in tempo eventuali criticità garantiscono un fattore f_{Rsi} in linea con quanto progettato e potenzialmente mantenuto lungo tutto il ciclo edilizio.

6.2.2.4. Tenuta all'aria

La tenuta all'aria è uno dei parametri più rilevanti per tutti gli edifici nZEB perché determina il livello di ermeticità e sigillatura dell'involucro. In pratica descrive la continuità della barriera contro i passaggi d'aria attraverso pareti, serramenti e giunti. Si verifica con la prova di pressurizzazione dell'edificio (*blower door*) secondo la norma UNI EN ISO 9972:2015: un

ventilatore crea una differenza di pressione tra interno ed esterno misurando la portata d'aria che attraversa l'involucro; oltre al valore numerico, la prova include la ricerca mirata delle perdite (con fumo, anemometri o termografia) per individuarne la posizione. Questa metodologia è il riferimento internazionale per la misura della permeabilità all'aria a scala edificio.

Per facilitare il confronto tra edifici si usa spesso l'indicatore *n50*, cioè il numero di ricambi d'aria all'ora a 50 Pa: valori più bassi indicano un involucro più continuo e, quindi, minori dispersioni e meno spifferi.

Nelle nuove costruzioni ad alte prestazioni ispirate allo standard *Passivhaus*, il valore-obiettivo è $n50 \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$; nei grandi interventi di riqualificazione secondo il programma *EnerPHit* il limite ammesso è $n50 \leq 1,0 \text{ h}^{-1}$.

Questi riferimenti sono esplicitati nella documentazione tecnica del *Passivhaus Institut* e si basano comunque su misure eseguite conformemente alla UNI EN ISO 9972:2015. Per arrivare a un risultato affidabile è utile prevedere due momenti di verifica:

- una “prova intermedia”, quando l'involucro è chiuso ma prima della posa in opera dei rivestimenti e/o delle contropareti. Questo serve per correggere facilmente eventuali discontinuità;
- una “prova finale”, a lavori conclusi, per certificare la prestazione complessiva.

Nelle esperienze INSITER la prova può essere integrata con strumenti per la localizzazione “fine” delle perdite: ad esempio, sonde a ultrasuoni con tracciamento della posizione e collegamento al modello informativo dell'edificio (BIM), che aiutano a mappare fessure di pochi millimetri e a documentare le correzioni.

Oltre alla misura di edificio, possono essere utili verifiche su singoli componenti. Per pareti, rivestimenti e facciate leggere esistono prove di laboratorio sulla permeabilità all'aria dei componenti secondo UNI EN 12114:2000; per serramenti, la prova secondo EN 1026 conduce alla classificazione di tenuta dell'aria EN 12207.

Questi test non sostituiscono la *blower door* a scala edificio, ma riducono il rischio in cantiere: componenti certificati e dettagli costruttivi coerenti rendono più semplice raggiungere i target di *n50*.

In sintesi, la qualità della tenuta all'aria delle chiusure verticali opache nasce da tre attenzioni: progettare la linea di barriera all'aria senza interruzioni attraverso pareti, serramenti e giunti; verificare con prova *blower door* UNI EN ISO 9972:2015, preferibilmente sia in corso d'opera sia a fine lavori; utilizzare, quando serve, prove di componente e strumenti di diagnostica (termografia e ultrasuoni) per trovare e risolvere rapidamente le perdite. Questa impostazione permette di trasformare un indicatore spesso “presunto” in una prestazione misurata e tracciabile.

6.2.2.5. Gestione del vapore e dell'acqua meteorica

La gestione del vapore e dell'acqua meteorica nelle pareti opache serve, in pratica, a scongiurare due problemi:

- l'insorgere di condensa all'interno della stratigrafia accelerando il degrado di materiali e favorendo l'affluire di muffe;
- la penetrazione di pioggia, spinta dal vento, oltre i rivestimenti e i giunti.

In fase di progetto la verifica "igrometrica" di base si esegue con la UNI EN ISO 13788:2013, che valuta mese per mese se, con le condizioni climatiche medie, il pacchetto tende ad accumulare umidità o a smaltirla; quando il nodo è critico (per esempio isolamento interno su murature pesanti, legno e materiali igroscopici, climi freddi/umidi, cicli di bagnatura/essiccamento importanti, ecc.) è preferibile usare il modello transitorio previsto dalla UNI EN 15026:2008, che simula il trasferimento accoppiato di calore e umidità nel tempo e coglie anche fenomeni non stazionari.

Oltre al calcolo, contano le regole costruttive. Nei sistemi a facciata ventilata la membrana esterna deve essere traspirante all'uscita del vapore ma resistente al vento e all'acqua (antivento) e la camera d'aria deve rimanere continua, non occlusa da staffaggi o isolante, così da drenare e ventilare eventuali infiltrazioni. Le caratteristiche prestazionali delle membrane da parete sono definite dalla UNI EN 13859-2:2014, che specifica requisiti e metodi di prova per i sotto strati posti dietro i rivestimenti esterni.

Per i sistemi a cappotto e più in generale per rivestimenti continui è determinante la "seconda linea di difesa": gocciolatoi e profili di partenza correttamente posati, raccordi finestra con piane e coprifili impermeabili, sigillature compatibili e dettagli di drenaggio che scarichino l'acqua verso l'esterno senza intrappolarla negli strati. Le esperienze raccolte in INSITER ricordano che non bisogna contare solo sui sigillanti in quanto dilatazioni e invecchiamento possono portare all'insorgere di fessure; serve quindi ridondanza (drenaggi, profili, nastri, ecc.) e un disegno dei giunti che mantenga continuità alla barriera all'aria e protezione all'acqua anche se un cordone di sigillante cede.

Nelle facciate leggere (*curtain wall*) la resistenza alla pioggia battente si verifica in laboratorio e sul campo: per i sistemi di parete continua si usa il test di tenuta all'acqua con pressione statica secondo la UNI EN 12155:2002; per finestre e porte si prova la tenuta all'acqua con la UNI EN 1027:2016 e si classifica secondo la UNI EN 12208:2000. Per i sistemi di parete opaca la resistenza alla pioggia spinta dal vento può essere valutata con la UNI EN 12865:2002, che introduce pressioni pulsanti per simulare il carico dinamico del vento. Queste prove non sostituiscono il buon dettaglio, ma aiutano a selezionare componenti e a validare il sistema prima che entri in cantiere.

In cantiere, la qualità dipende da continuità e sovrapposizioni corrette: le membrane vapore lato interno devono proseguire nei giunti e attorno ai passaggi impiantistici con nastri e manicotti idonei; le membrane traspiranti lato esterno vanno giuntate e risvoltate secondo le schede tecniche, verificando che i fori (fissaggi, staffe) abbiano guarnizioni e che resti lo spazio di ventilazione. A tale scopo si suggerisce al produttore, in accordo con i progettisti, di sviluppare checklist di controllo da completare “prima della chiusura”, come anche la creazione di istruzioni digitali (AR/QR) per la posa di isolanti e membrane e ispezioni mirate dei dettagli più sensibili (sottosoglia, attacchi dei rivestimenti, discontinuità strutturali), proprio per prevenire percorsi di acqua e sacche di umidità.

Il collaudo e il monitoraggio completano il quadro. La termografia a infrarossi, eseguita in condizioni idonee, è utile per mappare zone fredde e umidità latente; laddove serva vedere “dietro” a un rivestimento, endoscopia e ispezioni visive dei giunti aiutano a verificare nastri, risvolti e drenaggi.

Sui componenti trasparenti e sulle facciate leggere, le prove di tenuta all’acqua sopra richiamate danno un riscontro oggettivo; sulle partizioni opache, eventuali anomalie termografiche o igrometriche possono essere correlate ai calcoli igrotermici per decidere se intervenire. Inoltre, l’innovazione digitale consente di collegare immagini IR e controlli al modello BIM, così da georeferenziare i difetti e chiudere più rapidamente le non conformità.

Un’attenzione specifica va ai sistemi prefabbricati, dove membrane e guarnizioni possono essere pre-applicate in fabbrica: qui la costanza di qualità è un vantaggio, ma va verificata la compatibilità nel tempo di giunti e guarnizioni (ritiri, invecchiamento, raggi UV) e soprattutto la “via di fuga” dell’acqua all’interno del sistema. Anche in questo caso si raccomanda di avere una seconda linea di drenaggio e fissare piani di manutenzione ispettiva, perché la durata dei sigillanti non è infinita.

Infine, si ricorda che il controllo del vapore non riguarda solo gli strati: anche il comportamento in uso influisce. Laddove si installino sensori di temperatura e umidità è possibile tenere sotto osservazione nel tempo i livelli di umidità relativa interna e intervenire su ventilazione e ricambi d’aria se le condizioni reali si discostano da quelle ipotizzate nei calcoli. In questo modo la gestione dell’umidità diventa un KPI misurato e gestito, non solo progettato.

6.2.2.6. Isolamento acustico

L’isolamento acustico della parte esterna misura quanto efficacemente la chiusura verticale opaca – compresi i giunti con struttura e serramenti e le forometrie – attenua il rumore aereo tra ambiente esterno e ambiente interno.

È un KPI tecnico dell'edificio al pari della trasmittanza termica, tenuta all'aria e continuità igrotermica: la sua corretta gestione evita discomfort, contenziosi e retrofit costosi.

La prestazione di riferimento dei componenti può essere caratterizzata in laboratorio come perdita di trasmissione sonora e sintetizzata con indici normati (ad esempio R_w) secondo la famiglia UNI EN ISO 10140 o standard equivalenti (ASTM E90-09(2016) / E2249-02(2016); serie UNI EN ISO 15186).

In ottica di cantiere e accettazione, la verifica passa alle misure in opera della facciata, con metodi e indici normalizzati che confluiscono nella classificazione acustica dell'unità immobiliare (UNI 11367:2023) fissando classi e soglie a capitolato. INSITER recepisce tali riferimenti, estendendo le metodiche di misura (ad esempio intensimetria serie UNI EN ISO 9614 in modalità "scansione") per applicazioni *in situ*.

Il processo di controllo è progressivo e si ancora al principio "prima della chiusura". Nella fase di montaggio si verificano continuità dei pacchetti e compressione corretta di nastri e guarnizioni; si localizzano punti deboli con *imaging* acustico e con la sonda intensimetrica *SoundBrush*, che INSITER ha interfacciato al BIM per georeferenziare misure e termogrammi su modelli 3D. Ciò consente di individuare precocemente perdite localizzate su pannelli e nodi (spalle finestra, cassonetti, giunti pannello-struttura) e aprire azioni correttive prima di rivestimenti e finiture.

A guscio chiuso, le prove di accettazione comprendono l'isolamento di facciata in opera e, in parallelo, la tenuta all'aria (*blower door*/ultrasuoni) per distinguere contributi da *air-leakage* e *sound-leakage*. La letteratura INSITER sottolinea che un'apertura molto piccola rispetto alla lunghezza d'onda può non emergere come perdita acustica pur restando critica per l'*air-tightness*: per questo l'insieme *acoustic camera* con *SoundBrush* va usato in complemento ai test di tenuta.

In esercizio, sigillanti e connessioni sono soggetti a invecchiamento, ritiro e movimenti termo-igrometrici. Si suggeriscono pertanto ispezioni periodiche e aggiornamento dell'*as-built BIM* e del *building dossier*, così da chiudere il ciclo di feedback verso produzione e progetto.

6.2.2.7. KPI geometrici e di posa

I KPI geometrici e di posa delle pareti opache determinano quanto la geometria reale del cantiere resta fedele al progetto. Planarità, allineamenti, squadratura, verticalità e la corretta larghezza/continuità dei giunti non sono dettagli estetici: se escono dalle tolleranze, peggiorano la trasmittanza

“reale” della parete, aumentano i ponti termici lineari, abbassano la temperatura superficiale interna nei nodi sensibili e aprono varchi d’aria.

Per questo, la geometria deve essere trattata come un KPI richiedendo misure dedicate “prima della chiusura” con soglie di accettazione dichiarate e procedure di autocontrollo predeterminate da chi ha seguito la progettazione esecutiva dell’opera e prodotto i componenti di facciata. Tali controlli sono determinanti per i punti di giunzione più critici tra elementi prefabbricati e struttura.

Il riferimento metodologico per impostare le tolleranze e, soprattutto, il modo di verificarle è la DIN 18202:2019 (*Tolerances in Buildings*), adottata non come lista rigida di numeri ma come metodo per definire e controllare scostamenti ammissibili su punti, linee e piani in funzione del sistema costruttivo e della scala del cantiere. Tale approccio nasce dal presupposto che nella fase di elaborazione di modelli e disegni di progetto i valori dimensionali sono “nominali”, in cantiere qualche deviazione è inevitabile e tollerabile. Il compito del piano qualità è fissare quanto è accettabile, come misurarlo e con quali strumenti, per evitare rettifiche costose e, soprattutto, effetti prestazionali indesiderati sugli altri indicatori precedentemente descritti: U , Ψ , f_{Rsi} e tenuta all’aria.

Tradotto nel lavoro quotidiano, significa controllare la planarità dei piani di posa e dei pannelli, la verticalità e la squadratura dei fronti, la posizione e le quote di staffaggi e soglie, e verificare che le larghezze dei giunti consentano a nastri e guarnizioni di comprimersi correttamente.

Nei campi applicativi della ricerca è stato testato che è fondamentale che i componenti e la struttura di supporto deve arrivare, sempre, in cantiere “piana, a piombo e a squadra” entro tolleranze predeterminate garantite dal fornitore, con attenzione speciale alle aperture e ai passaggi impiantistici già integrati.

Le misurazioni di controllo possono essere effettuate su due livelli. Da un lato ci sono gli strumenti tradizionali (livelle digitali, regoli, misurazioni su base DIN per diverse lunghezze di controllo); dall’altro, quando serve rapidità e copertura, si usano stazioni totali e laser-scanner 3D per acquisire nuvole di punti, confrontarle con il modello BIM e ottenere automaticamente le “differenze dimensionali” in millimetri. Questa *pipeline* – rilievo 3D, allineamento al modello, mappa cromatica degli scostamenti e report allegato al BIM – consente di vedere dove la realtà si discosta dal progetto e di intervenire prima di chiudere i rivestimenti.

L’approccio “prima della chiusura” non riguarda solo le misure. Si raccomandano manuali di montaggio con compiti e responsabilità, tolleranze attese, dettagli di ancoraggio e liste di controllo, più un ciclo di feedback che riporti le non conformità alla produzione e al progetto per evitare che l’errore

si ripeta. In pratica, si passa da un controllo “a fine lavori” a una verifica progressiva, con registrazione di difetti (testo, foto, coordinate, *timestamp*) e tracciabilità tramite QR code del componente, così da trasformare la geometria in un dato gestionale e non in un problema scoperto tardi.

Infine, nelle situazioni in cui la produttività conta, strumenti come stazioni totali robotiche o sistemi *Global Navigation Satellite System/Real Time Kinematic* (GNSS/RTK) aiutano a battere rapidamente reti di punti di controllo da confrontare col progetto, integrandosi con il flusso BIM.

L’obiettivo resta lo stesso: mantenere le deviazioni geometriche entro soglia in modo sistematico, perché pochi millimetri fuori tolleranza in un giunto possono diventare una fessura che interrompe il nastro d’aria, un ponte termico non previsto o una soglia che non scarica correttamente l’acqua.

6.3. Chiusure verticali trasparenti

Le chiusure trasparenti (finestre, portefinestre, facciate continue) sono “regolatori” dei flussi di calore, luce e aria. Se progettate e posate correttamente riducono i fabbisogni invernali, limitano il surriscaldamento estivo, migliorano comfort visivo/acustico e facilitano il raggiungimento dei target energetici.

Nella pratica questo significa scegliere serramenti a elevate prestazioni (vetri basso emissivi, telai a taglio termico, distanziatori *warm-edge*, ecc.) e, quando le superfici vetrate sono estese, adottare facciate continue conformi alla UNI EN 13830:2015 – preferibilmente in versione *unitized* per sfruttare il controllo qualità *off-site* – con schermature integrate o vetri dinamici per governare gli apporti solari.

Oggi, nei retrofit è sempre più diffusa la sostituzione con moduli prefabbricati *plug-and-play* che incorporano finestre, oscuramenti e dettagli di giunto ripetibili facilitando la sua cantierizzazione.

6.3.1. Errori ricorrenti da evitare lungo il processo edilizio

Nella fase di progettazione sono due le sottovalutazioni ricorrenti all’origine di molti problemi in opera. La prima è calcolare la sola trasmittanza del serramento (U_w) senza quantificare il contributo lineare del perimetro finestra-parete e del bordo vetro-telaio (Ψ); la seconda è scegliere il pacchetto vetrato senza verificare il fattore solare del sistema integrato vetro e schermatura (g_{tot}) con l’orientamento reale. Tali potenziali errori causano dispersioni e surriscaldamento non previsti.

Altre criticità tipiche sono: l'assenza della "linea" continua della barriera all'aria e del drenaggio verso l'esterno; le classi di tenuta aria/acqua/vento mal dimensionate rispetto all'esposizione; i dettagli di isolamento discontinui nelle spallette e nei soprasoglia; le staffe/fissaggi senza taglio termico; la scarsa attenzione a tolleranze e movimenti differenziali (dilatazioni) che, su telai in alluminio, possono generare aperture nei giunti e rotture di sigillanti. A tale scopo si evidenzia la necessità di progettare giunti e secondi livelli di difesa, evitando di "affidarsi ai sigillanti" come unica protezione dall'acqua, e di prevedere *mock-up* e prove per validare la soluzione prima della messa in produzione.

Nella fase produzione/prefabbricazione, in officina, le potenziali criticità sono riscontabili nella presenza di vuoti d'isolante in corrispondenza di inserti e ancoraggi, giunzioni di membrane non saldate o guarnizioni non continue. Un errore sottile ma frequente è l'uso di guarnizioni tagliate/tese che col tempo si ritirano (invecchiamento, UV), aprendo micro-fessure agli angoli. È buona pratica usare angoli vulcanizzati e giunzioni a taglio diagonale, oltre a prevedere sempre vie di drenaggio per espellere l'acqua entrata nell'alloggiamento del vetro. Anche l'isolamento di montanti e traversi va ponderato isolando adeguatamente i profili in zone opache. Non garantire una corretta separazione dal vapore interno può, infatti, aumentare il rischio di condense nei climi freddi.

Nella fase di posa e montaggio si possono riscontrare scostamenti di planarità, piombo e squadratura fuori tolleranza che rendono i giunti troppo stretti o troppo larghi per nastri/guarnizioni. Soglie e bancali senza adeguata pendenza e gocciolatoi favoriscono ingressi d'acqua; controtelai non isolati interrompono la continuità dell'isolante; staffe e fissaggi metallici non a taglio termico introducono ponti termici. Nelle facciate continue, un ulteriore errore è non controllare deflessioni e tolleranze dei montanti in alluminio: deformazioni eccessive possono compromettere l'alloggiamento del vetro e il comportamento dei giunti. Qui è utile prevedere verifiche progressive (geometriche e funzionali) e un piano prove aria/acqua in cantiere, non solo in laboratorio.

Nella fase di collaudo ed esercizio si raccomandano: *blower door* secondo UNI EN ISO 9972:2015 con ricerca perdite (fumo, anemometri, IR), termografia IR in condizioni idonee (UNI EN 13187:1999) per intercettare "punti freddi" lungo spallette e sottosoglia, e – dove serve – misure in opera dei parametri energetici e controlli mirati su acqua/vento per facciate e serramenti. La manutenzione programmata di sigillanti e drenaggi è parte integrante del risultato: i sigillanti hanno vita utile limitata (10-15 anni); senza ispezioni periodiche si aprono percorsi d'acqua e aria difficili da correggere a posteriori.

6.3.2. KPI da monitorare

6.3.2.1. Trasmittanza termica del serramento

La trasmittanza termica delle chiusure verticali trasparenti è il parametro che indica quanta energia termica attraversa un serramento (o un modulo di facciata continua) quando tra interno ed esterno c'è una certa differenza di temperatura: più il valore è basso, più la finestra “isola”.

In progettazione non basta il solo vetro: il valore complessivo del sistema si chiama U_w e dipende dal vetro (U_g), dal telaio (U_f) e dal contributo lineare del bordo vetro-distanziale e dei giunti di installazione (Ψ ·lunghezza del perimetro). Le norme europee di calcolo per serramenti e vetrate isolanti (serie UNI EN ISO 10077 e UNI EN 673:2011) ricordano proprio questo approccio “di sistema”, dove al termine di superficie ($U \cdot A$) si sommano i contributi lineari ($\Psi \cdot l$), che diventano rilevanti soprattutto con telai sottili, ampie superfici vetrate e distanziali non isolati.

Nei moduli vetrati continui è frequente usare un'espressione analoga per il bilancio: il flusso attraverso il componente risulta dalla somma della parte “piana” e delle dispersioni perimetrali. In pratica, scelta del distanziale *warm-edge*, continuità dell'isolante alla spalla e un corretto nastro di installazione possono ridurre sensibilmente quel termine lineare e quindi il valore reale di U_w in opera.

Oltre al calcolo, è utile capire come si valida la prestazione. In laboratorio e *in situ* si ricorre a metodi normalizzati determinando la trasmittanza con prove in regime stazionario a *hot box* (norma UNI EN ISO 8990:2000 per elementi piani) e, in opera, con il metodo a piastre termoflussimetriche (UNI EN ISO 9869-1:2015) quando vi siano porzioni opache o telai sufficientemente estesi e rappresentativi. Per ottenere misure affidabili *in situ* servono però alcune condizioni: almeno 5 °C di salto termico tra interno ed esterno, assenza di irraggiamento diretto, buon contatto dei sensori e un periodo di monitoraggio tipicamente non inferiore a 72 ore; la termografia aiuta a scegliere punti omogenei, lontani dai bordi. Queste cautele evitano errori legati ai ponti termici del perimetro o all'irraggiamento sul vetro.

Il messaggio operativo è semplice: per stimare e poi ottenere davvero una bassa trasmittanza dei serramenti serve un pacchetto coerente di scelte – vetro, telaio, distanziale, giunto di posa – e un controllo della qualità *as-built*. I riferimenti insistono proprio su checklist e auto-ispezioni georeferenziate (foto, coordinate, *timestamp*) per documentare continuità dei nastri, corretta posa dei gocciolatoi e assenza di vuoti d'isolante ai raccordi, perché sono questi dettagli a trasformare un buon valore di progetto in una prestazione reale e misurata.

6.3.2.2. Fattore solare e luce diurna

Dagli elementi vetrati filtrano sia luce sia energia solare. Per questo, quando si parla di prestazioni “solari” delle chiusure trasparenti si guardano tre grandezze: il fattore solare della sola parte vetrata (g , secondo la norma UNI EN 410:2011), il fattore solare dell’intero sistema integrato vetro con la schermatura (g_{tot} , calcolato secondo la famiglia UNI EN ISO 52022), e la trasmissione luminosa nel visibile (τ_v), che indica quanta luce naturale entra negli ambienti. In pratica, g e g_{tot} servono a bilanciare due obiettivi: sfruttare gli apporti gratuiti invernali e, al tempo stesso, limitare il surriscaldamento estivo; τ_v sostiene l’illuminazione naturale e il comfort visivo. Tali parametri sono determinanti per la qualità energetica e visiva, ricordando che schermature e vetri selettivi sono strumenti di controllo da progettare insieme al serramento e al nodo di posa.

In fase di progetto si dimensionano vetrature e schermature in base a orientamento, ombreggiamenti esterni, uso degli ambienti e clima. È utile simulare fin dai primi studi la combinazione vetro-schermo: in inverno conviene un valore g non troppo basso per favorire gli apporti solari, mentre d’estate è preferibile ridurre il g_{tot} con schermature esterne efficaci (tipicamente più performanti di quelle interne perché intercettano il sole prima che l’energia raggiunga il vetro).

Gli strumenti di simulazione dell’illuminazione e dell’energia (ad esempio *Radiance*, *EnergyPlus*, plugin come *Ladybug/Honeybee* o *ClimateStudio*) permettono di valutare rapidamente scenari alternativi: quantità di luce disponibile, rischio di abbagliamento, benefici delle schermature mobili e delle vetrate selettive.

Per il comfort visivo non conta solo “quanta” luce entra, ma anche “come” arriva. La norma UNI EN 17037:2019 propone criteri e metodi per verificare l’apporto di luce diurna, la qualità della vista verso l’esterno, il controllo del soleggiamento diretto e il rischio di abbagliamento. Metriche dinamiche come la *Spatial Daylight Autonomy* (sDA), l’*Annual Sun Exposure* (ASE) e la *Daylight Glare Probability* (DGP) aiutano a trovare l’equilibrio tra luce utile durante l’anno, limitazione dell’eccesso di sole diretto e comfort visivo. Sono queste grandezze ormai diffuse nei programmi di simulazione e nelle certificazioni. In pratica, se ASE risulta troppo alta si può intervenire riducendo il rapporto finestra/parete, scegliendo vetri con minore trasmissione o introducendo schermature più efficaci; se sDA è bassa si lavora sull’area vetrata, sull’orientamento o su vetri con τ_v più elevata.

Durante la produzione e l’assemblaggio, soprattutto con facciate modulari o serramenti prefabbricati, è importante assicurare la continuità delle

guarnizioni, la corretta installazione delle schermature integrate (guide, cassonetti, drenaggi) e l'assenza di disallineamenti che creino fessure o ostacolino il deflusso dell'acqua.

In collaudo, oltre a verificare l'ermeticità dell'involucro, conviene controllare che la qualità della luce rispetti le attese di progetto: misurare gli illuminamenti sui piani di lavoro e verificare l'abbagliamento (ad esempio UGR (*Unified Glare Rating*) per l'illuminazione artificiale e verifiche qualitative/quantitative per la luce naturale), sempre scegliendo condizioni rappresentative e locali finiti, perché colori e riflessioni delle superfici influenzano molto i risultati. Queste misure, insieme alla verifica funzionale delle schermature (manuali o motorizzate, con eventuale controllo automatico) riducono il rischio di surriscaldamento estivo o di ambienti poco illuminati validando il rapporto tra il calcolo di progetto e *as-built*.

In sintesi, progettare bene fattore solare e luce diurna significa combinare scelte di vetro e schermatura con una verifica anticipata tramite simulazioni e con misure mirate in cantiere: così le chiusure trasparenti aiutano davvero a ridurre i consumi, migliorare il comfort e rispettare gli obiettivi energetici dell'edificio.

6.3.2.3. Ponti termici al perimetro del serramento

Il bordo vetro-telaio e il giunto finestra-parete sono spesso il punto più delicato delle chiusure trasparenti: qui il calore trova "scorciatoie" e la temperatura superficiale interna tende ad abbassarsi, con effetti sia sui consumi sia sul rischio di condensa. Per descrivere e quantificare questo fenomeno si usa la trasmittanza termica lineare del giunto, indicata con Ψ [W/m·K]: è la potenza termica che si disperde per ogni metro di perimetro e per ogni grado di differenza tra interno ed esterno.

Nella fase di progetto Ψ si ottiene con modelli numerici 2D/3D conformi alla UNI EN ISO 10211:2018; quando il dettaglio è semplice si possono adottare i metodi semplificati della ISO 14683. Nei bilanci energetici l'apporto di tutti i giunti rientra nel cosiddetto "valore Y", che si somma ai contributi areali (U·A).

Per collegare correttamente i calcoli al comportamento dell'edificio, la ricerca INSITER ha proposto un'impostazione coerente: uso delle norme per il calcolo dei ponti termici (UNI EN ISO 10211:2018 per i modelli 2D/3D e UNI EN ISO 14683:2018 per i metodi semplificati), rilevanza del termine lineare nel bilancio e attenzione ai dettagli che accoppiano il serramento alla parete. Il progetto indica anche gli strumenti "rapidi" da impiegare in can-

tiere e in collaudo per intercettare anomalie al perimetro del serramento: termografia a infrarossi per localizzare discontinuità (UNI EN 13187:1999), eventuale mappatura dei contributi lineari con procedure IR-assistite e, quando serve, integrazione con misure in opera delle prestazioni areali.

Le misure di qualità non sono solo termiche: nella pratica di facciata continua e di serramenti modulari, la continuità delle guarnizioni e dei nastri agli angoli, la gestione dei rientri e dei tagli, e la presenza di seconde linee di drenaggio contano quanto l'isolamento. Particolare attenzione deve essere posta al rischio di ritiro delle guarnizioni nel tempo: se il sistema non prevede angoli vulcanizzati o giunzioni ben eseguite, si creano fessure che favoriscono infiltrazioni d'aria e acqua, con effetti indiretti anche sui ponti termici (raffreddamento locale del bordo e calo della temperatura superficiale). Una progettazione che assicuri la continuità della barriera all'aria al perimetro del serramento e un sistema di drenaggio interno-verso-esterno (*weep holes*, profili e nastri correttamente raccordati) riducono questi rischi.

Quando si passa dal disegno al cantiere, geometria e tolleranze diventano decisive: planarità delle spallette, squadratura delle aperture, larghezza dei giunti e posizionamento del telaio determinano la corretta compressione di nastri e guarnizioni e quindi anche il valore effettivo di Ψ . Adottare protocolli di rilievo con stazione totale o laser-scanner e procedure di verifica “prima della chiusura” consente di documentare in modo sistematico gli scostamenti rispetto al modello BIM e di intervenire per correggerli tempestivamente.

Infine, per validare che i ponti termici al perimetro siano stati davvero contenuti, si consiglia di combinare IR e calcolo: a partire dalle mappe termiche è possibile stimare l'incidenza delle discontinuità sul coefficiente di trasmissione e ricostruire H_i includendo i termini lineari $\Sigma(\Psi \cdot l)$, secondo un tracciato coerente con UNI EN ISO 14683:2018 e con i modelli 2D/3D di cui sopra. Questo consente di passare da un valore “presunto” a una prestazione misurata e tracciabile del nodo finestra-parete.

6.3.2.4. Fattore di temperatura superficiale contro muffa/condensa

Il fattore di temperatura superficiale f_{Rsi} serve a verificare che le superfici interne attorno al serramento (spallette, sottosoglia, bordo vetro-telaio) rimangano abbastanza “calde” da non creare condensa né favorire muffe. Più il valore è alto, più la superficie resta sopra il punto critico. Come già descritto nelle sezioni precedenti esso è definito come:

$$f_{Rsi} = (\theta_{si} - \theta_e) / (\theta_i - \theta_e)$$

Molte linee guida europee usano come riferimento $f_{Rsi} \geq 0,75$ per locali residenziali a circa 20 °C e umidità moderata; con 20 °C dentro e 0 °C fuori, questo corrisponde a una temperatura minima di superficie di circa 15 °C. Il calcolo di progetto si fa con la UNI EN ISO 13788:2013 nei casi semplici, oppure con modelli 2D/3D secondo la UNI EN ISO 10211:2018 quando il nodo è complesso (per esempio controtelai isolati, tagli termici in soglia, schermature integrate), così da stimare sia le temperature minime sia l'eventuale ponte termico lineare Ψ del perimetro.

Sulle chiusure trasparenti, il rischio di condensa è particolarmente legato al bordo vetro-telaio e ai profili metallici: progettare telai con taglio termico e inserire distanziatori *warm-edge* innalza la temperatura superficiale interna riducendo il pericolo di gocciolamento e degrado delle finiture.

Anche la continuità dell'isolante nella spalletta e un giusto arretramento del serramento nello strato isolante aiutano a mantenere il valore f_{Rsi} elevato; nei sistemi a facciata continua, la continuità della barriera all'aria e un drenaggio efficace sono fondamentali per evitare che l'umidità residua o l'aria interna umida vadano a raffreddare localmente i profili.

In collaudo e in esercizio, la termografia a infrarossi è un'ottima "pre-diagnosi" per individuare zone fredde attorno ai serramenti; per essere affidabile richiede un adeguato salto termico e il controllo di sole, vento e pioggia durante l'ispezione. Le anomalie termografiche possono poi essere verificate con misure puntuali di temperatura nelle stesse condizioni, così da confrontare i risultati con i valori di progetto.

6.3.2.5. Tenuta all'aria, all'acqua e resistenza al vento del componente

Per finestre e porte la tenuta all'aria si misura in laboratorio con la prova UNI EN 1026:2016 e si classifica secondo la UNI EN 12207:2017: più alta è la classe, minori sono le infiltrazioni d'aria. Queste norme richiedono di testare l'elemento completo, così com'è installato, sottoponendolo a differenze di pressione positive e negative per simulare il vento reale.

La tenuta all'acqua si verifica con la UNI EN 1027:2016 e la relativa classificazione UNI EN 12208:2000: il provino viene bagnato con un velo d'acqua mentre si applica una pressione d'aria crescente, a imitazione della pioggia battente spinta dal vento. Anche qui la classe più elevata corrisponde a una migliore prestazione. Queste prove non riguardano il giunto finestra-parete (che va curato a parte), ma il serramento come prodotto.

La resistenza al vento, infine, si determina con la prova UNI EN 12211:2016 e si classifica secondo la UNI EN 12210:2016: la finestra o la

porta viene sollecitata con pressioni di prova crescenti per valutare deformazioni e sicurezza; la classe assegnata dipende dal livello di pressione sopportato e dai limiti di freccia.

Per le facciate continue (*curtain wall*) il quadro di riferimento è la norma di prodotto UNI EN 13830:2015, affiancata dai metodi specifici per aria e acqua: UNI EN 12152:2002 per la permeabilità all'aria e UNI EN 12155:2002 per la tenuta all'acqua sotto pressione statica. In pratica si testano moduli o porzioni rappresentative della facciata, verificando che i percorsi di drenaggio e le guarnizioni lavorino in modo corretto.

Nella pratica di cantiere e collaudo, si raccomanda di affiancare prove di laboratorio dei *mock-up* e test in opera: campioni di facciata o di serramento montati e provati prima della produzione di serie; controlli in fase intermedia e finale per aria e acqua, ripetuti a progressione dell'avanzamento lavori; ispezioni standardizzate con checklist, documentazione fotografica e strumenti diagnostici (termografia, ultrasuoni) per localizzare perdite e difetti. Questa impostazione “dal progetto al campo” serve a ridurre il rischio che la prestazione misurata in laboratorio si degradi in installazione.

La scelta delle classi è basata sul clima, sull'esposizione al vento e alla pioggia, sull'altezza dell'edificio e sulla destinazione d'uso: siti molto esposti o piani elevati richiedono classi più alte sia per l'aria (UNI EN 12207:2017) sia per l'acqua (UNI EN 12208:2000), oltre a livelli adeguati di resistenza al vento (UNI EN 12210/12211:2016). Per le facciate continue si adottano le classi indicate dalla UNI EN 12152/12155:2002 in coerenza con il progetto strutturale e con la norma di prodotto UNI EN 13830:2015. In aggiunta ai test di laboratorio, possono essere utili prove in sito su serramenti installati per verificare la corretta posa (ad esempio, prove di tenuta all'acqua su infissi montati secondo norme nazionali di cantiere).

6.3.2.6. Tenuta all'aria dell'edificio e ricerca perdite

La verifica della tenuta all'aria a scala edificio si esegue con la prova di pressurizzazione (*blower door*) secondo UNI EN ISO 9972:2015. Un ventilatore crea una differenza di pressione (di solito ± 50 Pa) tra interno ed esterno e si misura la portata d'aria che attraversa l'involucro: l'indicatore più usato è n_{50} [h^{-1}], cioè i ricambi/ora a 50 Pa (in alternativa alcuni schemi usano la permeabilità q_{50} riferita all'area). La UNI EN ISO 9972:2015 descrive preparazione, procedura e valutazione della prova in campo per edifici o porzioni di edificio; è il riferimento internazionale che ha sostituito la precedente EN 13829.

I valori guida consolidati per edifici ad alta efficienza sono quelli promossi dal *Passive House Institute*: per il nuovo, $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$; per retrofit certificati *EnerPHit*, limite $n_{50} \leq 1,0 \text{ h}^{-1}$ (con l'indicazione di svolgere una ricerca approfondita delle perdite se il risultato è compreso fra 0,6 e 1,0). Questi limiti sono pensati per contenere i consumi legati alle infiltrazioni e garantire comfort e durabilità.

Nel percorso operativo conviene prevedere due momenti: una prova intermedia, appena l'involucro è chiuso, per trovare e correggere facilmente le discontinuità; e una prova finale a lavori conclusi per certificare la prestazione dell'edificio. Le linee guida INSITER inseriscono la *blower door* tra le verifiche "di sistema" dopo la chiusura dell'involucro e la collegano a un set di controlli complementari (termografia IR, ultrasuoni) e a checklist digitali con tracciamento delle non conformità. La ricerca perdite contestuale è essenziale: durante la pressurizzazione si localizzano i punti critici con fumogeni, termografia in condizioni idonee e anemometri; in INSITER sono stati testati anche sistemi a ultrasuoni con puntatore tracciato nello spazio (utile per fessure dell'ordine di millimetri) come diagnostica rapida integrata alla prova. Queste procedure riducono tempi e costi di correzione e trasformano l'indicatore da "presunto" a misurato.

Per ottenere misure robuste e comparabili è importante preparare la prova: definire con il BIM i volumi riscaldati e le superfici disperdenti di riferimento, pianificare la sequenza di test in base allo stato di avanzamento, documentare risultati e azioni correttive direttamente nel sistema di autocontrollo (foto, coordinate, *timestamp*) così da alimentare il ciclo di miglioramento tra cantiere e progettazione.

6.3.2.7. Isolamento acustico

L'isolamento acustico della chiusura trasparente valuta quanto efficacemente finestre, portefinestre e facciate continue attenuano il rumore esterno verso l'interno, considerando non solo il vetro ma l'intero insieme vetro-telaio-giunti-accessori.

È un KPI paritetico alla trasmittanza termica e tenuta all'aria, perché la perdita acustica nasce spesso da vie di fuga nei giunti e nelle forometrie più che dal pacchetto vetrocamera in sé. Nelle facciate continue, infatti, la prestazione dipende soprattutto dalla vetratura e dalla tenuta interna delle sigillature: migliora con pannelli di tamponamento fonoisolanti, una costruzione il più possibile ermetica e, nelle vetrate isolanti, con spessori differenziati delle lastre.

Per la caratterizzazione di prodotto si fa riferimento alla misura della *Transmission Loss* (R in bande, R_w come indice sintetico) secondo la UNI

EN ISO 10140 (serie); questi valori fungono da “targa” dei moduli serramento o dei pannelli vetrati prefabbricati. In opera, la prestazione si verifica sul fronte di facciata con misure dedicate di isolamento aereo (ad esempio indicatori di facciata e indici normalizzati nazionali), integrate nel piano prove del guscio.

Nelle fasi di montaggio si controllano tolleranze e continuità dei nastri/guarnizioni, si localizzano punti deboli con *imaging* acustico e con sonda intensimetrica (*SoundBrush*), entrambi interfacciati al BIM per georeferenziare mappe e curve; questa diagnostica anticipata consente di sanare giunti pannello-struttura, soglie e contorni delle bucatore prima delle finiture.

A guscio chiuso si eseguono le prove in opera di facciata e, in parallelo, la *blower door*: è cruciale distinguere *air-leakage* e *sound-leakage*, perché aperture più piccole della lunghezza d’onda possono non emergere come perdita acustica pur compromettendo la tenuta all’aria; per questo INSITER raccomanda l’uso complementare di ultrasuoni per la ricerca delle infiltrazioni d’aria. In esercizio, un *re-commissioning* leggero sui giunti (sigillanti, rotture, nuovi passaggi) e l’aggiornamento del BIM dossier mantengono il KPI nel tempo.

Gli effetti di forma della facciata e degli aggetti (balconi, logge) influenzano il campo sonoro esterno e quindi l’isolamento percepito: elementi schermanti possono migliorare la prestazione, ma configurazioni che generano riflessioni multiple degradano l’effetto; la UNI EN 12354 (serie) prevede correttivi geometrici nel calcolo della facciata. Queste scelte architettoniche vanno quindi valutate insieme a posizionamento e dimensionamento delle aperture nelle strategie di progetto.

In sintesi, per le chiusure trasparenti il KPI si governa allo stesso modo degli altri indicatori dell’involucro: specifiche e soglie esplicite al capitolato, diagnostica precoce su giunti e moduli, prove in opera della facciata accoppiate a test di ermeticità, e tracciabilità delle non conformità nel *building dossier*. Così si garantisce una certificazione del valore globale (facciata) e la correzione mirata dei punti deboli (giunti, accessori), riducendo retrofit e contenziosi.

6.3.2.8. KPI geometrici e di posa

I KPI geometrici e di posa dei serramenti e delle facciate trasparenti riguardano quanto la geometria reale del foro, del controtelaio e del telaio/modulo di facciata rispetta il progetto. Planarità dei piani di posa, allineamento, squadratura, piombo, larghezza e continuità dei giunti, quota e pendenza delle soglie sono aspetti tecnici e geometrici da monitorare. Anche pochi millimetri

fuori tolleranza possono infatti deformare i telai, stressare guarnizioni e nastri, aprire passaggi d'aria e acqua e peggiorare indicatori come U , Ψ e f_{Rsi} .

Nel progetto INSITER la geometria è stata trattata prevedendo misure “prima della chiusura”, confronto con il modello BIM e tracciamento digitale delle non conformità; l'uso di stazioni totali e laser-scanner 3D consente di calcolare automaticamente le differenze dimensionali rispetto al modello e di allegare foto, coordinate e *timestamp* ai report di cantiere. Questa impostazione è accompagnata da checklist e istruzioni AR/QR per l'auto-ispezione e da un flusso di feedback verso progettazione e produzione, così da evitare l'accumulo degli errori ai giunti tra moduli e ai raccordi con i serramenti.

Per definire e verificare le tolleranze si può prendere come riferimento metodologico la norma tedesca DIN 18202:2019 (*Tolerances in Building*), utile per impostare controlli su punti, linee e piani senza limitarsi ai soli valori tabellari. In pratica, si controllano planarità e livello dei piani di posa, verticalità e squadratura dei fronti e la posizione delle staffe/ancoraggi; le larghezze dei giunti vanno coerenti con i range di compressione di nastri e guarnizioni specificati dai produttori.

Per la posa dei serramenti in Italia il riferimento è la serie UNI 11673: la Parte 1 guida la progettazione della posa (materiali, continuità delle barriere, dettagli del giunto), mentre la Parte 4 definisce le metodologie di verifica in opera e di collaudo delle prestazioni installate; le Parti 2 e 3 riguardano requisiti di conoscenza e qualifiche del posatore. Queste norme integrano, non sostituiscono, le prove di prodotto: aiutano a garantire che il serramento certificato mantenga le prestazioni una volta montato nel foro.

Nel caso di facciate continue prefabbricate, si raccomanda di procedere con *mock-up* e prove di modulo/fascia prima della produzione di serie, seguiti da verifiche in sito a campione durante il montaggio (aria, acqua, deformazioni) per intercettare tempestivamente scostamenti geometrici o dettagli non conformi che comprometterebbero tenuta e durabilità del sistema.

6.3.2.9. Gestione dell'acqua meteorica e del drenaggio

La gestione dell'acqua meteorica attorno ai serramenti e nelle facciate leggere parte da un principio semplice: l'acqua può entrare, quindi occorre guidarla e scaricarla in modo controllato. Per questo i sistemi ben progettati prevedono una “seconda linea di difesa” dietro il piano esterno, composta da piane con pendenza e gocciolatoio, profili e nastri di raccordo, camere e canalini di raccolta con fori di scarico.

In questo modo eventuali infiltrazioni superano la prima barriera ma vengono intercettate e convogliate fuori, senza affidarsi ai soli sigillanti. I

sigillanti, da soli, non garantiscono tenuta nel tempo in quanto, nel tempo, subiscono ritiro, invecchiamento e movimenti differenziali; occorre quindi prevedere ridondanza (drenaggio e labirinti), angoli vulcanizzati e giunzioni ben eseguite, oltre a verifiche in cantiere della continuità delle guarnizioni e dell'efficienza dei fori di scarico.

Nelle facciate continue questo approccio è ancora più importante perché mancano soglie “pezzo per pezzo” come avviene per le finestre isolate: l'acqua che raggiunge gli angoli del telaio o la tasca di vetri deve poter defluire verso l'esterno, altrimenti finisce negli ambienti o sui vetri sottostanti.

Onde evitare criticità si consiglia di non contare mai solo sul cordone di sigillante, ma associare sempre un sistema di drenaggio interno-verso-esterno e una corretta progettazione dei labirinti di tenuta. La manutenzione è parte della prestazione: i sigillanti delle facciate continue hanno una vita utile limitata (10-15 anni), quindi servono ispezioni periodiche e ripristini programmati per evitare degradi nascosti che, altrimenti, diventano costosi da sanare.

Il controllo della tenuta alla pioggia non si esaurisce a tavolino. Prima della produzione in serie, è buona pratica realizzare un *mock-up* e provarlo con pioggia battente simulata e differenze di pressione (prove aria/acqua/vento in laboratorio o in campo su moduli rappresentativi). Si raccomanda poi di ripetere test in sito a campione man mano che il cantiere avanza – ad esempio all'inizio, attorno al 35% e al 70% delle installazioni, e a fine lavori – per intercettare subito errori di posa, ostruzioni dei drenaggi, guarnizioni non continue e difetti di pendenza di soglie e bancali. Questo schema progressivo riduce la probabilità che una prestazione certificata in laboratorio si perda in opera.

La fase di esercizio richiede una “riconvalida” leggera nel tempo: ispezioni visive dei percorsi d'acqua e dei fori di scarico, controllo delle pendenze e dell'integrità dei profili gocciolatoi, verifica della continuità delle guarnizioni agli angoli (dove il ritiro è più frequente) e ripristino dei sigillanti degradati. In caso di sospetta umidità latente dietro i rivestimenti o nelle spallette, le procedure INSITER suggeriscono di integrare la diagnostica con termografia infrarossa eseguita in condizioni idonee, utile a mappare zone più fredde legate a bagnature o a percorsi d'aria non voluti.

Per rendere tracciabile questa qualità “di dettaglio”, è importante integrare checklist digitali e auto-ispezioni: gli operatori registrano difetti e correzioni con foto, coordinate e *timestamp*; i controlli vengono collegati al modello BIM e ai QR code dei componenti, così da chiudere rapidamente le non conformità su drenaggi, pendenze, nastri e guarnizioni prima della chiusura dei rivestimenti. Questo flusso digitale, con report e dashboard di cantiere, aiuta a mantenere nel tempo l'efficienza della linea di drenaggio e a prevenire danni da infiltrazione.

6.3.2.10. Luce naturale e il controllo dell'abbagliamento

La luce naturale è un “servizio” prezioso: migliora comfort e benessere e riduce i consumi per illuminazione artificiale. Per trattarla come un vero KPI si usano regole e metriche chiare.

La norma europea UNI EN 17037:2019 stabilisce obiettivi e metodi per verificare: quanta luce utile entra in un ambiente attraverso un determinato infisso (*daylight provision*), la qualità della vista verso l'esterno, l'esposizione al sole diretto e la protezione dall'abbagliamento.

In fase di progettazione ci si avvale di simulazioni per prevedere la penetrazione della luce e ottimizzare schermature e vetrazioni già nelle fasi iniziali. Accanto agli obiettivi della UNI EN 17037:2019, la pratica usa metriche come *Spatial Daylight Autonomy* (sDA), ovvero la percentuale di area che raggiunge almeno 300 lux per $\geq 50\%$ delle ore occupate, *Annual Sun Exposure* (ASE), area con eccesso di sole diretto, da contenere, e *Useful Daylight Illuminance* (UDI), fra 100 e 2000 lux per almeno il 50% del tempo, per bilanciare luce utile e rischio di eccessi; la probabilità di abbagliamento dovuto alla luce naturale si esprime con la *Daylight Glare Probability* (DGP). Queste grandezze aiutano a tarare dimensione delle vetrate, orientamento, trasmissione luminosa del vetro e strategie di schermatura in modo coerente con clima e uso degli ambienti.

Il disegno del sistema finestra va coordinato con i parametri solari: al fattore solare del vetro (g) si affianca quello dell'insieme integrato vetro con schermatura (g_{tot}), così da avere apporti gratuiti invernali senza surriscaldamento estivo. Nella pratica, schermature esterne e vetri “selettivi” (alta trasmissione della luce, bassa trasmissione dell'energia solare) sono gli strumenti più efficaci per governare g_{tot} ; nelle facciate evolute possono entrare in gioco vetrazioni dinamiche, sistemi di ridirezione della luce o schermature integrate, fino a soluzioni multifunzione come BIPV traslucidi che ombreggiano producendo energia. Il quadro tecnologico attuale include vetri a controllo dinamico, sistemi di ridirezione e moduli fotovoltaici trasparenti/semi-trasparenti, che consentono di modulare luce e guadagni solari con continuità e integrazione impiantistica.

Perché quanto progettato si traduca in prestazione reale, occorre curare produzione, posa e verifiche. Nelle soluzioni prefabbricate e modulari, è importanti avvalersi di checklist sviluppate in accordo tra produttori e progettisti – anche con flussi digitali (BIM + QR/AR) –, supportate da procedure di auto-ispezioni per la corretta installazione, avendo cura di controllare schermature, guide, continuità delle guarnizioni, presenza e funzionalità dei drenaggi dei cassonetti e qualità dei giunti. Tali aspetti, se difettosi, inducono infiltrazioni, condense o ostruzioni che impattano sia sul comfort visivo

(schermature che non scorrono o si bloccano) sia sull'energia (g_{tot} diverso da quello previsto). L'intero set di KPI di qualità ambientale considera anche il *visual comfort* come grandezza da misurare in campo (illuminamenti, uniformità).

Nella fase di collaudo, oltre alla verifica dell'ermeticità e del corretto funzionamento delle schermature, è utile misurare gli illuminamenti nei punti significativi (piani di lavoro, percorsi), confrontandoli con i livelli raccomandati per gli ambienti interni (tipicamente 300-500 lux negli uffici) e controllare l'uniformità. Le stesse metriche dinamiche usate in progetto (sDA; ASE; DGP) orientano la messa a punto finale: se l'esposizione solare annuale è eccessiva, si aumenta l'efficacia delle schermature o si riduce la trasmissione; se la luce utile è scarsa, si interviene su rapporti finestra/parete o su vetri con maggiore trasmissione luminosa. In tal modo, la luce naturale e il controllo dell'abbagliamento diventano KPI misurati e gestiti lungo tutto il processo, non solo stimati a progetto.

6.4. Chiusure superiori

Le coperture (piane o inclinate) governano una quota importante dei flussi di calore e sono il primo "schermo" contro pioggia, vento e irraggiamento solare.

Una copertura ben progettata e messa in opera riduce le dispersioni invernali, limita i picchi estivi, previene condense e infiltrazioni e facilita la manutenzione.

Nelle soluzioni *off-site* e modulari il controllo di qualità può essere molto alto, ma resta decisivo presidiare giunti, pendenze, risvolti delle membrane, passaggi impiantistici e l'integrazione con parapetti e lucernari. *Mock-up* e prove su porzioni rappresentative aiutano a validare drenaggi, tenute e dettagli prima della produzione in serie.

6.4.1. Errori ricorrenti da evitare lungo il processo edilizio

Nella fase di progettazione gli errori più comuni sono considerare solo la trasmittanza "di strato" della copertura senza valutare i ponti termici in corrispondenza di gronda e colmo, dell'attacco parete-tetto, dei lucernari e degli staffaggi; trascurare la continuità della barriera all'aria tra pareti e copertura; sottovalutare sia il controllo igrometrico (scelta e posizione di barriere o freni al vapore e ventilazione degli strati) sia la corretta gestione dell'acqua piovana (pendenze, bocchettoni, troppopieni, scossaline, ecc.).

Il rischio di condense va verificato con le procedure igrotermiche della UNI EN ISO 13788:2013 – o con modelli in regime variabile quando necessario –, mentre ponti termici e temperature superficiali si analizzano con UNI EN ISO 10211:2018 e UNI EN ISO 14683:2018.

Quando la copertura è prefabbricata (ad esempio in X-Lam/CLT, solai nervati o pannelli metallici coibentati) possono presentarsi vuoti d'isolante in corrispondenza di inserti e ancoraggi, giunzioni di membrane non saldate e discontinuità della barriera antivento. Per ridurre questi rischi è utile standardizzare “kit di giunto”, prevedere controlli dimensionali e sui materiali e fornire istruzioni digitali per l'assemblaggio (BIM con QR/AR).

Nella fase di montaggio le criticità più frequenti riguardano pendenze insufficienti o irregolari nelle coperture piane, risvolti e lattonerie incompleti, attraversamenti impiantistici privi di manicotti, fissaggi metallici passanti senza taglio termico, bocchettoni ostruiti e lucernari o shed privi di una seconda linea di drenaggio. Nel caso di facciate e attici è fondamentale verificare in opera il raccordo con il parapetto e la continuità dei profili gocciolatoi. Controlli geometrici con stazione totale o laser-scanner consentono di intercettare gli scostamenti e correggerli prima di chiudere gli strati.

Nella fase di collaudo e durante l'esercizio si raccomanda la prova di tenuta all'aria dell'edificio con *blower door* secondo UNI EN ISO 9972:2015, con contestuale ricerca delle perdite, la termografia all'infrarosso per evidenziare discontinuità (UNI EN 13187:1999 / UNI EN ISO 6781-3:2021) e, quando opportuno, la misura in opera della trasmittanza con termoflussimetro (UNI EN ISO 9869-1:2015).

La manutenzione programmata di sigillanti, risvolti e drenaggi completa il quadro e va considerata parte integrante della prestazione nel tempo.

6.4.2. KPI da monitorare

6.4.2.1. Trasmittanza termica della copertura

La trasmittanza termica della copertura, indicata con U e misurata in W/m^2K , descrive quanta energia termica attraversa 1 m^2 di tetto quando tra interno ed esterno c'è un grado di differenza: più il valore è basso, più la copertura isola.

In fase di progetto si determina con la UNI EN ISO 6946:2018, che somma le resistenze termiche degli strati e include le regole per trattare situazioni non omogenee come orditure, correnti metalliche, fissaggi meccanici e strati d'aria. La norma prevede sia il calcolo “a percorsi paralleli” per elementi con ponti termici ripetitivi (ad esempio travetti o correntini che attraversano l'isolante), sia un incremento di U per gli ancoraggi metallici passanti; per gli strati d'aria

fornisce resistenze termiche tabellate e distingue fra strati non ventilati e strati ventilati, così da non sovrastimare il contributo isolante di camere d'aria o sottotetti ventilati. Nei casi più complessi è ammesso un calcolo numerico di dettaglio coerente con le regole della UNI EN ISO 10211:2018.

Tradurre correttamente il tetto reale in un “modello” di calcolo richiede alcune attenzioni. Se l'isolante è interrotto in modo regolare da elementi portanti (legno, acciaio), la UNI EN ISO 6946:2018 impone di rappresentare le due vie di flusso in parallelo, pesando ciascuna per la propria percentuale di area; se invece sono presenti fissaggi puntuali o lineari che collegano strati molto conduttivi, si aggiunge un incremento ΔU specifico. Negli strati d'aria non ventilati si usano le resistenze tabellate della norma, mentre gli strati fortemente ventilati devono essere trattati come esterni al sistema isolante, perché la ventilazione smaltisce il calore e non contribuisce in modo stabile alla resistenza complessiva. Questa impostazione evita errori comuni, come considerare “isolante” una camera d'aria fortemente ventilata o dimenticare l'effetto dei fissaggi che bucano lo strato termico.

Il valore obiettivo dipende dal clima, dalla strategia energetica dell'edificio e dal quadro normativo locale. Come riferimento di buona pratica per involucri ad alta efficienza, gli standard *Passivhaus* ed *EnerPHit* adottano valori di trasmittanza per l'opaco dell'ordine di $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ quando l'isolamento è posto all'esterno; si tratta di un “ordine di grandezza” utile anche per le coperture in climi temperati quando si punta a prestazioni nZEB, mentre soluzioni di eccellenza scendono verso $0,10\text{-}0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ se lo spessore e la continuità dell'isolante lo consentono. In ogni caso, i requisiti cogenti sono fissati dalle normative nazionali e comunali e vanno rispettati.

Per evitare che i numeri restino solo “di progetto”, la U può essere verificata in opera con il metodo delle piastre termoflussimetriche (*Heat Flow Meter*) descritto dalla UNI EN ISO 9869-1:2015. Il principio è semplice: si applicano sensori di flusso e di temperatura sul lato interno (o, con cautele, su quello esterno), si registra il flusso termico e il salto di temperatura per più giorni e si ricava la resistenza/trasmittanza effettiva. La norma specifica le condizioni per una misura affidabile: stabilità del regime, salto termico adeguato, durate tipicamente pari o superiori a 72 ore e posizionamento dei sensori lontano da ponti termici e da zone irradiate dal sole. Queste cautele sono particolarmente importanti sulle coperture, dove l'irraggiamento e le oscillazioni termiche possono falsare la misura; spesso conviene scegliere periodi notturni o giornate senza sole, oppure schermare localmente il provino.

Nel passaggio dal progetto alla realtà, le cause tipiche di scostamento tra U calcolata e U misurata sono l'isolante discontinuo o con vuoti in corrispondenza di giunti e ancoraggi, gli strati d'aria non trattati correttamente, i

fissaggi metallici non contabilizzati, le membrane non continue e gli errori geometrici (pendenze, planarità) che costringono a rilavorazioni e creano disomogeneità. La combinazione fra misure *in situ* e diagnostica per immagini – in particolare termografia IR qualitativa secondo UNI EN 13187:1999/UNI EN ISO 6781-3:2021 per evidenziare discontinuità prima di strumentare – aiuta a scegliere i punti più rappresentativi per l'HFM e a collegare l'eventuale incremento di U a difetti specifici da correggere.

Nelle coperture prefabbricate o in elementi *off-site* è utile impostare già a capitolato un confronto sistematico tra U di progetto e U misurata su campioni o porzioni significative, in modo da intercettare tempestivamente scarti dovuti a giunti, attraversamenti e tolleranze. In parallelo, il controllo qualità può includere verifiche di spessore e densità dell'isolante, check dei fissaggi e dei risvolti di membrane e un tracciamento digitale degli esiti nel modello informativo (BIM). Questa filiera di calcolo, prova e correzione rende la trasmittanza della copertura un KPI davvero “governato”: progettato secondo la UNI EN ISO 6946:2018, verificato quando necessario con la UNI EN ISO 9869-1:2015 e mantenuto nel tempo grazie a ispezioni mirate e alla diagnosi preventiva delle discontinuità.

6.4.2.2. Ponti termici lineari

I ponti termici di copertura sono le “scorciatoie” del calore che si formano ai nodi: attacco parete-tetto (gronda e colmo), raccordi con parapetti e scossaline, lucernari e shed, passaggi di staffe e ancoraggi (ad esempio per fotovoltaico o parapetti), giunzioni tra pannelli o lamiere. In questi punti l'isolante si interrompe o la geometria si assottiglia: il flusso aumenta e le superfici interne possono raffreddarsi.

Per descriverli si usa la trasmittanza termica lineare Ψ [W/m·K], che si calcola in progetto con modelli 2D/3D secondo la UNI EN ISO 10211:2018, oppure – quando il dettaglio lo consente – con i metodi semplificati della UNI EN ISO 14683:2018.

Nel bilancio energetico dell'edificio i contributi lineari si sommano ai termini areali $U \cdot A$ e rientrano nel coefficiente globale di trasmissione H_t .

In pratica $H_t = \Sigma(A_i \cdot U_i^*) + \Sigma(l_k \cdot \Psi_k)$. Questo è proprio l'approccio adottato nelle procedure di ricerca INSITER, che utilizza la stessa scomposizione per collegare il calcolo ai controlli in campo.

Dal punto di vista progettuale, mantenere Ψ su valori dell'ordine dei centesimi di W/m·K è realistico se l'isolamento resta continuo sopra il supporto (tetto “caldo” o isolamento sopra le strutture), se i parapetti hanno risvolti isolanti e tagli termici nei fissaggi, se i lucernari hanno alzate e telai a taglio

termico ben raccordati e se si limitano gli elementi metallici passanti (viti, staffe, mensole) o li si separa con elementi isolanti. Anche giunti tra pannelli o lamiere vanno disegnati per evitare “ponti” lungo nervature e correnti.

Nella fase di collaudo la termografia IR è uno strumento di pre-diagnosi molto efficace. I ponti lineari compaiono come strisce più fredde (in inverno) o più calde (in estate) lungo gronde, parapetti, lucernari e giunzioni; con adeguato salto termico e condizioni controllate si può mappare l’incidenza dei ponti e ricostruire H_i includendo i termini $\Sigma(\Psi \cdot l)$.

In diversi casi studio si è visto che un ponte lineare può far crescere la trasmittanza reale del pacchetto rispetto alla U “di strato”; in un esempio di pannello prefabbricato, l’area con ponte ha portato la U da 0,51 a 0,63 W/m²K, evidenziando quanto il bordo incida se non è progettato e posato correttamente.

Calcolare Ψ con gli standard (UNI EN ISO 10211:2018/14683:2018), progettare la continuità dell’isolamento e i tagli termici nei punti critici della copertura, e verificare in opera con termografia e checklist dedicate consente di contenere davvero i ponti termici e di allineare il comportamento *as-built* a quello di progetto.

6.4.2.3. Fattore di temperatura superficiale

Il fattore di temperatura superficiale f_{Rsi} indica quanto la superficie interna della copertura rimane “calda” rispetto all’aria esterna; si definisce come $f_{Rsi} = (\theta_{si} - \theta_e) / (\theta_i - \theta_e)$. Valori elevati riducono il rischio di condensa superficiale e crescita di muffe.

Nella fase di progetto si ricava la temperatura minima di superficie del dettaglio con il metodo semplificato della UNI EN ISO 13788:2013 quando la geometria è semplice, mentre per nodi complessi – attacco parete-tetto, lucernari con alzata, fissaggi metallici, giunti di facciata e profili passanti – si impiegano modelli numerici 2D/3D secondo UNI EN ISO 10211:2018/ISO per stimare con precisione sia le temperature minime sia i flussi locali.

Molte linee guida europee assumono, per ambienti residenziali a circa 20 °C e umidità interna moderata, un valore obiettivo $f_{Rsi} \geq 0,75$, che corrisponde, ad esempio, a circa 15 °C di temperatura minima di superficie con 20 °C interni e 0 °C esterni; la scelta del valore di riferimento va comunque coerente con le condizioni igrometriche di esercizio.

Sulle coperture i punti più critici per il f_{Rsi} sono le travi o i correntini “freddi” che attraversano l’isolante, i lucernari e le loro alzate, i parapetti e i profili metallici continui, le staffe di fissaggio di pannelli e impianti e le discontinuità all’attacco parete-tetto. Qui la combinazione di alta conducibilità

dei materiali e geometrie sfavorevoli abbassa la temperatura superficiale interna. Le soluzioni efficaci sono la continuità dell'isolamento “sopra struttura” nei tetti caldi, l'eliminazione di elementi metallici passanti o l'uso di tagli termici dedicati, alzate dei lucernari isolate con distanziatori *warm-edge* e risvolti coibentati, nonché il corretto raccordo termico all'attacco con le pareti e lungo i parapetti.

Nello sviluppo dei dettagli costruttivi di copertura è importante progettare la posa in opera di membrane, fissaggi e drenaggi in coerenza con l'isolamento per evitare raffreddamenti localizzati.

La verifica in campo è altrettanto importante: la termografia a infrarossi, eseguita in condizioni idonee, è uno strumento rapido per individuare “punti freddi” compatibili con $f_{R_{sif}}$ insufficiente; per ridurre falsi positivi si opera con adeguato gradiente termico, evitando irraggiamento solare, vento e superfici bagnate. Le anomalie termografiche guidano poi misure puntuali di temperatura per confrontare la superficie reale con il valore minimo atteso da progetto. La tutela del $f_{R_{sif}}$ passa anche per checklist “prima della chiusura”, *mock-up* dei nodi più sensibili (alzate dei lucernari, raccordi con parapetti, attraversamenti impiantistici), tracciabilità digitale delle non conformità e uso di AR/QR per istruire la posa in modo ripetibile. Così il fattore $f_{R_{sif}}$ non resta un numero “di progetto”, ma diventa una prestazione progettata, verificata e mantenuta lungo tutto il ciclo edilizio.

6.4.2.4. Tenuta all'aria

La continuità della barriera all'aria nel passaggio tra pareti e copertura è uno dei punti che più incidono su consumi, comfort e durabilità. Le infiltrazioni in quel nodo aumentano le dispersioni e possono innescare condense convettive dentro gli strati del tetto.

Nella fase di progetto la “linea” di tenuta va tracciata senza interruzioni e con dettagli espliciti per i cambi di materiale e direzione: il freno/barriera al vapore del tetto deve risvoltare e collegarsi alla barriera della parete, prima della posa del cappotto o del rivestimento, così da chiudere il circuito e proteggere anche travi passanti e testate in legno.

Nella fase di cantiere la qualità si gioca su tre attenzioni: collegare davvero tra loro gli strati di parete e tetto, sigillare i passaggi impiantistici con manicotti e primer compatibili, e verificare pendenze e risvolti prima della chiusura. Le checklist digitali e i kit di giunto proposti da INSITER (vedi Capitolo 7) aiutano a standardizzare questi passaggi e a documentare con foto, coordinate e *timestamp* le ispezioni “prima della chiusura”, così da intercettare discontinuità quando correggerle costa poco.

La verifica oggettiva della tenuta si fa a scala edificio con il *blower door test* secondo UNI EN ISO 9972:2015: si pressurizza/depressurizza l'edificio e si misura il flusso d'aria che attraversa l'involucro da eseguire quando il guscio è chiuso, con eventuale ripetizione in fase intermedia per correggere i difetti prima delle finiture.

Per localizzare le perdite si affiancano metodi diagnostici rapidi: fumo, termografia in condizioni idonee e, soprattutto, ultrasuoni. Le procedure adottate nella ricerca INSITER descrivono l'uso di sorgenti ultrasoniche all'interno e di un ricevitore all'esterno per "scansionare" il nodo parete-tetto e i giunti della copertura, individuando fessure millimetriche anche quando la prova in pressione non basta a precisare dove intervenire. Questo approccio è stato validato in laboratorio su *mock-up* e inserito nei protocolli di cantiere come ausilio al *blower door*.

Quando servono riscontri su singoli strati o componenti (per esempio membrane, pannelli o pacchetti prefabbricati), si possono svolgere prove di permeabilità all'aria in laboratorio secondo la UNI EN 12114:2000, utili a selezionare materiali e dettagli che facilitino il raggiungimento della tenuta complessiva in opera.

La tenuta all'aria non è garantita "per sempre" in quanto le guarnizioni e sigillanti invecchiano e i movimenti differenziali possono aprire micro-fessure. A tale scopo sono importanti con controlli periodici dei giunti e, se necessario, nuove ispezioni mirate per mantenere nel tempo la prestazione del nodo parete-copertura, specie per edifici ad altissime prestazioni energetiche.

6.4.2.5. Gestione del vapore e dell'acqua meteorica

La gestione del vapore e dell'acqua meteorica in copertura è un KPI che tiene insieme durabilità, efficienza energetica e qualità d'uso. La copertura deve smaltire senza intoppi l'acqua piovana e, allo stesso tempo, impedire che l'umidità attraversi gli strati e condensi all'interno.

Nella fase di progetto il primo passo è scegliere la tipologia corretta e posizionare in modo coerente gli strati di controllo. Le coperture "calde", con l'isolante sotto il manto di tenuta, richiedono un efficace strato di controllo al vapore; le "inverse", con isolante idrofobo sopra il manto, riducono la necessità di uno specifico freno/barriera al vapore ma impongono materiali con alta idrorepellenza. Questo inquadramento – insieme alle varianti come i tetti verdi o i lastrici praticabili – è alla base delle specifiche di capitolato.

Sulla parte igrometrica, la verifica di base si svolge con la UNI EN ISO 13788:2013 per controllare il rischio di condense interstiziali e le temperature

minime di superficie nei punti critici. In parallelo si definiscono le prestazioni e la durabilità degli strati: membrane bituminose o sintetiche conformi alle famiglie di prodotto (UNI EN 13707:2013 per le bituminose, UNI EN 13956:2013 per le sintetiche) e sottoposte a prove di stabilità dimensionale, flessibilità a freddo e invecchiamento accelerato (UNI EN 1107-1/2:2002, UNI EN 1109:2013 / UNI EN 495-5:2013, UNI EN 1296:2001). Per tetti verdi, il produttore deve dichiarare l' idoneità all'uso e la resistenza alle radici. L'insieme di queste verifiche serve a garantire che la protezione all'acqua resti efficace nel tempo e in condizioni reali di esercizio.

Il dettaglio costruttivo è decisivo quanto la scelta dei materiali. Nei tetti a falda, gli schermi e le membrane traspiranti sul lato freddo devono essere conformi alla UNI EN 13859-1:2014, mentre le membrane per facciata alla UNI EN 13859-2:2014; gli strati di controllo del vapore interno fanno riferimento alla UNI EN 13984:2013. La posa richiede sovrapposizioni e nastature continue: le linee guida INSITER ricordano, ad esempio, che le sovrapposizioni tipiche sono dell'ordine di 10-20 cm in funzione della pendenza, e che i giunti vanno sigillati con nastri e adesivi idonei. È altrettanto importante “girare” lo strato di controllo del vapore e la barriera all'aria sul risvolto di parete per chiudere il nodo parete-tetto, mantenendo la continuità della tenuta.

Il deflusso dell'acqua piovana va progettato come un sistema ridondante: pendenze positive, bocchettoni dimensionati e accessibili, troppopieni e scossaline correttamente raccordate con i parapetti.

Le esperienze di *mock-up* INSITER mostrano soluzioni praticabili per coperture piane e praticabili, l'inserimento di strati drenanti e la cura del raccordo con i parapetti e i profili gocciolatoi, elementi che evitano ristagni e rigurgiti in caso di eventi intensi.

Nella produzione e prefabbricazione vanno evitati vuoti d'isolante in corrispondenza di inserti e ancoraggi, discontinuità nelle saldature delle membrane e interruzioni dell'antivento. Un difetto ricorrente è il *peeling* del risvolto verticale della membrana – dovuto a ritiro e trazione stagionale – che può innescare infiltrazioni lungo i bordi: il fenomeno è documentato con schemi di dettaglio e richiama l'esigenza di corretti ancoraggi, larghezze di sormonto e adesioni al supporto secondo specifica. Si suggerisce di adottare kit di giunto standardizzati, controlli dimensionali e istruzioni digitali per l'assemblaggio.

Il controllo in cantiere e in collaudo chiude il cerchio. Oltre al sopralluogo visivo dei risvolti, dei bocchettoni e dei percorsi di drenaggio, la termografia a raggi infrarossi è utile per localizzare umidità latente e discontinuità del pacchetto. Un ulteriore controllo dei tetti è l'individuazione dell'isolante bagnato mediante infrarossi (*infrared*, IR).

Nelle checklist di progetto, il “pacchetto tetto” viene controllato a step: continuità del freno/barriera al vapore, pulizia e planarità del supporto, idoneità dei fissaggi, presenza di acqua o ghiaccio prima della posa degli strati, planarità e geometria dei rivestimenti. Le stesse linee guida includono ispezioni in esercizio per intercettare nel tempo degradi di sigillanti e ostruzioni dei drenaggi.

Infine, la qualità non è solo tecnica ma anche di processo. L’ecosistema di metodologia, strumenti e linee guida sviluppate da INSITER mette a disposizione checklist digitali, QR code sui componenti e app di auto-ispezione per registrare non conformità con foto, coordinate e *timestamp*, alimentando un ciclo di feedback tra cantiere e progettazione. Questo rende tracciabile la gestione del vapore e dell’acqua e riduce la probabilità che una buona copertura “di capitolato” perda prestazione in opera.

6.4.2.6. Tenuta all’acqua della copertura e dettagli di drenaggio

La tenuta all’acqua di una copertura non dipende solo dal “manto” impermeabile, ma dall’intero percorso che l’acqua compie per defluire verso a terra. A tale scopo, l’acqua deve essere respinta dalla prima barriera e, se qualche goccia la supera, deve essere intercettata e accompagnata dall’interno verso l’esterno attraverso vie di drenaggio dedicate. In pratica, il progetto deve combinare pendenze adeguate, bocchettoni e troppopieni ridondanti, scossaline e risvolti continui su parapetti e corpi emergenti, più protezioni antintasamento (cestelli, griglie, filtri, ecc.) che mantengano libero lo scarico.

Nei sistemi prefabbricati questa logica si traduce in pacchetti provati e ripetibili.

Il principio chiave è progettare secondo sistemi di tenuta “multistadio” con ridondanza del percorso idrico: il giunto primario (sigillante e/o guarnizione) non è l’unico elemento di barriera, ma è affiancato da una linea di drenaggio di riserva posta a valle del primo piano di tenuta. La sezione del profilo e dei coprighiunti è quindi configurata a labirinto, con camera di raccolta ed equalizzazione della pressione e con fori di scarico (*weep holes*) opportunamente dimensionati e distribuiti, in modo che l’acqua che supera il primo stadio venga intercettata e scaricata verso l’esterno anche in presenza di differenze di pressione o azione capillare. Questo approccio è indispensabile perché i sigillanti e le guarnizioni sono soggetti a ritiro, invecchiamento e distacchi per cicli termo-igrometrici e raggi UV; non garantiscono quindi, da soli, una tenuta durabile. Per limitare le discontinuità agli angoli è raccomandato l’uso di giunzioni vulcanizzate e tagli diagonali delle guarnizioni; nei telai a montanti e trasversi è inoltre fondamentale il corretto

drenaggio delle tasche di vetrazione, così che eventuali ingressi al bordo o agli angoli “sfoghino” dai *weep holes* dei copriprofilo senza migrare all’interno. Pertanto, è necessario non affidarsi unicamente al sigillante, ma prevedere un sistema di drenaggio interno-verso-esterno e verificare – specie per tetti prefabbricati – il tutto con *mock-up* e prove, ricordando che la vita utile tipica dei sigillanti è dell’ordine di 10-15 anni e richiede ispezioni e manutenzione periodiche.

Dal punto di vista del controllo qualità, INSITER suggerisce di standardizzare i “kit di giunto” e di supportare la posa con istruzioni digitali, checklist e tracciabilità delle non conformità: operatori e capocantiere registrano foto, coordinate e *timestamp*, e gli esiti dei controlli confluiscono in *dashboard* che alimentano il ciclo di miglioramento. Questa *pipeline* consente di verificare, prima della chiusura degli strati, pendenze reali, continuità dei risvolti, corretta posizione/altezza di bocchettoni e troppopieni e la presenza di tutti gli accessori di protezione (collari, manicotti, parapioggia, ecc.), riducendo il rischio di infiltrazioni occulte.

Nella messa in servizio è utile affiancare ai collaudi visivi delle prove funzionali su porzioni di copertura (ad esempio test di allagamento locale o test su *mock-up*) per validare pendenze e deflussi; nelle verifiche di cantiere e in esercizio, termografia e rilievi 3D aiutano a mappare bagnature o ristagni e a indirizzare gli interventi di sigillatura o pulizia dei canali di scarico.

Le procedure INSITER raccomandano inoltre *mock-up* iniziali e controlli ripetuti lungo l’avanzamento, pratica che l’esperienza sull’involucro trasparente ha dimostrato efficace nel prevenire difetti ricorrenti e che si applica per analogia anche ai nodi di copertura.

Infine, la durabilità va considerata a capitolato: esposizione UV, contatto con idrocarburi nelle aree tecniche, compatibilità tra membrane e strati protettivi, resistenza alle radici per tetti verdi.

Un piano di manutenzione semplice ma puntuale – pulizia periodica di bocchettoni e griglie, verifica di risvolti e scossaline, ispezioni dei sigillanti con ripristini programmati – è parte integrante della prestazione nel tempo; senza questa cura, anche una copertura progettata bene può perdere efficienza idraulica e generare danni a cascata all’involucro.

6.4.2.7. Integrazione di impianti e *Building-Integrated Photovoltaics*

La copertura è spesso il “piano di lavoro” per impianti tecnici e sistemi fotovoltaici: qui si concentra gran parte dell’opportunità di produrre energia da fonte solare, ma anche dei rischi per tenuta all’acqua, continuità della barriera all’aria e formazione di ponti termici.

Considerare l'integrazione di *Building-Integrated Photovoltaics* (BIPV) sin dal progetto significa disegnare fissaggi e attraversamenti impiantistici in modo che gli strati funzionali della copertura restino continui, che le vie di drenaggio rimangano libere e che i carichi da vento e manutenzione siano correttamente trasferiti alla struttura. Diventa pertanto pratico e utile verificare, anche mediante *mock-up*, coperture che prevedono zone tecniche pedonabili con stratigrafie dedicate, membrane impermeabili, strati di protezione antiperforazione e dettagli di coronamento con parapetti e gocciolatoi studiati per lo smaltimento sicuro dell'acqua. Questo è importante per validare soluzioni efficaci prima della produzione in serie e monitorati in cantiere.

Sul fronte tecnologico, il ventaglio di soluzioni BIPV permette di integrare moduli come vero e proprio manto di copertura, con varianti mimetiche e colorate quando richiesto dal contesto, oppure di usare moduli su struttura aerata o sistemi *rooftop* zavorrati. Le famiglie di prodotto oggi disponibili includono tegole e scandole fotovoltaiche, moduli colorati o texturizzati per coperture e facciate, e vetri fotovoltaici semicontenuti per lucernari e pensiline; tutte opzioni che combinano produzione elettrica con requisiti architettonici e di involucro. Quando si adottano finiture o serigrafie per esigenze estetiche è bene considerare anche l'impatto sul rendimento. Infatti, trattamenti e rivestimenti del vetro anteriore migliorano l'integrazione visiva ma riducono in diversa misura la trasmittanza e la corrente del modulo, con effetti misurabili sulla resa energetica annuale. In casi studio di edifici *net zero*, l'involucro fotovoltaico del tetto – talvolta associato a porzioni di facciata attiva – copre integralmente il fabbisogno energetico, confermando che la scelta della configurazione e dell'orientamento della copertura è spesso decisiva per il bilancio energetico.

Il KPI di riferimento da monitorare nel tempo è la produzione annua di energia dei moduli [$\text{kWh/m}^2\text{a}$], che va confrontata con l'atteso di progetto e con i dati di esercizio del sistema (temperature, ombreggiamenti, indisponibilità), così da distinguere una perdita impiantistica da un problema di involucro come ostruzioni dei drenaggi, infiltrazioni, discontinuità dell'aria o surriscaldamenti localizzati. L'approccio INSITER include esplicitamente la «*energy production of photovoltaic panels*» tra i KPI da strumentare, a conferma che la prestazione energetica dell'integrazione deve essere misurata e tracciata, non solo stimata.

Dal punto di vista costruttivo, l'integrazione corretta passa per pochi principi chiave. Gli ancoraggi devono trasferire i carichi senza creare percorsi preferenziali per l'acqua e senza tagliare gli strati di tenuta: dove servono passaggi, si ricorre a boccole, collarini e risvolti compatibili con la membrana, mantenendo la continuità delle barriere all'aria e al vapore. Le staffe

e i profili metallici vanno progettati con interposizioni isolanti o “tagli termici” per ridurre i ponti termici lineari in corrispondenza di montanti, guide e binari; i cavidotti e i supporti devono rispettare le pendenze del tetto, senza creare ostacoli al deflusso o zone di ristagno. Le vie di scarico – bocchettoni, pluviali, troppopieni – vanno dimensionate e protette contro l’intasamento, con parapetti e scossaline che completano il “secondo livello di difesa” dal lato interno verso l’esterno.

Poiché l’invecchiamento di membrane, sigillanti e guarnizioni può alterare la prestazione, è opportuno prevedere ispezioni programmate come anche un ciclo rapido e periodico di verifiche post-consegna che confermano (e, se serve, riallineano) le prestazioni dell’edificio in modo analogo a quanto adottato per gli altri sistemi dell’involucro.

Infine, conviene ricordare che il valore del BIPV non è solo energetico ma anche progettuale. L’integrazione architettonica, oggi supportata da prodotti mimetici e da vetri fotovoltaici semi-trasparenti, permette di coniugare produzione, controllo solare e qualità percettiva senza trattare il fotovoltaico come “corpo estraneo” alla copertura. Diverse buone pratiche e casi studio confermano che l’involucro attivo funziona meglio quando moduli, fissaggi, dettagli di drenaggio e controlli in cantiere sono pensati insieme, testati su *mock-up* e verificati lungo la produzione e il montaggio.

6.4.2.8. Isolamento acustico

L’isolamento acustico della copertura misura la capacità del tetto – considerato come sistema completo di strati, giunti, attraversamenti impiantistici, lucernari ed elementi di evacuazione – di attenuare il rumore aereo esterno verso gli ambienti sottostanti. È un indicatore al pari di trasmittanza e tenuta all’aria: quando la copertura è leggera o presenta discontinuità (botole, bocchettoni, passaggi impianti), le vie di fuga acustiche e le trasmissioni per fiancheggiamento diventano la causa principale delle prestazioni inferiori alle attese.

Nel metodo INSITER, la copertura è esplicitamente inserita tra i componenti dell’involucro da monitorare con misure dedicate in cantiere, includendo la misura dell’isolamento acustico del tetto oltre a pressurizzazione e indagini termiche. La caratterizzazione di prodotto dei pacchetti e degli elementi di copertura può essere condotta in laboratorio come perdita di trasmissione sonora su bande di frequenza, con sintesi dell’indice pesato (ad esempio R_w) secondo la serie EN ISO 10140; questi valori fungono da “targa” per le soluzioni prefabbricate o stratigrafie tipo. In opera, l’isolamento della copertura si verifica con prove sul lato interno e sorgente esterna, adottando gli indici normalizzati

previsti dalla normativa applicabile e dal capitolato (coerenti con i quadri di riferimento sugli indicatori acustici per l'edilizia).

Prima della chiusura si controllano continuità e corretta posa di schermi al vapore, isolanti e strati di tenuta, la compressione dei nastri e la conformità dei dettagli attorno a lucernari e corpi passanti. La mappatura acustica (telecamera/array di microfoni) e la sonda di intensità sonora consentono di localizzare precocemente punti deboli e perdite sui nodi di copertura, con georeferenziazione sul modello BIM per tracciabilità e correzioni mirate. A guscio chiuso si eseguono le prove in opera di isolamento e, in parallelo, la pressurizzazione con ventilatore: è essenziale distinguere perdite d'aria e perdite acustiche perché piccole fessure possono non emergere nelle mappe acustiche pur compromettendo l'ermeticità; per l'individuazione rapida delle infiltrazioni si affianca l'ultrasuono. Tutti i risultati confluiscono nel dossier digitale/BIM per la gestione delle non conformità.

Le scelte costruttive incidono in modo decisivo. Nelle coperture leggere (ad esempio con lamiera grecata), la stratigrafia massa-molla-massa con strati elastici di disaccoppiamento e controsoffitto pesante migliora l'isolamento; la corretta sequenza e continuità degli strati è tanto importante quanto lo spessore. Inoltre, per il rumore da pioggia sulle lamiere, specifici accorgimenti acustici risultano particolarmente efficaci e vanno previsti già in progetto. Nei tetti piani, la cura dei raccordi tra manto impermeabile, attacchi di parapetti e forometrie evita percorsi preferenziali di trasmissione; nelle coperture inclinate la geometria e gli oggetti possono mitigare o amplificare il campo sonoro esterno e vanno valutati assieme al dimensionamento degli elementi trasparenti di copertura.

In sintesi, il KPI di isolamento acustico della copertura si governa come gli altri KPI dell'involucro: qualità di posa e tolleranze presidiate prima della chiusura, prove in opera con indici e soglie dichiarate, uso complementare di diagnostica acustica e di pressurizzazione/ultrasuoni per separare i meccanismi di perdita, e tracciabilità digitale nel BIM. Questo consente sia la certificazione del valore globale della copertura sia la correzione mirata dei punti deboli, riducendo interventi successivi e rischio di contenziosi.

6.4.2.9. KPI geometrici e di posa

Per le coperture, la geometria "reale" conta quanto la stratigrafia progettata e posta in opera. Planarità, pendenze, allineamenti, quote di bocchettoni e troppopieni, continuità e larghezze dei giunti influenzano direttamente altri parametri come la trasmittanza e i ponti termici (U e Ψ), il fattore di temperatura superficiale f_{Rsi} e, soprattutto, le tenute all'aria e all'acqua.

Un tetto piano con pendenze irregolari o insufficienti accumula acqua e stressa sigillanti e risvolti; un nodo con parapetto non a quota o senza corretti gocciolatoi facilita ristagni e infiltrazioni. Per questo è fondamentale trattare la geometria come un vero indicatore: non solo “tolleranze da capitolato”, ma misure programmate prima della chiusura degli strati e tracciate nel flusso digitale di cantiere. Le coperture sono punti critici dell’edificio sia per dispersioni sia per impermeabilizzazione, e pertanto le analisi devono includere attenti approfondimenti sui collegamenti con le facciate, dove errori geometrici ai bordi possono compromettere la prestazione del sistema nel suo complesso.

Operativamente, i controlli geometrici vanno pianificati per fasi. Durante la costruzione del pacchetto di copertura si verifica la planarità e l’assenza di irregolarità del supporto, la continuità del freno/barriera al vapore con i necessari risvolti, la regolarità dei piani separatori e portanti, e la corretta geometria di posa degli strati di finitura; rientrano qui anche le quote funzionali di bocchettoni e troppopieni e la verifica dei dettagli di drenaggio e dei risvolti su parapetti.

Per definire come si verificano le tolleranze, il riferimento metodologico che può essere adottato è la DIN 18202:2019: non tanto un elenco rigido di numeri, quanto una procedura per stabilire e controllare deviazioni ammissibili su punti, linee e piani. L’idea è di usare i disegni per definire valori “nominali” mentre in cantiere si fissano scostamenti massimi accettabili e strumenti di verifica coerenti, così da evitare rettifiche costose e, soprattutto, effetti a cascata su U , Ψ , f_{Rsi} e tenute.

Nei sistemi prefabbricati e nei cantieri digitali il controllo diventa tracciabile: rilievi “prima della chiusura” con stazione totale o laser-scanner 3D, confronto automatico con il modello BIM e registrazione delle differenze dimensionali con foto, coordinate e *timestamp*. Questo approccio si appoggia a checklist digitali e ad ausili AR/QR, così che la correzione delle non conformità (ad esempio una pendenza fuori tolleranza o un foro di scarico non alla quota) rientri in un ciclo organizzato di feedback tra cantiere, progettazione e produzione.

I *mock-up* aiutano a verificare i nodi più sensibili: ad esempio il raccordo tra facciata e copertura con parapetti, profili gocciolatoi e scossaline dedicate. Il progetto di ricerca INSITER propone casi in cui il colmo/parapetto è risolto con frontali in alluminio profilato e scossaline coordinate al manto, proprio per rendere ispezionabile e manutenibile la linea di drenaggio; fissare questi dettagli in un campione provato prima della produzione di serie evita derive in cantiere e semplifica i controlli periodici.

In sintesi, trattare la geometria della copertura come KPI significa misurare e documentare, non solo disegnare: piani e pendenze, quote funzionali

del sistema di smaltimento, continuità dei risvolti e larghezze utili dei giunti vengono verificati con metodi e strumenti espliciti, collegati al BIM e alle checklist predeterminate in accordo tra i vari attori del processo.

È questa disciplina di cantiere – più che il solo “buon dettaglio” – a trasformare una copertura corretta sulla carta in una copertura che isola, drena e dura davvero.

7. Innovazione nella gestione del processo di qualità

7. Innovation in the Quality Process Management

This last chapter presents INSITER as a practice-oriented method to close the gap between what is designed and what is delivered and operated in energy-efficient buildings made with prefabricated components.

The European project INSITER (Intuitive Self-Inspection Techniques using Augmented Reality) was developed to reduce the performance gap between design and delivery in high-performance buildings, particularly when prefabricated components or industrialized processes are adopted. Discrepancies between expected and real performance remain one of the main obstacles to the transition towards zero-emission buildings (ZEB).

The methodology is built around a cloud-based Building Information Model that serves as the single source of truth for all stakeholders. This digital backbone is complemented by tools that extend quality control throughout the construction cycle: augmented and mixed reality guidance for on-site workers; targeted measurement protocols providing objective evidence of quality; digital traceability systems linking each component to its model counterpart; and virtual pre-installation checks to detect interferences and rehearse assembly sequences.

The value of INSITER lies less in the novelty of individual technologies than in their integration, which turns quality assurance from a final check into a continuous, traceable and repeatable process. This integration reduces errors and rework, improves geometrical and performance accuracy, and shortens execution times. Demonstrators carried out within the project confirm that the approach is suitable for new construction, deep renovation and planned maintenance, providing a replicable methodology aligned with both the energy transition and the digitalization of the construction sector.

Keywords: *Building Information Modeling (BIM), Augmented Reality (AR), self-inspection, quality assurance, nearly zero-energy buildings (nZEB), prefabrication, performance gap, on-site measurements, commissioning*

Questo capitolo presenta il progetto europeo INSITER (*Intuitive Self-Inspection Techniques using Augmented Reality*), sviluppato per affrontare una delle questioni più critiche della transizione verso edifici a zero emissioni: la

coerenza tra ciò che viene progettato e ciò che viene effettivamente realizzato e messo in esercizio.

In particolare, quando si adottano componenti prefabbricati o processi costruttivi industrializzati, il rischio di discrepanze tra prestazioni attese e prestazioni reali – il cosiddetto *performance gap* – può compromettere in modo significativo l'efficacia degli interventi, vanificando in parte i benefici attesi in termini di efficienza energetica, qualità costruttiva e sostenibilità ambientale.

La metodologia proposta da INSITER nasce per ridurre tale divario, trasferendo il controllo di qualità dall'esclusivo momento del collaudo finale a un processo continuo che accompagna l'intero ciclo edilizio. Al centro di questo approccio vi è il modello informativo dell'edificio, condiviso in ambiente *cloud* e costantemente aggiornato, che diventa il riferimento unico e affidabile per tutti gli attori coinvolti. Attorno a questa “spina dorsale digitale” si innestano strumenti e procedure pensati per rendere immediatamente operativi i principi della verifica in opera: guide visive basate su realtà aumentata e mista, applicate direttamente in cantiere per orientare le squadre di montaggio; protocolli di misura rapidi e mirati, capaci di restituire riscontri oggettivi sul comportamento di componenti e sistemi; strumenti di tracciabilità digitale, che collegano ogni elemento installato al modello e ne garantiscono l'identificazione univoca lungo l'intero processo.

Il valore aggiunto di questa impostazione non risiede tanto nell'introduzione di nuove tecnologie quanto nella loro integrazione. L'uso coordinato di modelli digitali, istruzioni aumentate, misure in sito e controlli virtuali consente di trasformare le operazioni di verifica da attività episodiche e spesso tardive a parte integrante della prassi quotidiana di cantiere. In questo modo, gli errori di interpretazione si riducono, le rilavorazioni diventano meno frequenti, l'accuratezza geometrica e prestazionale dell'opera aumenta e i tempi di esecuzione si comprimono.

L'approccio di INSITER è volutamente pragmatico. Non si limita a proporre una sequenza di controlli tecnici, ma mira a costruire una filiera della qualità in grado di accompagnare l'edificio dalla fase di rilievo iniziale fino alla consegna dell'*as-built*. Ogni passaggio viene supportato da strumenti digitali che rendono più semplice e accessibile il lavoro degli operatori e al tempo stesso più trasparente e verificabile l'intero processo. I casi applicativi sviluppati nel progetto dimostrano come tale metodologia possa essere adattata a contesti diversi – dalla nuova costruzione alla riqualificazione profonda, fino alla manutenzione programmata – e come possa garantire un controllo della qualità continuo, verificabile e replicabile, coerente con le sfide poste dalla transizione energetica e dalla digitalizzazione del settore edilizio.

7.1. Il progetto INSITER

Di fronte agli obiettivi europei di neutralità climatica al 2050 e di riduzione di almeno il 55% delle emissioni nette già entro il 2030, il settore delle costruzioni è chiamato a una trasformazione profonda: edifici a domanda energetica bassissima e priva di emissioni fossili in esercizio, rinnovabili diffuse e processi di cantiere tracciabili.

La revisione 2024 della Direttiva EPBD, già presentate nel Capitolo 5, introduce infatti il paradigma degli “edifici a zero emissioni” (ZEB) per tutte le nuove realizzazioni dal 1° gennaio 2030 (dal 2028 per gli edifici pubblici), proseguendo l’evoluzione dal requisito di “edifici a energia quasi zero” (nZEB) della EPBD 2010/2018. Parallelamente, l’iniziativa *Renovation Wave*, quale parte del più ampio programma strategico *The European Green Deal*, mira ad almeno raddoppiare i tassi annuali di riqualificazione¹ e a moltiplicare gli interventi *deep* per allinearsi alla traiettoria di decarbonizzazione. Nello specifico questa iniziativa definisce obiettivi concreti e lega in modo esplicito l’aumento del tasso e della qualità delle riqualificazioni al traguardo di neutralità climatica 2050. Al quadro presentato si affianca l’emergere di modelli che superano il concetto nZEB come gli edifici *plus energy* che, su base annuale, producono più energia da rinnovabili di quanta ne consumino, contribuendo alla flessibilità di rete e alla decarbonizzazione dei contesti dove il saldo zero non è praticabile edificio per edificio.

Tali traiettorie rendono indispensabile una verifica in opera che non si limiti più al solo collaudo finale del progetto concluso ma accompagni ogni fase del processo edilizio affinché si raggiunga un’effettiva gestione del processo di qualità che garantisca congruenza di prestazioni tra la fase di progetto, la fase costruita e la fase di esercizio.

In questo scenario e sulla base di quanto introdotto nei capitoli precedenti, la qualità reale del costruito si decide “prima” e “durante” il cantiere: è qui che si gioca il divario tra progetto e prestazioni effettive, ed è qui che servono metodi e strumenti per misurare, documentare e correggere in tempo eventuali vizi o difformità.

¹ Il programma *Renovation Wave* parte da un tasso annuo di rinnovamento energetico medio ponderato di circa l’1% del parco edilizio UE; le ristrutturazioni profonde ($\geq 60\%$ di riduzione dei consumi) rappresentano circa lo 0,2% all’anno. Inoltre, circa l’11% degli edifici subisce qualche intervento ogni anno, ma solo una piccola parte riguarda davvero l’efficienza energetica. Su questa base la Commissione mira ad almeno raddoppiare il tasso entro il 2030 (arrivare al 2% circa) e rinnovare 35 milioni di edifici.

Su questa esigenza si innesta la ricerca europea INSITER², nata per colmare il *performance gap* tra quanto previsto a progetto e quanto consegnato in cantiere, soprattutto in filiere prefabbricate o industrializzate. La motivazione di fondo è duplice: da un lato, garantire le prestazioni attraverso procedure semplificate e affidabili; dall'altro, responsabilizzare gli attori del processo in cantiere attraverso procedure di *self-inspection* (autocontrollo strutturato) e *self-instruction* (istruzioni operative interattive) su dispositivi mobili, integrando BIM e realtà aumentata per rendere tracciabili decisioni, controlli e non conformità. La combinazione di *self-instruction* e *self-inspection* è il cuore dell'innovazione allo scopo di ridurre l'errore alla fonte, accelerando il ciclo rilievo-correzione e creando evidenze verificabili. La *self-instruction* consiste nel fornire alle maestranze, durante l'esecuzione, guide digitali interattive su dispositivi mobili, pensate per prevenire gli errori; tali contenuti si aggiornano continuamente in base sia al flusso operativo previsto sia ai riscontri che emergono dall'auto-ispezione in tempo reale. La *self-inspection*, invece, mette in mano agli operatori il controllo e il monitoraggio della qualità del proprio lavoro, singolarmente o in team, in parallelo alle attività in cantiere. Questo approccio supera la sola logica del controllo a posteriori e punta a intercettare e correggere subito eventuali non conformità.

Il quadro metodologico proposto da INSITER è organizzato in un modello operativo composto da otto step, descritto nella sezione successiva, che struttura l'intero processo di costruzione o di riqualificazione di un edificio ad alte prestazioni energetiche. Il modello è implementato in una piattaforma collaborativa che funge da hub per contenuti, dati di misura, app mobili e scambio con i dimostratori, garantendo versionamento e aggiornamento continuo del *toolset*.

Sul fronte delle misure, seguendo i KPI presentati nel Capitolo 6, INSITER ha selezionato, ottimizzato e validato in laboratorio protocolli per diagnostica termica (termografia IR, HFM e *imaging* della distribuzione locale della U), tenuta all'aria, umidità, acustica (incluso *acoustic leakage* e metodi con array microfonici), geometria e posizionamento, e per impianti meccanici, elettrici e idraulici, nonché sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria. Tali sistemi sono raggruppati in aree funzionali (*ter-*

² INSITER (*Intuitive Self-Inspection Techniques using Augmented Reality for construction, refurbishment and maintenance of energy-efficient buildings made of prefabricated components*) è un progetto H2020 (Grant Agreement n. 636063) attivo dal 1° dicembre 2014 al 30 novembre 2018 (call EeB-03-2014, schema RIA), realizzato da un consorzio di 13 partner coordinato da DEMO Consultants BV (NL), con un costo/contributo UE pari a € 5.936.010,63.

mico-imaging, acustico-vibrazionale, discrepanze geometriche/umidità, posizionamento/sensing/interfacciamento) e i dati vengono integrati nel BIM per ottenere riscontri 3D combinati. L'attività di laboratorio ha incluso banchi prova 2D (controllo pannelli prefabbricati) e *mock-up* 3D, oltre a test virtuali basati su BIM e analisi d'incertezza sulle misure, con raccomandazioni d'uso in cantiere.

La validazione in campo ha coinvolto sei dimostratori europei, coprendo nuova costruzione, retrofit profondo e fase di finitura in fabbrica. L'insieme dei casi d'uso ha dimostrato trasferibilità e impatto dell'autocontrollo su KPI assunti alla base del progetto (ad esempio trasmittanze termiche, tenute, materiali/posa, microclima interno, ecc.).

L'analisi trasversale e il *benchmarking* finale hanno consolidato le indicazioni riportate nel Capitolo 5 sul monitoraggio dei principali KPI inerenti, mentre workshop dedicati con gli stakeholder hanno chiarito le “proposte di valore”³.

Sul versante delle ricadute regolatorie, il progetto ha elaborato raccomandazioni per la standardizzazione, con contributi su EPBD, BIM/*openBIM* (*buildingSMART*), qualificazione delle pratiche di autocontrollo e linee guida operative, in coerenza con l'obiettivo di portare i risultati nella prassi di impresa (internalizzazione) e nel mercato/formazione (esternalizzazione). Questa dimensione è centrale per l'allineamento con i Piani Nazionali di Rinnovo del Parco Edilizio introdotti dalla nuova EPBD e, più in generale, con la traiettoria ZEB e l'efficientamento al 2030.

Nel paradigma di digitalizzazione dell'edilizia, l'innovazione di procedure *self-instruction* e *self-inspection* proposte da INSITER diventa l'anello umano dei sistemi cyber-fisici: le istruzioni digitali guidano l'operatore nel momento dell'esecuzione, mentre le verifiche *on-site* generano dati strutturati che rientrano nel modello informativo e alimentano un ciclo continuo di miglioramento.

In INSITER questo ciclo è reso operativo da un ambiente collaborativo che svolge il ruolo di *Common Data Environment* (CDE): la piattaforma *SharePoint* estesa con interfaccia *Content Management Interoperability Services* (CMIS) organizza contenuti, modelli IFC e misure secondo gli otto step; le app della RE Suite⁴ distribuiscono istruzioni passo-passo, checklist e raccolgono evidenze con foto, geolocalizzazione e *timestamp*; un database

³ Sintesi chiara dei benefici concreti che una soluzione offre ai diversi attori, rispetto allo stato attuale.

⁴ RE Suite è una soluzione software di DEMO Consultants che aiuta a gestire le informazioni relative a immobili e infrastrutture civili, consentendo di raccogliere, strutturare, analizzare e accedere ai dati, ottimizzare i costi, supportare le decisioni, monitorare i KPI e integrare le informazioni BIM e GIS (<https://www.demobv.nl/en/resuite>).

PostgreSQL conserva dati *real-time* e metadati, collegando ogni misura agli oggetti BIM così da riportare gli esiti dei controlli direttamente sul modello e sui cruscotti di progetto.

Questo flusso “dati-azione-verifica” rende tracciabile il processo, accelera l’escalation delle non conformità e consente di chiudere il divario tra progetto e *as-built* già durante la posa. L’impiego di AR/MR funge da abilitatore chiave: sovrapponendo al reale le sequenze di montaggio, i componenti prefabbricati e i punti di controllo derivati dal BIM, gli operatori ricevono auto-istruzioni contestuali e possono validare in tempo reale la corretta installazione. Dimostrazioni in fabbrica e in cantiere hanno mostrato l’utilità di un’app HoloLens/MR e di un’app AR BIM-based per l’auto-istruzione, con feedback positivo sull’usabilità e sulla capacità di ridurre errori ricorrenti in assemblaggio e posa di moduli e serramenti.

La componente di misura integra termografia, prove di tenuta e metodi acustici come *SoundBrush* e array microfonic: gli esiti, inclusi indicatori come lo *Spatial Prominence Ratio*, permettono di individuare criticità dei giunti già in produzione e di definire soglie interne più stringenti rispetto ai minimi normativi, in modo da consegnare elementi che superino i test regolamentati in sito.

Anche nei casi di *commissioning* le catene di controllo sono ricondotte agli otto step, con KPI calcolati e visualizzati in ambiente INSITER per supportare l’accettazione finale.

Nel passaggio da BIM a gemello digitale, i dati di verifica *as-built* e i flussi IoT in esercizio aggiornano il modello e abilitano decisioni informate lungo costruzione, avviamento e gestione.

L’impostazione formativa di INSITER sostiene questa transizione digitale in chiave realmente *human-centric*: un percorso a livelli dalla sensibilizzazione *e-learning* all’uso di strumenti portatili avanzati, fino all’integrazione dei contenuti di auto-istruzione nel BIM e all’impiego dell’AR, così da trasformare le maestranze in operatori della qualità capaci di interagire con dati e modelli e di correggere in autonomia gli scostamenti. Tale impostazione, centrata sulla persona, è coerente con la visione della nuova ondata di digitalizzazione industriale e con l’esigenza di pratiche verificabili per una *deep renovation* a prova di KPI.

7.2. La metodologia INSITER

La metodologia INSITER nasce per portare il controllo qualità all’interno del processo, trasformando ogni sua fase in un momento misurabile, tracciabile e migliorabile. Non è un elenco di prove a consuntivo, ma un percorso

in vari passaggi che integra modelli informativi (BIM), protocolli di misura, app mobili per l'auto-ispezione e contenuti di auto-istruzione per gli operatori in cantiere. In termini di gestione, il flusso si riconduce al ciclo (O)PDCA: osservare, pianificare, fare, controllare, agire/aggiustare⁵.

Tre principi guidano la metodologia:

1. “Prevenire prima di correggere”, ovvero spostare i controlli di qualità a monte, prima che gli elementi vengano chiusi o coperti, così da intercettare gli errori quando sono ancora visibili, economici e rapidi da risolvere. In pratica: si verifica la geometria (quote, planarità, allineamenti), la qualità dei giunti (continuità, tenuta all'aria/acqua) e le predisposizioni impiantistiche (tracciati, passaggi e asole) prima delle finiture. Questo approccio evita demolizioni, rilavorazioni e slittamenti di programma tipici delle correzioni “a posteriori”, quando il difetto è ormai nascosto dal rivestimento.
2. “Misurare ciò che conta”, cioè scegliere strumenti di misurazione certificati e adeguati in base al KPI da validare, così che ogni misura produca un'evidenza utile per l'accettazione del lavoro o, al contrario, per un intervento correttivo immediato. A tale scopo gli strumenti sono selezionati in funzione dei KPI: trasmittanza e ponti termici (termografia e flussimetria), tenuta all'aria (pressurizzazione e ultrasuoni), isolamento acustico (mappa d'intensità e prove di facciata), discrepanze geometriche (laser-scanner/nuvole di punti), umidità (rilievo 3D dell'indice di riflettanza).
3. “Integrare dati e decisioni”, ovvero far confluire ogni misura e riscontro di cantiere in una dorsale digitale che collega persone, strumenti e modello informativo, così che le verifiche generino subito istruzioni operative, aggiornino i cruscotti di progetto e alimentino il dossier di qualità *as-built*.

Nel dettaglio, la metodologia si articola in otto fasi principali, ciascuna dedicata a implementare specifiche attività di controllo e istruzione autogestite. Le otto fasi non sono segmenti isolati, ma parte di un'unica catena di valore volta a ridurre difetti, tempi e scostamenti prestazionali tra progetto e opera finita.

La metodologia proposta è intrinsecamente versatile e applicabile a scenari operativi differenti, dalla nuova costruzione alla manutenzione programmata, fino ai cantieri di ristrutturazione profonda di edifici esistenti.

In ogni contesto, l'approccio mira a coinvolgere proattivamente tutti gli attori nel controllo qualità (anche attraverso forme di *self-inspection*), superando la tradizionale separazione tra chi realizza e chi verifica. Il risultato atteso è un aumento complessivo dell'affidabilità del processo edilizio e della conformità dell'opera ai requisiti, grazie alla riduzione al minimo di errori, difetti esecutivi e non conformità lungo l'intero percorso realizzativo.

⁵ Introdotto nel Capitolo 6.

Nella parte che segue sono descritte nel dettaglio le otto fasi della metodologia INSITER.

Fase 1 – Mappatura iniziale (osservare)

Il percorso si apre con la mappatura del sito e dell'edificio, finalizzata a definire un inventario dello stato tecnico pre-intervento dell'edificio (in caso di riqualificazione) o del sito (in caso di nuova costruzione).

Nell'attuazione di questa fase ci si può avvalere di software per l'auto-ispezione e procedere a rilievi geometrici (stazioni totali, laser-scanner, fotogrammetria), a sopralluoghi dedicati alla sicurezza e alla logistica, nonché alla valutazione dello stato degli impianti esistenti e dell'eventuale presenza di vincoli.

L'esito consiste in una valutazione completa delle condizioni esistenti (*as-is*), che comprende sia gli aspetti tecnici sia, in caso di riqualificazione, il valore immobiliare dell'edificio. Si ottiene così un quadro *as-is* confrontabile con i requisiti e con il modello di riferimento. In questa fase si gettano inoltre le basi per l'analisi delle difformità (linee, piani, quote, ecc.) e per la selezione mirata dei KPI da monitorare.

Sul piano operativo, mappare significa anche verificare che le aree di lavoro siano pronte (pulizia, assenza di materiali pericolosi), che i riferimenti altimetrici e planimetrici siano stabili e che i dati *as-is* dialoghino correttamente con i modelli IFC già elaborati o disponibili.

A questa fase partecipano attivamente occupanti, proprietari, consulenti tecnici e ispettori, così da ottenere un quadro iniziale condiviso delle condizioni di partenza.

Fase 2 – Controllo componenti

In questa fase l'auto-ispezione si estende alla fornitura, alla produzione e alla consegna dei componenti, con l'obiettivo di garantire la qualità già prima del loro arrivo in cantiere.

Il processo prende avvio dalla prequalifica di fornitori e materiali, effettuata sulla base di criteri condivisi (qualità certificata, prestazioni energetiche dichiarate, conformità documentale). I metadati dei produttori e la relativa documentazione vengono integrati nel modello informativo e nel *Common Data Environment* del progetto (*SharePoint* configurato con interfaccia CMIS), così da assicurare coerenza, tracciabilità e accesso controllato alle informazioni lungo l'intera catena di fornitura.

Le verifiche si svolgono in stabilimento e in fase di pre-consegna: i componenti sono identificati univocamente, collegati al loro GUID (*Globally Unique Identifier*) di modello e corredati da checklist, istruzioni e certificati fruibili in mobilità. La scansione del codice QR sul componente consente di

richiamare l'elemento corrispondente nel BIM, di verificarne la posizione e le caratteristiche pianificate e di accedere a tutti i contenuti correlati (documenti, immagini, video), creando al contempo un inventario digitale dei prefabbricati spediti e ricevuti. Questo meccanismo supporta il controllo qualità lungo l'intero ciclo di vita del componente, dalla prefabbricazione al posizionamento in opera, fino alla manutenzione.

La funzione di scansione QR abilita inoltre il controllo in accettazione di moduli e materiali, con report immediati su eventuali non conformità e sulla completezza delle forniture. Il presidio anticipato in fabbrica riduce incertezza e tempi delle ispezioni in opera. Le attività svolte in stabilimento tengono conto delle condizioni operative reali (variabilità ambientale, logistica, movimentazioni), con raccomandazioni su set-up, calibrazione e fattori critici, al fine di garantire ripetibilità e affidabilità delle prove prima della spedizione. Ciò produce benefici tangibili in termini di tempi, costi e gestione del controllo in cantiere.

Il risultato è una significativa riduzione delle non conformità a valle e una semplificazione delle ispezioni in sito, poiché i problemi più rilevanti vengono intercettati e risolti prima ancora di varcare i cancelli del cantiere.

Fase 3 – BIM on-site (pianificare)

In questa fase si costruisce il gemello informativo operativo dell'edificio – nuovo o esistente oggetto di retrofit – mediante un modello capace di rappresentare in modo affidabile i componenti edilizi e i sistemi impiantistici critici per qualità e prestazioni.

Il modello è sviluppato su standard aperti per massima interoperabilità (IFC) e costituisce la base unica di pianificazione e controllo per tutti gli attori, in coerenza con le scelte orientate all'*openBIM*. Il BIM “per l'uso in cantiere” non è un semplice modello di progetto, ma un BIM snellito e contestualizzato: alleggerito per l'impiego su tablet/visori, arricchito con attributi utili al montaggio (sequenze, tolleranze, pesi, punti di presa) e ottimizzato per la visualizzazione web anche di modelli molto complessi, grazie a *rendering server-side*, così da garantire fluidità d'uso in mobilità. A supporto, INSITER ha selezionato un set di applicazioni interoperabili: *Instant3Dhub*⁶ per la visualizzazione di grandi geometrie, *Desite MD*⁷ per interrogazioni e script, *RE Suite* per contenuti istruttivi e *decision support, Synchro PRO*⁸ per la pianificazione 4D.

⁶ Piattaforma di visualizzazione e streaming di modelli 3D complessi e di grandi dimensioni, sviluppata da Threedu GmbH, Karlsruhe.

⁷ Software BIM per modellazione, interrogazioni e script, sviluppato da Thinkproject/FocusBIM.

⁸ Software di pianificazione 4D per la costruzione, sviluppato da Bentley Systems.

La qualità del modello è verificata prima dell'impiego attraverso controlli *rule-based* sugli attributi, verifiche geometriche (chiusura dei solidi, coerenza con livelli/ambienti, contatto fra elementi) e report corredati da evidenze grafiche ed elenchi, utili a risolvere le criticità che ostacolerebbero i *workflow* a valle. Dove necessario, viene eseguita una deviazione geometrica tra modello e nuvola di punti per garantire la precisione richiesta dall'*overlay* in realtà aumentata AR. La pianificazione 4D integra tempi e modello: le sequenze vengono validate *off-site* con simulazioni e animazioni, per poi essere distribuite *on-site* come “istruzioni temporali” per i lavoratori. In questo modo, il *Work Break-down Structure* (WBS) rimane allineato agli oggetti IFC, evitando perdite d'informazione tipiche dei piani separati. In parallelo, la stima dei costi è collegata alle quantità IFC, con la raccomandazione di curare la qualità dei dati di computo fin dalle fasi iniziali.

Il *model checking* include anche la *clash detection* coordinata: i conflitti geometrici vengono identificati e trasformati in *issue* tracciate, con output pronti ad alimentare le fasi successive di istruzione/AR e di coordinamento interdisciplinare.

L'intero flusso è incardinato in un CDE in cui i modelli e gli IFC risiedono su un open source BIM server; i documenti statici e i contenuti istruttivi/checklist sono gestiti in *SharePoint* con interfaccia CMIS; i dati dinamici risiedono in un database dedicato. Questa dorsale consente versionamento, accessi profilati per ruolo e collegamenti puntuali tra oggetti BIM e contenuti (istruzioni, misure, KPI).

Gli output della Fase 3 alimentano direttamente le fasi successive. Ad esempio, i pacchetti IFC sono predisposti per l'integrazione in AR/MR (vedi Step 4), le viste e i filtri vengono utilizzati per implementare le sequenze di auto-istruzione (Step 6), e i riferimenti oggetto-GUID sono impiegati per le attività di auto-ispezione e verifica finale (Step 7-8).

Infine, per gli edifici esistenti, la Fase 3 integra rilievi 3D e modellazione da nuvola di punti (anche per gli impianti), riducendo tempi e costi di modellazione e assicurando che il gemello informativo rifletta lo stato reale *as-is*, prerequisito sia per un *overlay* AR accurato quanto per una pianificazione 4D affidabile.

Fase 4 – Auto-istruzione e AR/MR

In questa fase il modello BIM viene convertito in contenuti di realtà aumentata e mista (AR/MR) a supporto diretto delle attività in cantiere. Parti selezionate dell'IFC sono caricate nelle applicazioni AR/MR, allineate in sito e rese interrogabili, così che gli operatori possano sovrapporre il modello 3D alla realtà, seguire istruzioni passo-passo e confrontare lo stato reale con quello previsto, registrando contestualmente le verifiche eseguite.

La metodologia INSITER formalizza questo passaggio come *BIM-based AR* e lo connette agli step successivi di auto-istruzione e auto-ispezione, rendendo il flusso progettazione-cantiere realmente bidirezionale.

La produzione dei contenuti avviene a partire da oggetti informativi incorporati o collegati al modello: le istruzioni possono essere inserite direttamente nel BIM, generate a partire dai suoi dati (sequenze, tolleranze, punti di controllo), organizzate come oggetti dettagliati di libreria o connesse tramite classificazioni. Una volta pubblicate, esse diventano *step-by-step instructions* che l'operatore richiama sul campo da smartphone, tablet o visori AR. Questo approccio costituisce la base del percorso formativo INSITER, articolato per livelli fino all'impiego dell'AR per l'auto-istruzione *on-site*.

Le applicazioni AR/MR sviluppate in INSITER includono: la *BIM AR Vision App* per la visualizzazione di modelli complessi con dati di pianificazione e misura; la *HoloLens BIM-based Mixed Reality App*⁹ per valutazioni dettagliate e confronto virtuale/reale; e una *Self-Instruction AR App* per la guida operativa su impianti e componenti. Nelle dimostrazioni sul caso “Hogekamp” di Enschede nei Paesi Bassi (vedi sezione successiva), l'AR ha reso visibili percorsi impiantistici “nascosti”, guidato il posizionamento e supportato la verifica di conformità direttamente *in situ*, con accesso ai contenuti e ai dati referenziati nel *repository* INSITER (*SharePoint*).

Il collegamento con le misure è nativo: termografie, mappe di perdita d'aria, dati acustici e altri esiti strumentali sono importati nell'ecosistema INSITER e visualizzati come livelli informativi collegati agli oggetti BIM, fino alla loro rappresentazione in AR per spiegare “perché” una posa o una stratigrafia debbano essere eseguite in un certo modo e per documentare l'esito del controllo.

Quando necessario, l'AR integra anche la simulazione 4D dei processi di montaggio: il *workflow* INSITER prevede concetti di riconoscimento di oggetti reali o di marker dedicati, la sovrapposizione della sequenza costruttiva e l'accesso a metadati e documentazione associati agli elementi BIM, con particolare efficacia per l'installazione e la manutenzione di sistemi impiantistici.

L'adozione è guidata dal principio “strumento giusto per il compito”: per attività semplici (ad esempio, l'applicazione di nastri per la tenuta all'aria) una tavola 2D può risultare sufficiente, mentre per assemblaggi complessi e per il coordinamento impiantistico l'uso dell'AR/MR offre un chiaro beneficio in termini di riduzione degli errori, dei tempi e delle rilavorazioni.

La Fase 4 si fonda sul CDE INSITER per versionamento e tracciabilità: i contenuti AR derivano dal BIM *on-site* validato (Fase 3), riportano in tempo

⁹ App di realtà mista per la visualizzazione di modelli BIM (Microsoft).

reale evidenze e misure e alimentano direttamente i passaggi di auto-istruzione (Fase 6) e auto-ispezione (Fase 7), chiudendo il ciclo dati-azione-verifica in cantiere.

Fase 5 – Validazione virtuale e *clash detection*

In questa fase la qualità progettuale viene verificata preventivamente attraverso controlli digitali sul modello e simulazioni che consentono di anticipare problemi di coordinamento e di sequenza esecutiva. Il pacchetto INSITER combina attività di *model checking*, *clash detection* tra discipline e simulazioni 4D per validare la logica costruttiva e le strategie di montaggio prima dell'avvio in opera, riducendo gli errori latenti che altrimenti emergerebbero solo in fase di collaudo.

Le verifiche 4D includono controlli di compatibilità tra WBS e BIM, la completezza dei collegamenti attività-oggetti e la coerenza delle dipendenze temporali. I report evidenziano incongruenze e propongono adeguamenti al piano lavori e/o al modello, in modo che le istruzioni temporali distribuite in cantiere risultino realistiche e immediatamente azionabili.

La *clash detection* è eseguita *off-site* dal *BIM Manager* con *Navisworks Manage*¹⁰, supportata da due estensioni INSITER: il *Design Coordination Analyzer* (DCA)¹¹, che genera automaticamente i *clash batch* tra trade e guida l'utente nel set-up, e il *Design Coordination System* (DCS), piattaforma web per coordinare le interferenze identificate, assegnare responsabilità, fissare scadenze, registrare le azioni intraprese e produrre report per riunioni di coordinamento o per la Direzione Lavori. Questo flusso struttura i ruoli (*Designer*, *Clash Detection Expert*, *Design Coordinator*¹²) e rende tracciabile l'intero processo di risoluzione dei conflitti, dal rilievo del problema fino alla chiusura con nota di completamento.

Quando il numero di conflitti è elevato, INSITER adotta accorgimenti pratici per mantenere l'analisi efficace: lo *split* del modello IFC sull'area di interesse e la definizione di una Clash Matrix che esplicita trade confrontati, tolleranze, regole (*hard* o *conservative*) ed eccezioni. Gli esiti vengono quindi trasferiti nel DCS per l'assegnazione e il *follow-up*. I conflitti che non è conveniente risolvere con una nuova iterazione di progetto sono marcati "On Site" e trasformati in *clash cubes*: piccoli oggetti IFC contenenti le informazioni di coordinamento (responsabile, compiti, note, scadenza) da inoltrare agli strumenti *on-site*, inclusa l'AR, così da istruire la squadra sulla gestione della situazione in campo.

¹⁰ Software per coordinamento, *clash detection* e revisione modelli BIM (Autodesk).

¹¹ Assimilabile al *BIM Coordinator/BIM Manager* del Capitolo 2.

¹² Assimilabili rispettivamente a Progettista, *BIM Coordinator* e Progettista coordinatore del Capitolo 2.

La validazione virtuale si estende anche al confronto con lo *as-is*: rilievi 3D e nuvole di punti permettono di verificare la compatibilità tra stato di fatto e stato di progetto, identificando scostamenti geometrici e potenziali interferenze prima del montaggio o della riqualificazione.

Operativamente, questa fase funge da “cerniera” con quelle successive: i risultati coordinati nel DCS generano pacchetti informativi per l’auto-istruzione (sequenze e viste filtrate), per l’AR/MR (allineamento e sovrapposizione dei *clash cubes* e dei layer informativi) e per l’auto-ispezione (checklist mirate alle criticità individuate). In caso di errori o incompatibilità, la metodologia prevede l’attivazione di protocolli di auto-ispezione specifici: la discrepanza viene qualificata (design, modellazione, *on-site*, ignorabile), la responsabilità assegnata al soggetto competente (progettista, modellatore, impresa, fornitore), definite le contromisure e le relative scadenze, tracciando l’intero ciclo fino alla chiusura. Quando necessario, le informazioni sono inoltrate al produttore per la revisione del componente e la proposta di rimedio.

Infine, la validazione virtuale non si limita alle interferenze geometriche: il modello diventa un banco di prova per simulazioni di processo e per l’ottimizzazione delle sequenze, fornendo una base condivisa per decisioni su tempi, costi e qualità.

Fase 6 – Preparazione del sito e logistica

In questa fase la preparazione del cantiere diventa un’attività *data-driven*: il modello BIM del sito viene aggiornato con le condizioni effettive rilevate (aree operative e di stoccaggio, vie di accesso, appoggi gru, interferenze e vincoli temporanei), così che i piani di montaggio riflettano la realtà e le squadre trovino un contesto “entro tolleranza” fin dal primo giorno.

Le linee guida INSITER raccomandano di collegare al modello anche informazioni territoriali (GPS/GIS, planimetrie e rilievi) e di impiegare checklist e *toolbox meeting* per la sicurezza e le istruzioni di montaggio, con particolare attenzione alla protezione dei moduli, alle modalità di sollevamento, posizionamento e ancoraggi, nonché alla definizione delle aree per carico/scarico e deposito temporaneo.

La logistica è orchestrata dal CDE mediante l’identificazione univoca dei componenti: alla consegna si esegue la scansione dei QR/barcode che traducono l’etichetta nel GUID dell’elemento, lo evidenziano nel modello e aprono i contenuti correlati (documenti, checklist, foto, video). In questo modo si crea un inventario digitale dei prefabbricati “check-in” sul sito, si verifica la corrispondenza con le spedizioni dalla fabbrica e si riduce il rischio di errori di collocazione o l’uso di elementi non conformi. L’analisi dei rischi legata allo *scanning* (connettività, etichette errate, cadute di servizio)

è prevista in fase di pianificazione, con misure di mitigazione pratiche (secondo dispositivo, controllo a quattro occhi in fabbrica, canali alternativi di trasferimento dati).

Il cronoprogramma viene raffinato integrando nel BIM i dati temporali e le dipendenze (4D) e, dove pertinente, anche le condizioni meteo previste che possono influire su sollevamenti, protezioni e tempi di posa. I contenuti di auto-istruzione vengono aggiornati di conseguenza, ad esempio fornendo indicazioni su come proteggere l'isolante in caso di pioggia o su come effettuare il montaggio in presenza di vento. Le simulazioni 4D, preparate *off-site* con *Synchro PRO* e distribuite *on-site* come "istruzioni temporali", consentono di prevenire sovrapposizioni di mestieri e colli di bottiglia logistici, mantenendo allineati WBS e oggetti IFC. In parallelo, le stime di costo collegate alle quantità IFC permettono di monitorare in tempo reale gli effetti delle scelte logistiche su tempi e budget.

I controlli geometrici sul sito sono anticipati per evitare rilavorazioni: ad esempio la verifica della soglia/fondazione rispetto al modello ideale è eseguita con rilievo laser 3D e confronto automatico, valutando la significatività degli scostamenti (dimensioni, allineamenti, planarità). Questi riscontri alimentano il modello *on-site*, regolano le quote degli staffaggi, la planarità dei piani di posa e predispongono i riferimenti necessari agli overlay AR delle fasi successive.

Operativamente, la Fase 6 funge da cerniera operativa tra pianificazione e posa: aggiorna il BIM con le condizioni reali del cantiere, orchestra la logistica *just-in-time* tramite inventario digitale e tracciabilità dei prefabbricati, ottimizza cronoprogramma e costi con 4D integrato e affina le istruzioni per le squadre alla luce dei rischi operativi. Il risultato è un allestimento "a prova di istruzioni", in cui ogni team riceve contenuti aggiornati e specifici prima di iniziare le lavorazioni, riducendo ritardi, interferenze e scarti già nelle prime giornate di montaggio.

Fase 7 – Auto-valutazione in opera

In questa fase l'assicurazione della qualità entra nel vivo: ogni attività di posa è accompagnata da auto-istruzioni e auto-ispezioni eseguite direttamente dalle maestranze, con riscontri registrati in tempo reale su dispositivi mobili e collegati agli oggetti BIM. Le checklist digitali guidano i lavoratori passo-passo (identificazione del componente tramite QR, requisiti da verificare, evidenze da raccogliere), mentre il capocantiere e i subappaltatori svolgono, a intervalli prestabiliti, una valutazione congiunta dello stato avanzamento qualità ("audit collaborativo"), così da decidere immediatamente eventuali azioni correttive. Tutto avviene nell'ecosistema INSITER: l'app *RE OnSite* per la raccolta in campo (foto con annotazioni, GPS, *timestamp*,

escalation) e *RE Construct* per il coordinamento del supervisore e la reportistica, con sincronizzazione tramite CDE/SharePoint.

Il principio operativo, già introdotto in precedenza, è “misurare ciò che conta” con frequenze e soglie definite nel piano qualità: la misura non è un rito formale, ma produce un esito confrontabile con KPI e limiti di accettazione già impostati nel sistema. Sul piano geometrico, vengono acquisite nuvole di punti con laser-scanner e confrontate con il BIM per ottenere mappe di scostamento su quote, planarità e allineamenti prima che i componenti vengano chiusi; gli esiti (*heat-map*, deviazioni) sono importati nel modello e resi immediatamente leggibili per la squadra.

Sul fronte termico, la prestazione dell'involucro viene verificata con una doppia strategia: misure quantitative della trasmittanza in opera (metodo HFM secondo UNI EN ISO 9869-1:2015) per componenti rappresentativi e termografia IR per lo screening rapido di discontinuità e ponti termici, con tecniche di elaborazione e *3D thermal mapping* sviluppate e validate sui *mock-up* INSITER. I risultati (mappe termiche, stime di U locale e localizzazione dei ponti) vengono collegati agli oggetti IFC e utilizzati per istruire immediatamente le correzioni di posa.

La tenuta all'aria è controllata su due livelli: prova di pressurizzazione dell'unità secondo UNI EN ISO 9972:2015 per il dato globale e mappatura spaziale delle perdite per la localizzazione puntuale. Per quest'ultima, INSITER ha ottimizzato l'impiego di sonde a ultrasuoni con tracciamento automatico della posizione (risoluzione fino a pochi millimetri), così da generare *leak maps* navigabili e riportarle nel BIM come livelli informativi. Questo metodo è complementare e distinto dalle tecniche acustiche: le perdite d'aria (*air-leakage*) non vanno confuse con i percorsi di trasmissione sonora (*sound-leakage*), che richiedono strumenti e frequenze diverse.

Per l'acustica dell'involucro, le squadre utilizzano sonde di intensità (ad esempio *SoundBrush*) e, ove necessario, array microfonic con *beamforming*: questi strumenti producono mappe d'intensità/pressione capaci di evidenziare punti deboli lungo giunti e attraversamenti; gli indicatori derivati (ad esempio mappe di prominenza spaziale) aiutano a decidere se intervenire prima della chiusura. Le campagne di laboratorio e su *mock-up* INSITER hanno definito tempi di misura, risoluzioni spaziali e procedure di esportazione dei dati in formati 3D per l'integrazione nel modello.

L'umidità e le discontinuità igrotermiche sono affrontate con approcci complementari: termografia qualitativa (UNI EN 13187:1999) per individuare pattern anomali e analisi del canale di riflettanza associato al rilievo 3D per mappare variazioni superficiali correlate a bagnature o a finiture. Le zone critiche vengono quindi indagate con prove mirate e le evidenze allegate al componente BIM interessato.

Tutte le misure confluiscono nel BIM e nel CDE con un *workflow* consolidato: i layer risultanti (termici, acustici, *leakage*, deviazioni geometriche) sono esportati e referenziati agli oggetti tramite GUID. INSITER fornisce anche plug-in e librerie per riportare in modo preciso i PLY/layer 2D-3D all'interno dell'ambiente di modellazione, così che il tecnico possa visualizzare sul modello le aree di intervento e documentare la chiusura della non conformità.

Un aspetto chiave della Fase 7 è la chiarezza delle regole decisionali. Le linee guida INSITER raccomandano di associare a ogni controllo: (i) il KPI di riferimento (ad esempio n_{50} , ΔU , deviazione geometrica, indice di intensità), (ii) una soglia di accettazione esplicita, (iii) un insieme di azioni “se/allora” (ripristina-riresta-registra). Quando la soglia non è rispettata, la non conformità viene assegnata al responsabile (impresa o fornitore o progettista, a seconda della causa), accompagnata da istruzioni di rimedio e da una scadenza. Concluso l'intervento, si esegue il re-test e si allegano le evidenze al dossier qualità. Questo ciclo breve evita che problemi latenti emergano al collaudo o in esercizio.

Dal punto di vista organizzativo, la *self-inspection* non sostituisce i controlli terzi, ma li prepara: le squadre verificano in autonomia i passaggi critici, il supervisore consolida quotidianamente i risultati e, quando necessario, attiva un audit congiunto con progettisti e fornitori.

In sintesi, la Fase 7 trasforma la qualità in una pratica quotidiana di cantiere: le squadre misurano ciò che conta con strumenti calibrati sul KPI, registrano e condividono i risultati in un ambiente informativo unico e chiudono rapidamente le non conformità con azioni guidate e verifiche di ritorno. La combinazione tra misure *on-site* (termiche, acustiche, tenuta, geometria, umidità), checklist digitali e collegamento nativo al BIM costituisce la leva per ridurre errori e rilavorazioni, allineare il “costruito” al “progettato” e predisporre un dossier di qualità tracciabile per la Fase 8 di chiusura.

Fase 8 – Pre-collaudo e consegna

In questa fase conclusiva l'attenzione si sposta dalla sola corretta esecuzione alla piena funzionalità dei sistemi e alla tracciabilità documentale dell'opera, attraverso un percorso che comprende *pre-commissioning*, *commissioning* e *handover* informato da BIM (vedi anche le “fasi del processo edilizio” descritte nel Capitolo 2).

L'obiettivo è duplice: verificare che ciascun componente e impianto operi entro le prestazioni di progetto e consolidare un *as-built* digitale che raccolga modifiche, evidenze di prova e manuali d'uso/manutenzione, così da minimizzare il divario tra progettato e consegnato. La metodologia INSITER formalizza questo passaggio come “controllo finale”: il confronto sistematico

tra stato *as-designed* e stato *as-built*, convalidato da misure e test, chiude il ciclo delle otto fasi e prepara l'avvio dell'esercizio dell'edificio.

Operativamente, i test di accettazione vengono pianificati e svolti prima e dopo la chiusura dei gusci e delle partizioni, includendo – a seconda dei casi – verifiche termo-fisiche dell'involucro (termografia su ponti termici e discontinuità, misure in opera della trasmittanza su campioni rappresentativi), prove di tenuta all'aria dell'unità edilizia e controlli funzionali su sistemi impiantistici. I casi dimostrativi documentano sequenze dettagliate quali: controllo dimensionale delle aperture e ricezione dei serramenti con checklist; verifica della posa (stabilità, ortogonalità, verticalità/planarità, sigillature); prova funzionale del serramento; e, in parallelo, cicli di misura su tenuta e isolamento acustico con esportazione delle mappe nel modello, ripetendo il test dopo eventuali correzioni fino all'accettazione finale. Questo schema, tracciato con report fotografici, coordinate e *timestamp*, alimenta direttamente l'aggiornamento dell'*as-built* e la chiusura delle non conformità.

Per gli impianti, il *commissioning* integra controlli documentali e prove prestazionali in sequenza: caricamento nel CDE delle schede tecniche e degli schemi 2D/3D, identificazione dei componenti con QR/barcode collegati al BIM, ispezione di ricezione, test geometrici, termici e di pressione e, infine, accettazione o rigetto motivato della fornitura/installazione.

Un elemento distintivo di INSITER nello step di pre-collauda e consegna è la gestione proattiva delle discrepanze e la loro tracciabilità fino all'origine: quando un test fallisce, la non conformità viene qualificata (di progetto, di modellazione, di fornitura, di posa), assegnata al responsabile, corretta secondo istruzioni e nuovamente verificata. I casi in cui non convenga intervenire in progetto sono codificati per la gestione *on-site* e trasformati in pacchetti informativi per le squadre, così da evitare ritardi al collaudo. Questo approccio “chiudi-il-cerchio” – misurare, decidere, correggere, ritestare – è stato applicato sia su elementi di involucro sia su impianti, riducendo il rischio di problematiche che potrebbero emergere in esercizio.

La consegna non è solo formale: INSITER struttura un dossier di qualità e un *as-built* informativo utili a proprietari, gestori e, quando opportuno, agli occupanti. Le raccomandazioni per la standardizzazione indicano che il patrimonio di informazioni accumulato lungo le otto fasi – disegni, materiali, modalità d'installazione e prove eseguite – costituisce una base solida per il *building dossier* richiesto dalla normativa sulla garanzia della qualità, con l'avvertenza che i contenuti siano estratti e normalizzati per utenti non esperti e mantenuti aggiornati nel tempo. Questo produce vantaggi concreti: riduce il *performance gap*, mitiga i rischi per l'appaltatore e crea le condizioni per un avvio d'esercizio e una manutenzione più efficaci.

Infine, la fase di *handover* connette in modo diretto cantiere e gestione: l'*as-built* BIM, arricchito dai layer di misura e dalle evidenze delle verifiche, viene trasferito al committente come base per il *facility management* e per l'eventuale evoluzione verso un gemello digitale alimentato da dati in tempo reale.

7.3. Esempi e casi dimostrativi

L'applicazione sul campo della metodologia INSITER mostra con chiarezza che la qualità non è un esito finale, ma una filiera continua che connette in modo sistematico analisi, progettazione, approvvigionamento, cantierizzazione e posa in opera, auto-ispezioni e collaudi, rendendo tracciabili scelte e verifiche lungo tutto il processo. Questa impostazione è stata formalizzata nella metodologia INSITER che integra strumenti e dati per guidare lavoratori e tecnici nelle verifiche e nelle azioni correttive direttamente sul cantiere.

Per dimostrarne l'efficacia, nell'ambito della ricerca sono stati realizzati diversi dimostratori europei, nei quali la "catena" della qualità è stata resa visibile attraverso un set coordinato di strumenti: BIM come base informativa e di interoperabilità; realtà aumentata/mista per auto-istruzione e ispezione *on-site*; sensori e termocamere per la diagnostica; laser-scanner per i controlli geometrici; il tutto orchestrato da procedure di auto-ispezione e auto-istruzione sviluppate ad hoc e supportate da moduli formativi dedicati.

Nella parte che segue vengono descritti i principali casi dimostrativi che hanno costituito la base della ricerca INSITER, con un focus specifico sul caso più rappresentativo: l'edificio Hogeekamp dell'Università di Twente (Enschede, Paesi Bassi). Di questo intervento di riqualificazione profonda vengono presentati due esempi complementari di applicazione della metodologia: (i) l'ispezione in sito di facciate prefabbricate con confronto al modello BIM e l'individuazione dei ponti termici prima della consegna; (ii) l'installazione e il collaudo di sottosistemi impiantistici assistiti da applicazioni di realtà aumentata, finalizzati a ridurre interferenze e non conformità.

7.3.1. Health Centre a Colonia (Germania)

Nel caso dimostrativo dell'Health Centre di Colonia l'intervento ha previsto la sopraelevazione sull'edificio esistente, realizzata con pannelli prefabbricati di facciata montati su una struttura primaria in acciaio.

Il cantiere è stato pianificato con tempi stretti per ridurre al minimo disagi e rischi di infiltrazioni durante la rimozione e il ripristino delle impermeabilizzazioni. Per questo motivo è stata definita una sequenza di punti di controllo coerente con la metodologia INSITER, dalla verifica delle condizioni iniziali al controllo finale (ad esempio controllo dei componenti ordinati, uso del BIM in cantiere, generazione e impiego di AR, ispezioni e collaudi). In questo quadro, la compatibilità geometrica tra sottostruttura e nuovi pannelli è stata verificata *in progress*, così da prevenire errori cumulativi piuttosto che correggerli a posteriori.

L'identificazione dei componenti all'arrivo e il loro corretto posizionamento sono stati supportati da una funzione di scansione QR integrata nel *toolset* INSITER. Il codice applicato al pannello richiama il relativo elemento nel modello BIM e ne forniva in modo immediato le informazioni di installazione e le proprietà tecniche, offrendo al team di montaggio un riferimento univoco per quote e collocazione.

Durante la posa e le verifiche, la realtà aumentata è stata impiegata per guidare l'assemblaggio e valutare la coerenza tra stato di fatto e stato di progetto, con la possibilità di selezionare gli oggetti BIM direttamente in campo e accedere alla documentazione di dettaglio ospitata su *SharePoint*. Poiché l'avvio del cantiere ha subito dei ritardi, le prove AR previste per Colonia sono state eseguite e dimostrate anche in fabbrica e in ambiente controllato, mantenendo invariate le logiche operative successivamente trasferibili sul sito.

Prima della chiusura definitiva, i controlli geometrici sono stati condotti con rilievi 3D a laser-scanner e analisi delle deviazioni rispetto al modello di riferimento, così da verificare allineamenti, planarità e squadrature delle facciate. Nella comparazione *cross-case* dei dimostratori INSITER, Colonia rientra tra gli esempi di nuova costruzione/assemblaggio in cui lo *scanning as-built* ha consentito un controllo sistematico "entro tolleranza", riducendo il rischio di disallineamenti delle aperture e incoerenze localizzate nelle giunzioni dell'involucro. L'integrazione tra BIM, AR e *laser scanning* ha reso "visibile" la catena del controllo qualità e ha permesso di intervenire tempestivamente su eventuali scostamenti prima della sigillatura dei giunti.

Le evidenze di validazione e il confronto con gli stakeholder hanno confermato il valore di integrazione di strumenti come QR code, AR e rilievi 3D che, se orchestrati entro procedure di auto-ispezione, aumentano la tracciabilità della qualità, agevolano decisioni rapide in cantiere e migliorano la consegna dell'*as-built*. In particolare, per gli operatori e i gestori, la combinazione di auto-istruzione/auto-ispezione e identificazione univoca dei componenti garantisce un controllo più affidabile della conformità e una documentazione più accessibile.



Fig. 7.1 – Stato pre-intervento del caso studio Health Centre a Colonia in Germania (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.2 – Prospetti del caso studio Health Centre a Colonia in Germania. In verde le sopraelevazioni in copertura (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.3 – Simulazione di montaggio, in realtà virtuale, della sopraelevazione del caso studio Health Centre a Colonia in Germania (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

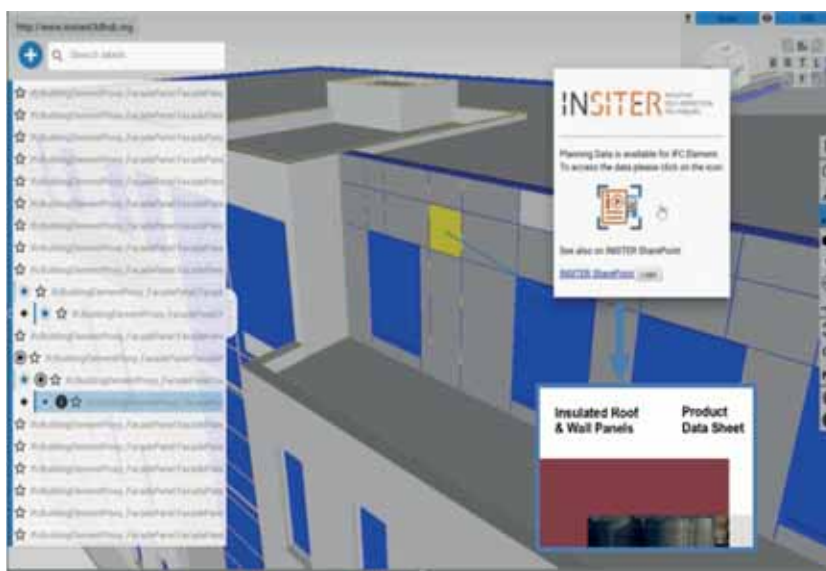


Fig. 7.4 – Selezione esemplare in realtà aumentata di elementi BIM per l'angolazione degli elementi di facciata nel caso studio Health Centre a Colonia in Germania (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

7.3.2. Edificio di ricerca CARTIF-3 a Valladolid (Spagna)

Nel caso dimostrativo CARTIF-3, localizzato a Valladolid, l'attenzione si è concentrata sugli impianti come “prima linea” della qualità in esercizio. L'edificio, un centro di ricerca prefabbricato a energia quasi zero con 4.075 m² di superficie utile, ospita uffici e aree per prove in scala reale. Pur con consumi inferiori a 60 kWh/m²a e valori di trasmittanza contenuti (ad esempio U compresa tra 0,45-0,47 W/m²K in facciata), le indagini iniziali hanno evidenziato difetti tipici della fase realizzativa: ponti termici localizzati, insufficiente isolamento in porzioni dell'involucro industriale, errori di posa nelle reti di distribuzione, comfort non sempre adeguato e surriscaldamenti estivi. La scelta metodologica è stata quindi di porre gli impianti al centro del controllo qualità, collegando ogni verifica alle prestazioni attese e alle condizioni d'uso reali.

Il percorso operativo ha preso avvio dalla ricostruzione del modello informativo aggiornato, usato come base per la progettazione degli interventi e per le simulazioni di fabbisogno, affiancato da misure strumentali (termografia, rilievi laser, monitoraggi) per descrivere lo “stato di fatto” e per validare le soluzioni dopo l'esecuzione.

La qualità del modello è stata assicurata mediante procedure di validazione e verifica delle interferenze tra componenti, passaggi e strutture, con produzione di report puntuali prima dell'adozione degli strumenti di cantiere. Questo ha permesso di prevenire conflitti tra reti e strutture e di rendere tracciabili le scelte correttive prima della posa definitiva.

Nei controlli in sito, il rilievo tridimensionale ha avuto un ruolo chiave: la nuvola di punti, registrata e orientata, è stata confrontata con la geometria di progetto per misurare scostamenti e verificare allineamenti e raggi di curvatura lungo le dorsali.

La stessa tecnologia, grazie alla correzione della riflettanza in funzione di distanza e angolo di incidenza, ha permesso di individuare fenomeni di umidità e dispersioni localizzate nelle reti (come la perdita di vapore su una curva di una tubazione di climatizzazione), portando l'attenzione sulle cause fisiche prima che i difetti si manifestassero come malfunzionamenti in esercizio.

Nel confronto trasversale tra i dimostratori INSITER, CARTIF-3 è citato come esempio di “validazione costruttiva” con laser-scanner, mentre Colonia rappresenta il caso di nuova costruzione: insieme mostrano come il controllo geometrico sistematico sia decisivo per la qualità finale.



Fig. 7.5 – Caso studio CARTIF-3 a Boecillo's Technology Park a Valladolid in Spagna (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.6 – Scansione laser 3D del caso studio spagnolo CARTIF-3 (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

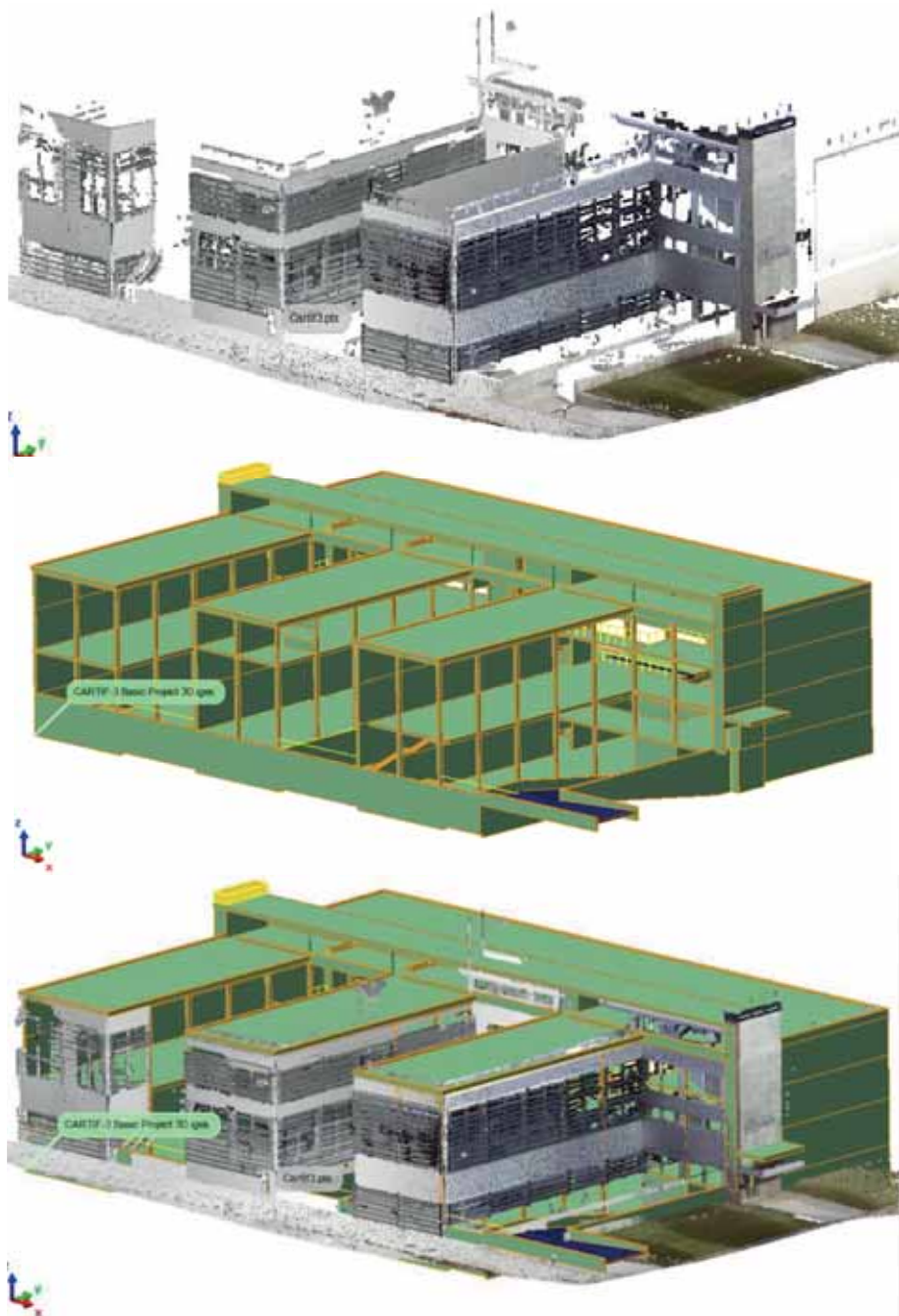


Fig. 7.7 – Dalla nuvola di punti alla sovrapposizione del modello BIM per riscontrare discrepanze geometriche nel caso studio CARTIF-3 (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

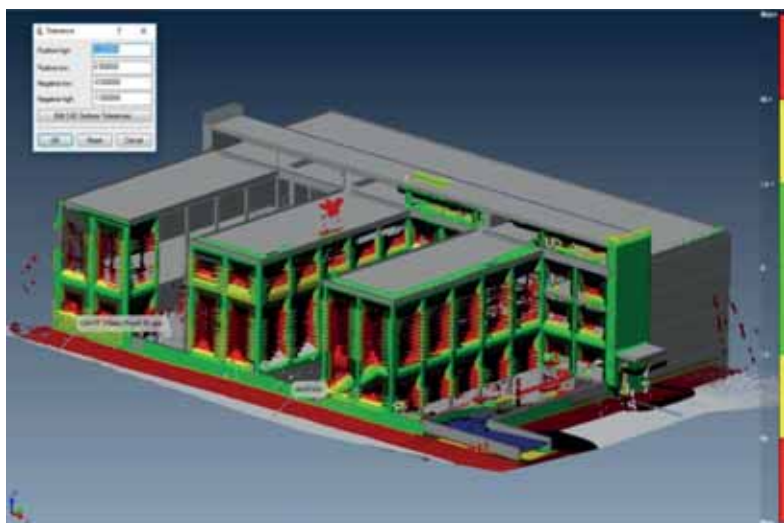


Fig. 7.8 – Mappa delle deviazioni in base alle tolleranze di progetto stimate ($H_i \pm 1,0$ m; $Lo \pm 0,5$ m; $Lo = -0,5$ m; $Hi = -1,0$ m). In verde, tolleranza considerata adeguata; in giallo, tolleranza ammissibile; in rosso, tolleranza inadeguata (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

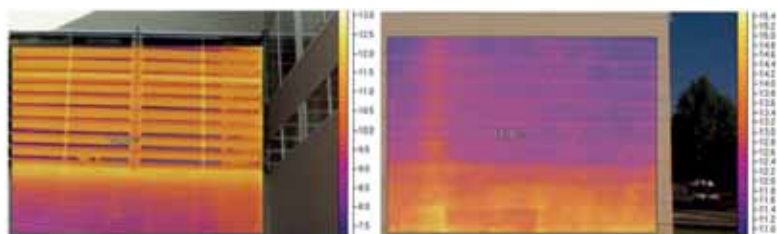


Fig. 7.9 – Prestazioni termiche dell'edificio controllate in sito con termografia (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

La messa in servizio e il controllo in esercizio sono stati affrontati, tra l'altro, sul sottosistema solare termico già presente: le informazioni tecniche e le istruzioni operative sono state rese disponibili in modo strutturato, sono state eseguite prove di tenuta e verifiche termografiche ed è stato impostato un sistema di indicatori con soglie e regole di allarme per valutare scostamenti tra funzionamento reale e atteso. Questo approccio integra collaudo e “sorveglianza continua”, collegando dati dinamici di monitoraggio a criteri di accettazione e a rapide azioni correttive.

Nel complesso, l'esperienza di Valladolid conferma la logica INSITER: gli errori di posa degli impianti tendono ad amplificarsi nel tempo se non

intercettati nelle fasi di assemblaggio e nelle verifiche prestazionali intermedie. L'integrazione fra modello informativo, verifica delle interferenze, rilievi 3D e misure termiche consente di anticipare le non conformità e di circoscriverne gli effetti, con benefici tangibili su qualità, comfort e affidabilità del sistema edificio-impianto.

7.3.3. Istituto “Concetto Marchesi” a Pisa (Italia)

Nel caso dell'Istituto “Concetto Marchesi” a Pisa, il lavoro è iniziato dalla ricostruzione accurata dello stato di fatto e dalla definizione delle priorità sugli elementi dell'involucro più esposti a dispersioni e degrado quali cap-potto, imbotti e soglie, coronamenti e punti di discontinuità con le strutture orizzontali.

Il percorso ha seguito due linee di indagine complementari: da un lato il rilievo geometrico e la modellazione informativa dell'edificio, con successiva analisi degli scostamenti tra misure e modello; dall'altro le verifiche termo-fisiche *in situ*, mirate a individuare dispersioni e potenziali ponti termici.



Fig. 7.10 – Vista aerea del caso studio italiano “Concetto Marchesi” a Pisa dopo gli interventi (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.11 – Fase di rilevamento con tecnologia laser-scanner 3D per ottenere la nuvola di punti e procedere con la modella BIM (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.12 – Foto della facciata est dell'edificio scattata durante le fasi di indagine (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

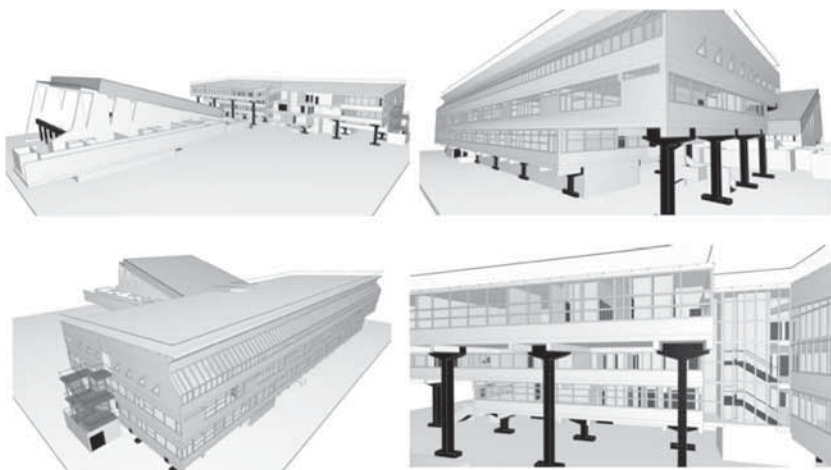


Fig. 7.13 – Dalla nuvola di punti al modello BIM del caso studio “Concetto Marchesi” a Pisa in Italia (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

Il rilievo con scanner laser ha consentito di ottenere una nuvola di punti ad alta densità e di generare un modello 3D informativo dell’edificio, utile per verificare planarità, allineamenti e tolleranze dei pannelli prefabbricati. La successiva analisi degli scostamenti tra nuvola e modello ha reso misurabili deformazioni locali e fuori piombo, guidando gli interventi correttivi e consentendo di attestare il rientro in tolleranza dopo la rettifica. Questa procedura – mappatura, modellazione e confronto metrico – è documentata nei rapporti INSITER come riferimento operativo per edifici esistenti, con indicazioni su livelli di dettaglio/accuratezza e sulla gestione dei punti ciechi del rilievo.

In parallelo, le indagini termografiche sono state ripetute per correlare i dettagli costruttivi alle prestazioni effettive dell’involucro. Le evidenze raccolte sottolineano l’importanza di operare con un gradiente termico minimo tra interno ed esterno: nel caso pisano, le misure eseguite in estate hanno risentito di un ΔT di circa $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, insufficiente per localizzare con affidabilità i ponti termici puntuali; per contro, in condizioni con ΔT intorno a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – come nel dimostrativo di Enschede –, l’individuazione dei difetti risulta netta. Quando il gradiente naturale non è disponibile, occorre quindi generarlo artificialmente per assicurare la leggibilità delle immagini all’infrarosso.

L’integrazione tra rilievo geometrico e termografia ha permesso di distinguere le anomalie a matrice prevalentemente geometrica – giunti fuori tolleranza, non conformità di planarità – da quelle dovute a discontinuità del pacchetto o carenze di tenuta all’aria.

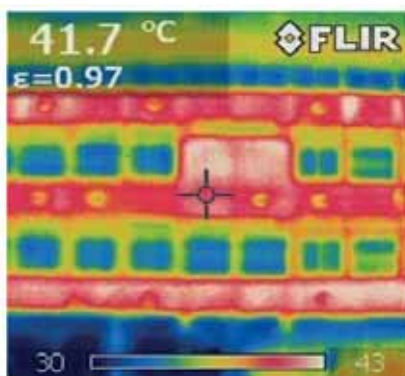


Fig. 7.14 – Analisi termografica del caso studio italiano “Concetto Marchesi” di Pisa (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

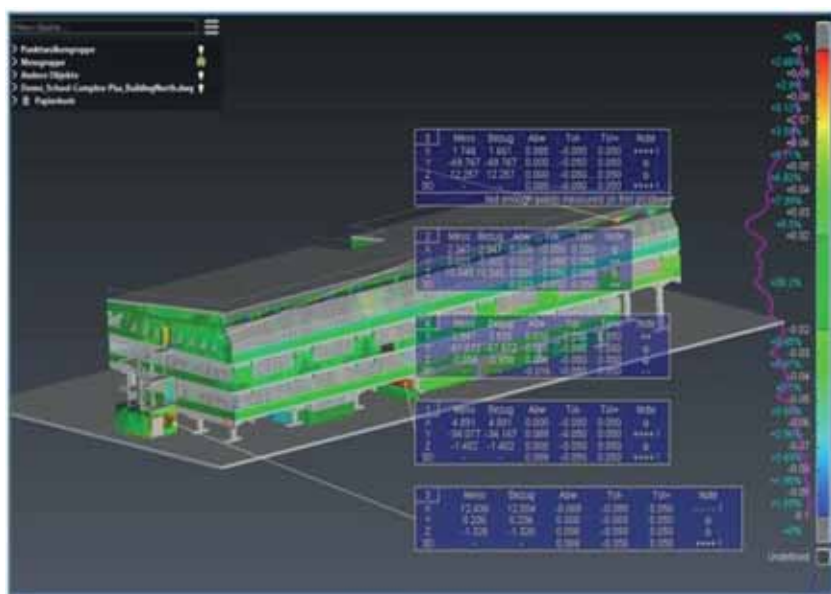


Fig. 7.15 – Analisi delle deviazioni geometriche del caso studio “Concetto Marchesi” condotte con il software 3DReshaper (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

Nel primo caso, la misura laser ha documentato l’efficacia degli aggiustamenti; nel secondo, la lettura termografica ha guidato il ripristino della continuità isolante e delle linee di tenuta, con registrazione delle non conformità e tracciabilità degli esiti all’interno del modello informativo e dei report di cantiere. L’insieme di queste attività ha prodotto un duplice beneficio: ridurre la probabilità di patologie (condensa interstiziale, muffe, degrado dei materiali) e chiudere il cerchio tra dettaglio esecutivo e posa reale, mettendo a sistema controllo geometrico e verifica prestazionale dell’involucro.

7.3.4. The Green Village a Delft (Paesi Bassi)

Nel caso di The Green Village a Delft la metodologia è stata messa alla prova non come “singolo cantiere”, ma come piattaforma di lavoro iterativa. Due prototipi modulari in legno – l’Office Lab (circa 250 m², 16 moduli, in uso quotidiano dal giugno 2017) e il Living Lab (4 moduli, abitato da studenti TU Delft da ottobre 2017) – hanno funzionato da banco di prova per verifiche ripetibili su più costruzioni, mantenendo costante l’impostazione di controllo qualità e variando applicazioni e contesto d’uso.

L'obiettivo era duplice: affinare gli strumenti INSITER durante lo sviluppo e dimostrarne la trasferibilità fra prototipi simili, collegando le osservazioni in opera ai modelli informativi e alle istruzioni operative.



Fig. 7.16 – Realizzazione dei moduli residenziali del caso studio Green Villages – Sustainer Homes a Delft (Olanda). Le immagini mostrano il trasporto e l'assemblaggio in sito di unità prefabbricate in legno ad alta efficienza energetica, installate con tecniche di costruzione off-site e rapid on-site deployment (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

La sperimentazione ha concentrato l'attenzione su alcuni passaggi chiave della catena dei controlli: la tenuta all'aria dell'involucro, la riconciliazione tra disegni e stato montato, e la scelta del “momento opportuno” per le ispezioni visive e strumentali.

Tre i casi d'uso cardine: confronto tra manuale di montaggio “a schemi” e realtà di cantiere; selezione delle finestre temporali più adatte alle verifiche; comparazione sistematica tra quanto progettato, prodotto e installato. Questa triangolazione ha consentito di standardizzare le istruzioni operative, di mettere a punto controlli mirati su giunti e nastrature e di documentare scarti e correzioni direttamente sul modello.

Dal punto di vista dei dati e dell'interoperabilità, il modello informativo (IFC) è stato strutturato per supportare istruzioni passo-passo e verifiche in sito. Per la tenuta all'aria, ad esempio, è emerso che per attività semplici possono bastare elaborati bidimensionali ben organizzati, mentre per fasi più complesse è preferibile affiancare contenuti interattivi su dispositivi portatili. Le informazioni raccolte in campo – controlli all'arrivo, montaggio, esiti delle prove – sono state caricate sulla piattaforma collaborativa e richiamate su applicazione mobile, rendendo tracciabile l'intero flusso: dal deposito del modulo alla chiusura dei giunti.

Il valore “di piattaforma” è emerso anche sul fronte della formazione e della riusabilità dei contenuti.



Fig. 7.17 – Esempio di situazioni in cui gli elementi non sono ancora connessi al 100% con evidenti problematiche di infiltrazioni di aria (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

La dimostrazione ha alimentato i moduli didattici a livelli progressivi (consapevolezza, uso di sistemi portatili avanzati, integrazione delle auto-istruzioni nel modello, impiego della realtà aumentata), nati per omogeneizzare linguaggi e pratiche tra operatori e imprese. In parallelo sono stati definiti un modello dati per condividere i protocolli di ispezione e un repertorio di errori documentati con foto e istruzioni sintetiche, pensati per essere richiamati in altri contesti e integrati anche in iniziative europee affini.

Sul piano tecnologico, The Green Village ha mostrato come collegare stabilmente misure e modello: il BIM “per cantiere” alimenta istruzioni e controlli; le verifiche d’interferenza (*clash*) e la visualizzazione guidata su dispositivi mobili fungono da ponte tra progettazione e montaggio; la realtà aumentata, sviluppata nel quadro INSITER, interviene nei passaggi a maggiore complessità. Questo disegno si basa su un framework di interoperabilità (IFC, visualizzatori, servizi) che abilita l’aggiornamento continuo dei contenuti e il loro riuso tra prototipi e dimostratori.

In sintesi, a Delft la metodologia INSITER è maturata come “ecosistema operativo”: istruzioni standardizzate, protocolli scambiabili, modelli aggiornati e misure riconciliate con il progetto hanno reso scalabile la qualità, con un ciclo rapido tra osservazione in sito, correzione e apprendimento.



Fig. 7.18 – Prova dell’utilizzo di sigillante ermetico prima della posa del rivestimento e finitura finale nel caso studio Green Villages – Sustainer Homes a Delft (Olanda) (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.19 – Il caso studio Green Villages – Sustainer Homes a Delft (Olanda) è stato testato per verificare la qualità di isolamento acustico. Il rumore ambientale è stato misurato all'interno e all'esterno dell'edificio per uffici collocando il trasmettitore sferico insieme al generatore di ultrasuoni vicino ai punti di controllo della tenuta all'aria (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.20 – Confronto tra il modello BIM e il cantiere dove la tenuta stagna della giunzione è stata verificata con il metodo a ultrasuoni e con un controllo visivo mediante rimozione del nastro verde (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

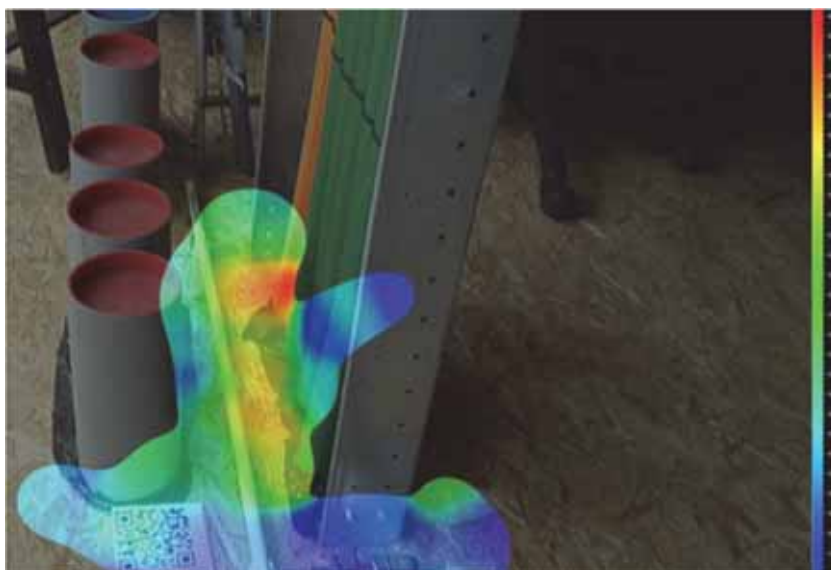
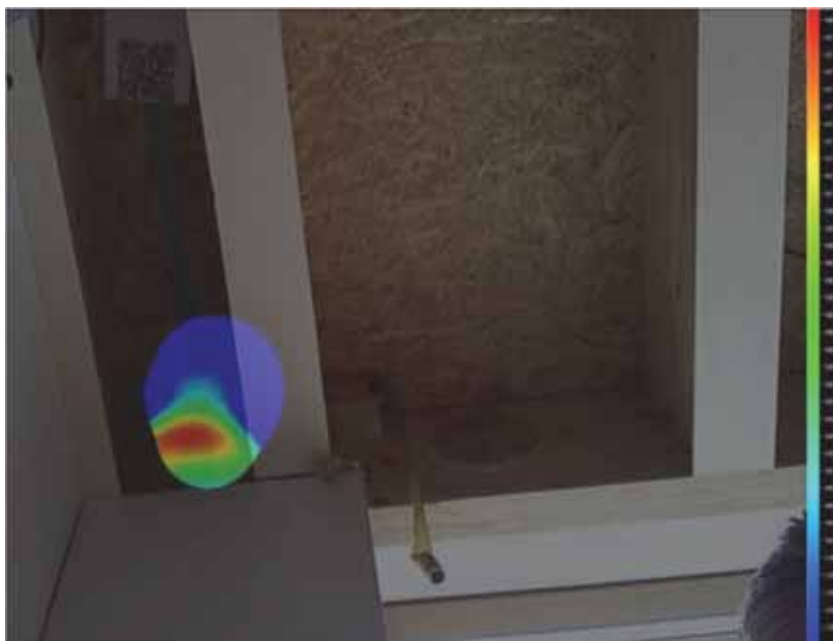


Fig. 7.21 – Test di misurazione ad ultrasuoni della tenuta all'aria delle giunzioni dei moduli. Nell'immagine superiore sul nodo di copertura e nell'immagine inferiore in corrispondenza dell'ingresso degli impianti sul solaio a terra (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

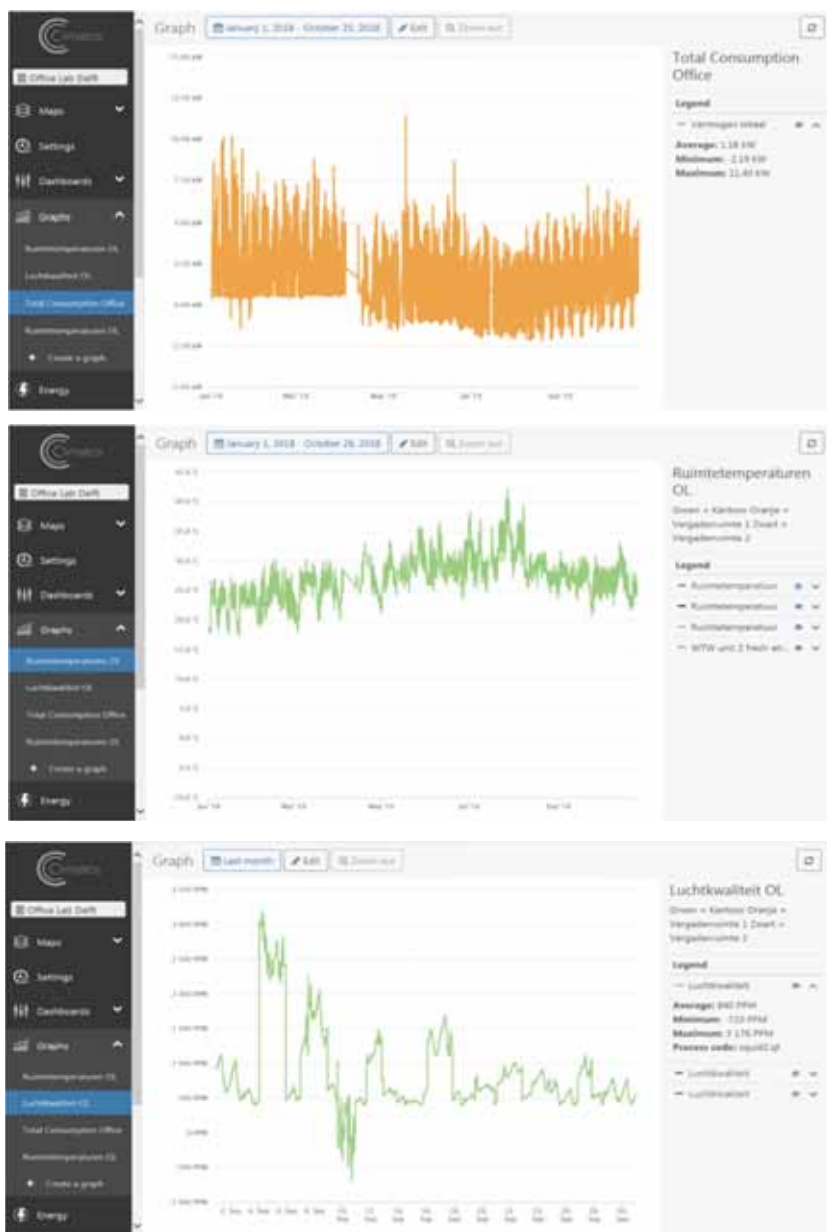


Fig. 7.22 – Assumendo a riferimento il Sustainer Homes Office del caso studio olandese, dall'alto al basso si riportano: il consumo energetico (kW), la temperatura ambientale (°C) e la qualità dell'aria (PPM) (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

7.3.5. Stabilimento prefabbricazione Dragados a Las Cabezas de San Juan (Spagna)

Nel contesto industriale dello stabilimento di prefabbricazione Dragados, la metodologia INSITER è stata utilizzata per rendere esplicito e tracciabile ciò che spesso avviene in modo implicito: definire procedure di controllo in uscita, pianificare prove a campione in fabbrica e alla consegna e collegare l'identità digitale di ciascun componente al modello informativo di commessa.

La catena dati è stata realizzata assegnando a ogni elemento un codice QR già nel BIM e utilizzandolo poi per identificazione, il richiamo di documenti di montaggio e la verifica della corretta collocazione. Lo stesso inventario dei pezzi “usciti” dalla fabbrica è stato confrontato con i componenti “entrati” in cantiere, così da chiudere il cerchio logistico e qualitativo. Questo flusso, integrato nella “verifica componenti” del modello a otto passi, ha reso più solida la conformità tra prodotto fabbricato, progetto e posa.

I protocolli di prova messi a punto nel pacchetto sperimentale hanno fornito una griglia oggettiva per legare soglie di accettazione e controlli alla funzione del componente: trasmittanza e ponti termici mediante termografia con cicli forzati; integrità strutturale di pannelli GRC con termografia attiva; tenuta all'aria con sonde ultrasoniche; prestazioni acustiche con array microfoni e sonde d'intensità; coerenza geometrica e tolleranze con rilievi e analisi degli scostamenti; oltre a regole per l'integrazione dei risultati nel modello (immagini, serie temporali, visualizzazioni cromatiche per valori).

Sul fronte dell'istruzione operativa, sono state testate applicazioni su dispositivi mobili e visori per supportare l'auto-istruzione in stabilimento: la visualizzazione del modello, i passi di assemblaggio e i controlli da effettuare sono stati resi disponibili agli operatori direttamente accanto al componente fisico. In parallelo, l'esperienza in fabbrica ha suggerito di definire soglie interne *off-site* più stringenti di quelle richieste dal committente – per esempio per i test acustici sui giunti tra moduli – così da avere un margine di sicurezza quando le prove regolamentate vengono ripetute in sito.

In questo quadro, “trattare i prefabbricati come privi di errori” non significa rinunciare al controllo, ma collocarlo dove è più efficace e meno costoso: prima della spedizione e al momento dell'arrivo, quando un difetto può essere corretto senza propagarsi in cantiere.

In sintesi, l'applicazione INSITER nello stabilimento Dragados mostra come l’“errore zero” debba essere inteso come un obiettivo di processo: identificazione univoca e tracciabilità dal BIM al pezzo reale, controlli termigrometrici, acustici e geometrici tarati sulle condizioni di fabbrica, auto-istruzione digitale per chi produce e monta. Questo spostamento a monte del

controllo riduce i costi di correzione e aumenta la probabilità che, una volta in cantiere, il componente si comporti come previsto, limitando i rischi di non conformità e ritardi.

7.3.6. Hogekamp, University of Twente a Enschede nei Paesi Bassi

Il caso dimostrativo più rappresentativo è la ristrutturazione profonda e la riqualificazione energetica di un edificio del campus dell'Università di Twente, costruito nel 1965 e riconvertito in residenza studentesca (circa 75% della superficie) e struttura ricettiva (una porzione pari a circa il 25% adibita a hotel).

Il progetto ha adottato soluzioni prefabbricate (nuova facciata, nuclei cucina/bagno, nuovi impianti) e ha applicato l'intero percorso delle otto fasi della metodologia INSITER.



Fig. 7.23 – Da sinistra immagine del caso studio olandese Hogekamp a Enschede, in Olanda, prima degli interventi (marzo 2009) e dopo la deep renovation (agosto 2022) (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.24 – A sinistra, lo stato dell'edificio durante la profonda ristrutturazione; a destra, lo stato nel corso della deep renovation rivelando lo smantellamento degli elementi esistenti della facciata, insieme alla conservazione della struttura in cemento armato (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

Le condizioni iniziali prima dell'intervento evidenziavano varie criticità: gli impianti tecnologici avevano ampiamente superato la vita utile e la facciata esterna risultava inefficiente dal punto di vista energetico. Le uniche parti preservate integralmente nella struttura esistente sono state il seminterrato in calcestruzzo, i solai in cemento armato prefabbricato e lo scheletro portante dell'edificio.

Le scelte progettuali per il retrofit si sono orientate sull'adozione di soluzioni prefabbricate *plug-and-play*, con l'obiettivo di minimizzare le lavorazioni *in situ* e assicurare standard di qualità elevati. In particolare, sono state implementate tre soluzioni principali:

1. installazione di un nuovo involucro edilizio prefabbricato ad alte prestazioni;
2. inserimento di unità modulari prefabbricate per bagni e cucine;
3. sostituzione completa dei sistemi MEP/HVAC con impianti efficienti di nuova generazione.

I lavori, comprensivi anche dello smantellamento dei vecchi elementi e delle necessarie bonifiche, sono iniziati nell'aprile 2017 e si sono conclusi entro la fine del 2018, confermando la rapidità esecutiva favorita dall'approccio *off-site*.



Fig. 7.25 – Modello BIM 3D di progetto del caso studio olandese Hogekamp a Enschede (Olanda) (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

Durante questo progetto pilota, la metodologia INSITER è stata applicata concentrando l'attenzione su due aspetti chiave della costruzione: da un lato la facciata prefabbricata (nuovo involucro), sottoposta a un'accurata ispezione post-installazione al fine di verificare allineamenti e prestazioni; dall'altro il sistema impiantistico (MEP-HVAC), per il quale è stato sperimentato l'uso della realtà aumentata a supporto dell'assemblaggio e del controllo di qualità in corso d'opera.

Facciata prefabbricata

L'auto-ispezione della nuova facciata prefabbricata è stata condotta per assicurare la corretta integrazione dei pannelli con la struttura esistente e la conformità alle prestazioni energetiche previste. L'obiettivo principale di questa dimostrazione era garantire che i componenti prefabbricati della facciata (pannelli e serramenti) fossero installati con la precisione necessaria a prevenire dispersioni energetiche. L'informazione risultava cruciale sia per l'impresa appaltatrice sia per la squadra di montaggio, poiché consentiva di individuare e correggere tempestivamente ponti termici o difetti di posa.

Per l'ispezione della facciata è stata seguita la sequenza di fasi definita dalla metodologia INSITER, adattata al contesto specifico.

In primo luogo, è stata condotta una valutazione preliminare delle condizioni pre-ristrutturazione, finalizzata a verificare l'adeguatezza della struttura portante esistente nel sostenere i nuovi pannelli di facciata e i serramenti (Fase 1). Successivamente, dopo l'auto-ispezione effettuata in stabilimento sui componenti (Fase 2), i pannelli prefabbricati sono stati consegnati e stoccati in cantiere, dove sono stati nuovamente identificati e controllati tramite scansione RFID o QR code. In questo modo è stato possibile recuperare dal BIM l'ID univoco di ciascun elemento e tracciarne l'arrivo. Durante il trasporto e la consegna, le maestranze coinvolte – sia il personale di produzione sia gli installatori in cantiere – avevano il compito di garantire l'integrità e la corrispondenza dei componenti consegnati rispetto a quelli previsti.

In parallelo, è stata completata la modellazione BIM dettagliata del progetto, comprensiva di tutti gli elementi di involucro e dei sistemi impiantistici rilevanti (Fase 3). Una porzione mirata del modello digitale, relativa in particolare alla facciata, è stata quindi caricata su tablet a disposizione del team di cantiere, così da mostrare agli operatori soltanto le parti effettivamente interessate dall'intervento.

Nella fase esecutiva, le istruzioni di montaggio sono state rese disponibili in realtà aumentata, attraverso un sistema AR basato sul modello BIM

(Fase 4), che ha consentito ai montatori di accedere direttamente sui loro dispositivi mobili a tutte le informazioni operative necessarie. In pratica, ogni installatore poteva visualizzare – tramite una app dedicata – la posizione esatta prevista per ciascun pannello o elemento, sovrapposta in AR alla struttura esistente, ricevendo contestualmente indicazioni passo-passo per l'assemblaggio (Fase 5). Questa modalità ha ridotto in modo significativo il rischio di errori di posa dovuti a interpretazioni non corrette dei disegni.

Durante tutta la fase di installazione è stato inoltre mantenuto un confronto visivo continuo tra lo stato di avanzamento reale e il modello digitale di riferimento, aggiornato in tempo reale sui tablet. Tale procedura ha permesso al capocantiere e ai tecnici di verificare immediatamente la correttezza di ogni elemento man mano che veniva installato, assicurando che la qualità del montaggio rimanesse costantemente allineata al piano approvato (Fase 6).

Completata l'installazione dei nuovi pannelli, è stata eseguita un'autoispezione finale della facciata (Fase 7) mediante strumenti di rilievo avanzati. In particolare, è stata effettuata una scansione combinata termografica e laser 3D dell'involucro installato. I dati raccolti – come la misura di eventuali fessure o gap millimetrici tra pannelli – sono stati confrontati con le tolleranze ammesse, al fine di stabilire se rientravano nei limiti accettabili. In caso contrario, sarebbero stati adottati correttivi per garantire la continuità della tenuta all'aria e all'acqua.

La termografia all'infrarosso ha evidenziato l'assenza di ponti termici significativi: le immagini termiche acquisite non hanno mostrato anomalie di dispersione, confermando la corretta esecuzione dell'integrazione tra i nuovi pannelli e la struttura esistente.

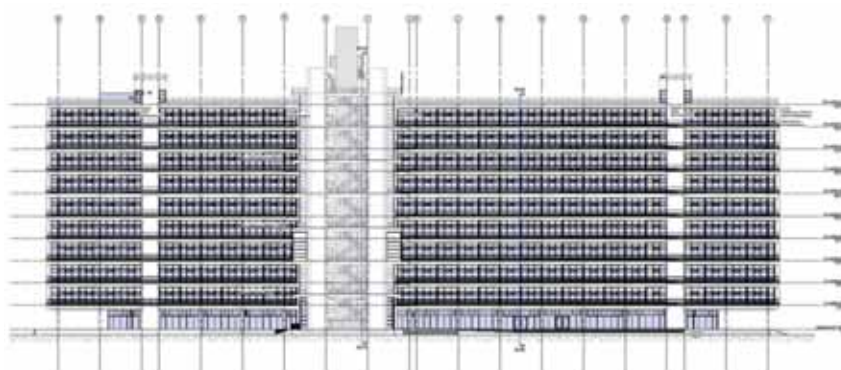


Fig. 7.26 – Prospetto di progetto del caso studio olandese Hogekamp a Enschede (Olanda) (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.27 – Ristrutturazione di un appartamento per studenti, interni al caso studio Hogeikamp a Enschede (Olanda), mediante l'installazione di nuovi componenti di facciata con tecnologie prefabbricate (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.28 – Comparazione visiva tra il modello BIM (a sinistra) e la situazione reale (a destra) del caso studio Hogeikamp a Enschede (Olanda) (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

La procedura INSITER adottata per valutare l'impatto dei ponti termici sull'involucro ha dunque validato l'efficacia dell'installazione e la conformità dell'opera ai requisiti prestazionali previsti. Questo esempio pratico di ispezione dell'involucro, condotto anche in ambienti pilota all'interno dell'edificio universitario di Twente, dimostra come l'applicazione combinata di rilievi digitali (laser-scanner) e indagini tradizionali (termografia) possa garantire un controllo qualità puntuale nelle fasi immediatamente successive al montaggio.

Sistemi MEP-HVAC

Il secondo caso di studio si concentra sull'installazione degli impianti meccanici e, in particolare, sulle potenzialità della realtà aumentata nel facilitare e controllare le operazioni di retrofit impiantistico.

I sistemi MEP-HVAC (*Mechanical, Electrical, Plumbing / Heating, Ventilation and Air Conditioning*) in edifici esistenti costituiscono spesso una sfida significativa per gli interventi di riqualificazione, a causa della distribuzione capillare di componenti attraverso locali tecnici, cavedi, controsoffitti e cavità murarie. Tuttavia, un approccio integrato e pianificato a questi

sistemi – soprattutto in contesti di ristrutturazioni profonde – può contribuire in maniera determinante al miglioramento dell’efficienza energetica complessiva dell’edificio.

Nel caso in esame, l’obiettivo della dimostrazione era mettere in atto un processo di progettazione e installazione altamente efficace per i nuovi impianti, sfruttando gli strumenti INSITER. L’enfasi è stata posta in particolare sulla verifica preventiva e in corso d’opera della precisione dei componenti MEP modellati in BIM e dei corrispondenti elementi prefabbricati di retrofit, al fine di ridurre al minimo la probabilità di errori durante la posa.

Analogamente al caso della facciata, anche per gli impianti la dimostrazione sul campo ha seguito le fasi della metodologia, adattandole al contesto impiantistico. In primo luogo, è stata condotta una valutazione pre-intervento (Fase 1) sugli impianti esistenti: sono state raccolte tutte le informazioni relative alle caratteristiche dell’edificio (tipologia, geometria, destinazione d’uso) e sono stati verificati i vincoli tecnici e normativi pertinenti per i nuovi sistemi HVAC, inclusi i requisiti obbligatori e gli standard di qualità ambientale interna (IEQ) da rispettare.

In seguito, si è proceduto al controllo dei componenti MEP consegnati in cantiere (Fase 2), analogamente a quanto fatto per i pannelli di facciata. Ogni componente prefabbricato è stato identificato e tracciato tramite scansione RFID/QR, collegando ciascun pezzo al relativo ID nel modello BIM. Questa operazione ha richiesto l’estrazione dal modello di un elenco completo dei materiali e componenti da installare e ha consentito di verificare rapidamente, all’arrivo in sito, la completezza e la correttezza della fornitura.

Una volta completata la fase di preparazione, la modellazione BIM dettagliata dell’edificio è stata aggiornata integrando i nuovi impianti progettati (Fase 3). Come già avvenuto per la facciata, anche in questo caso parti specifiche del modello – ad esempio gli schemi delle reti di distribuzione sui diversi piani – sono state rese disponibili su tablet agli operatori, permettendo loro di visualizzare in ogni momento lo stato di progetto degli impianti corrispondente alla porzione di edificio su cui stavano intervenendo.

È stato quindi implementato un sistema AR basato su BIM per supportare le attività di installazione e controllo (Fase 4). Integrando il modello digitale con la realtà aumentata, i processi di montaggio e verifica sono stati tradotti in auto-istruzioni operative per i tecnici sul campo. Il modello in realtà mista è stato reso accessibile sia su tablet sia su visori (ad esempio Microsoft HoloLens), collegandosi in tempo reale ai dati raccolti dagli strumenti di ispezione hardware, così da fornire un riscontro immediato durante le operazioni. Durante la fase di installazione, un aspetto critico è risultato la coordinazione spaziale tra i diversi sottosistemi impiantistici (canalizzazioni dell’aria, tubazioni idroniche, rete elettrica, ecc.). Per affrontare questa criticità, il

team ha eseguito un'approfondita *clash detection* in ambiente BIM (Fase 5): impostando parametri di tolleranza adeguati, è stata condotta un'analisi tridimensionale delle interferenze geometriche tra tutti i componenti MEP. Il processo ha consentito di individuare a priori potenziali conflitti – ad esempio incroci di condotte nello stesso vano tecnico – e di risolverli già in fase di progettazione esecutiva, evitando che si traducessero in problemi reali sul cantiere. L'impiego sistematico della *clash detection* 3D ha dunque accelerato il coordinamento progettuale, garantendo un design finale completamente coordinato e privo di incompatibilità.

Un ulteriore passo è consistito nell'impiego della realtà aumentata per verificare le condizioni di installazione (Fase 6). In pratica, i tecnici hanno potuto simulare *in situ* le fasi di montaggio degli impianti, anticipando eventuali difficoltà. Sono stati verificati, ad esempio, i punti in cui sarebbe stato necessario intervenire sulla struttura – come le forometrie per il passaggio delle condotte o gli staffaggi di sostegno – confrontando direttamente sul posto il modello BIM con la realtà esistente. Questa verifica aumentata ha incluso il controllo degli scenari di progettazione più critici e la pianificazione delle misure preparatorie: ciò ha assicurato che, al momento effettivo dell'installazione, l'edificio fosse già predisposto ad accogliere i nuovi componenti (ad esempio fori praticati nei punti giusti, rinforzi aggiunti ove necessario), evitando improvvisi arresti delle attività di cantiere.

Infine, si è passati all'installazione fisica e alla sostituzione dei sistemi MEP nell'edificio (Fase 7). Durante questa fase, la metodologia ha previsto un controllo incrociato costante tra il modello BIM e le operazioni eseguite: ogni elemento posato – dalle dorsali principali ai terminali come radiatori o unità di trattamento aria – è stato verificato confrontando la sua posizione reale con quella prevista nel modello digitale. Ad esempio, dopo l'installazione dei nuovi moduli prefabbricati per bagni e cucine, ciascuno di essi è stato ispezionato sovrapponendo virtualmente il modello BIM all'opera realizzata, così da accertare la correttezza della collocazione e delle connessioni.

Il team di installazione ha utilizzato strumenti AR in cantiere per condurre tale auto-ispezione: caricando sul tablet o sul visore AR il modello BIM aggiornato, impostando punti di riferimento e ancoraggio nell'ambiente reale e visualizzando in sovrapposizione gli elementi progettati rispetto a quelli installati. Questo approccio ha reso possibile una verifica immediata di ogni tratto di tubazione, condotto o apparecchiatura, garantendo la conformità rispetto a percorso, quota e orientamento. Eventuali discrepanze individuate tramite AR sono state immediatamente segnalate e corrette prima di procedere oltre, attivando un ciclo di feedback continuo durante tutto il processo di montaggio.

I risultati ottenuti da queste dimostrazioni sono estremamente positivi. L'adozione delle metodologie di ispezione innovative, combinata con l'installazione delle nuove soluzioni prefabbricate per l'involucro e per gli impianti, ha determinato un notevole miglioramento prestazionale dell'edificio rispetto alla situazione di partenza.

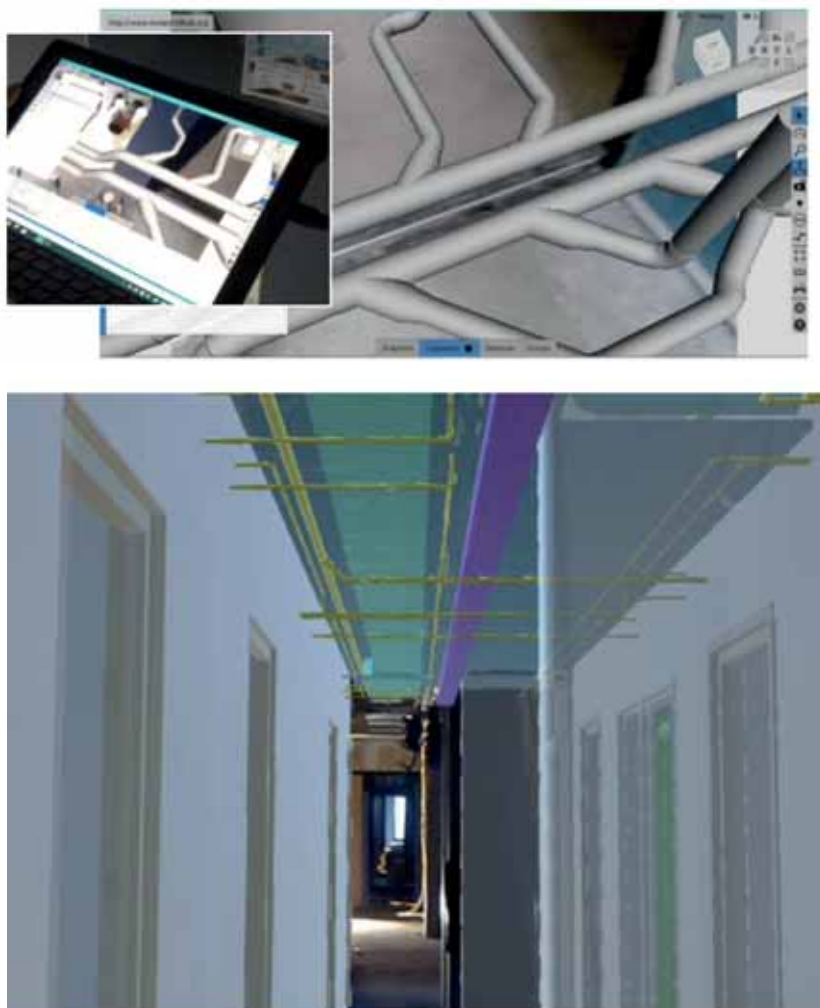


Fig. 7.29 – Applicazione in sito delle sinergie rese possibili dall'integrazione tra modello BIM e realtà aumentata. In particolare, grazie a un visore AR è possibile sovrapporre in loco il modello BIM allo stato di fatto, consentendo il confronto diretto tra progetto e costruito. Nel caso specifico, l'interesse è rivolto agli scarichi fognari, in alto, e a MEP/HVAC, in basso (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)





Figg. 7.30 (alla pagina precedente) e 7.31 – Applicazione di realtà mista basata su BIM INSITER con HoloLens; dimostrazione in sito sul caso studio HogeKamp, a Enschede (Olanda), focalizzata sui sistemi MEP, con funzioni di auto-istruzione e guida visiva per indicare dove gli elementi impiantistici devono essere installati nel contesto reale di cantiere (in questo caso: sistema di riscaldamento e distribuzione dell'acqua) (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

In termini quantitativi, si è registrato un risparmio energetico fino al 70% rispetto ai consumi pre-ristrutturazione. Questo risultato è imputabile sia alla drastica riduzione delle dispersioni termiche – resa possibile dal nuovo involucro coibentato e dall'eliminazione dei ponti termici – sia all'incremento di efficienza garantito dagli impianti di nuova generazione.

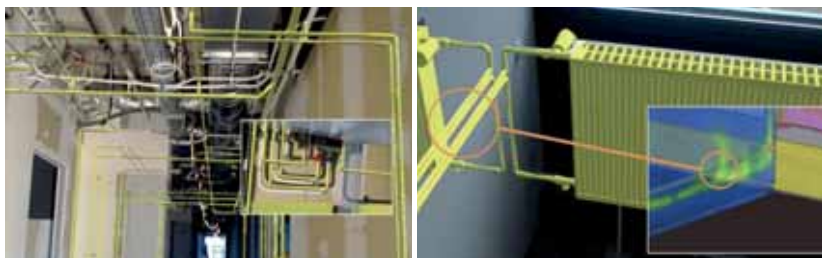


Fig. 7.32 – Applicazione di realtà mista, nel caso studio olandese HogeKamp a Enschede (Olanda), basata su modello BIM e visualizzata tramite HoloLens per attività di auto-ispezione. La dimostrazione in sito si è concentrata sull'impianto di riscaldamento, con particolare attenzione alla visualizzazione dei dati di misura provenienti dalla strumentazione, relativi alle variazioni termiche e alla dispersione del calore lungo le tubazioni (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

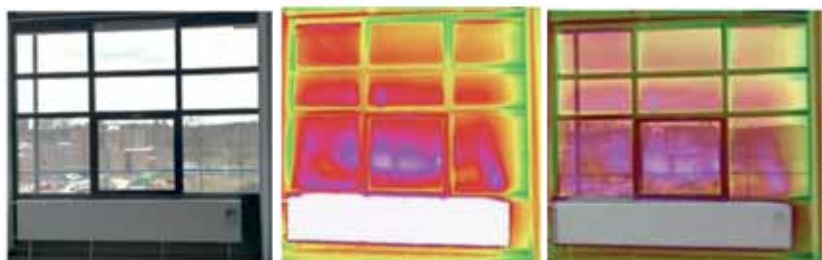


Fig. 7.33 – Ispezione tramite termografia durante le fasi di costruzione nel caso studio olandese, HogeKamp, a Enschede (Olanda). Da sinistra: immagine reale della finestra chiusa; immagine termografica corretta della finestra chiusa; sovrapposizione dell'immagine termografica (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)



Fig. 7.34 – Confronto delle condizioni reali con il modello di progetto in BIM di un ambiente tipo del caso studio HogeKamp, a Enschede (Olanda) (Copyright 2018, H2020-INSITER Project Consortium Partnership)

L'impiego estensivo di elementi prefabbricati, come i pannelli di facciata e i moduli impiantistici integrati, ha inoltre consentito di ridurre di circa il 50% i tempi di esecuzione rispetto a una ristrutturazione tradizionale, un fattore decisivo per contenere i disagi e i costi indiretti connessi ai lavori. L'etichetta energetica dell'edificio, dopo l'intervento, è passata dalla classe G (situazione preesistente) alla classe A, evidenziando il salto qualitativo ottenuto sul piano delle prestazioni e della sostenibilità.

Il caso studio Hogekamp dimostra in maniera concreta come gli obiettivi della metodologia INSITER possano essere pienamente conseguiti: gli errori esecutivi sono stati drasticamente ridotti – nessun difetto grave è emerso nelle verifiche finali –; i costi di riparazione e adeguamento in corso d'opera sono stati contenuti; la durata complessiva del processo costruttivo è risultata abbreviata grazie a una pianificazione più accurata e a un controllo qualità costante.

Dal punto di vista economico, va rilevato che nell'ambito di questa ricerca non è stata condotta un'analisi costi-benefici dettagliata, ad esempio comparando l'investimento iniziale negli strumenti digitali con i risparmi ottenuti. Tuttavia, la letteratura esistente mette in evidenza i benefici economici derivanti dall'introduzione di tecnologie 4.0 nel settore delle costruzioni, specialmente in riferimento agli edifici nZEB. Le imprese che sostengono tali costi iniziali possono ottenere vantaggi significativi nel medio-lungo termine: da un lato, il costo delle nuove tecnologie tende progressivamente a ridursi grazie alla crescente diffusione e standardizzazione, rendendone più agevole l'adozione su larga scala; dall'altro, i risparmi derivanti dalla riduzione di errori, rifacimenti e ritardi si traducono in una maggiore competitività e in margini economici più favorevoli per gli operatori. In sintesi, l'esperienza condotta conferma che l'integrazione di auto-istruzione digitale e auto-ispezione nel processo edilizio rappresenta non soltanto un valore aggiunto in termini di qualità e sostenibilità, ma anche un investimento strategico in grado di produrre vantaggi concreti in termini di efficienza e ritorno economico complessivo.

7.4. Risultati dei casi dimostrativi

I casi dimostrativi presentati confermano che la qualità non può essere intesa come un controllo "a valle", ma come un processo continuo, organizzato lungo le otto fasi della metodologia. La mappatura iniziale, il controllo dei componenti, l'impiego operativo del modello informativo in cantiere, il coordinamento e le auto-istruzioni conducono a verifiche strumentali e a un controllo finale tracciabile. Questa impostazione, strutturata secondo la lo-

gica (O)PDCA, ha consentito di abbreviare i cicli decisionali e di correggere le non conformità prima che si fissassero in opere chiuse, migliorando l'allineamento tra stato progettato e stato realizzato e rafforzando la documentazione dell'*as-built*.

Per quanto riguarda l'involucro, il confronto tra Hogekamp (Enschede) e l'Istituto "Concetto Marchesi" (Pisa) ha messo in evidenza quanto le condizioni di misura influiscano sulla capacità diagnostica: con un gradiente termico interno/esterno di circa 10 °C a Enschede è stato possibile individuare con precisione i ponti termici; a Pisa, dove il ΔT era di circa 2 °C, le indagini hanno restituito un quadro utile sul livello di isolamento complessivo, ma non hanno permesso di distinguere anomalie puntuali, indicando la necessità di generare artificialmente il gradiente termico quando l'ambiente non lo offre. La stessa logica è stata applicata con successo nello stabilimento Dragados, dove l'uso di carichi termici indotti ha consentito di intercettare discontinuità prima della spedizione. Queste evidenze collegano in modo diretto la Fase 7 (auto-ispezione) e la Fase 8 (verifica finale) con regole pratiche relative alle soglie e ai set-up di misura indispensabili per ottenere risultati affidabili.

Sul piano dei controlli geometrici, la validazione incrociata tra i casi di Colonia e Valladolid ha confermato come il rilievo 3D e l'analisi degli scostamenti possano supportare controlli "in tolleranza" su planarità, allineamenti e quote, riducendo gli errori cumulativi tipici dei sistemi modulari. L'integrazione della nuvola di punti nel modello informativo ha reso possibili confronti ripetibili tra stato progettato e stato realizzato, sia durante la posa sia prima della chiusura dei giunti, rafforzando il collegamento operativo tra le fasi 3-4 (BIM per il cantiere e contenuti di supporto) e le fasi 5-6 (coordinamento e auto-istruzioni), che permettono di anticipare gli aggiustamenti necessari.

Dal lato impiantistico, in particolare nel dimostratore Hogekamp, l'uso combinato del modello informativo, della verifica delle interferenze e delle visualizzazioni in realtà aumentata/mista ha reso più efficiente il coordinamento tra mestieri e ha ridotto la probabilità di errore nelle sequenze di retrofit. Le applicazioni su tablet e visori hanno consentito di confrontare in tempo reale il tracciato "virtuale" con la situazione reale, verificare le interferenze prima della posa e svolgere auto-ispezioni in opera, collegando in modo fluido le fasi 3-6 e alimentando la verifica finale con evidenze tracciate sul modello. Le dimostrazioni hanno documentato funzionalità chiave come la visualizzazione selettiva degli impianti, la guida alla posa, l'accesso a schede e misure, oltre alla presentazione di *clash cubes* con gli esiti del coordinamento.

I risultati trasversali emersi dal confronto tra i casi e dai workshop con gli operatori hanno mostrato un'elevata accettazione di filiere digitali semplici

e ben integrate. Un ulteriore risultato riguarda la scalabilità organizzativa: i moduli formativi, sviluppati e strutturati per livelli e allineati alle otto fasi, hanno dimostrato la possibilità di trasferire le pratiche di auto-istruzione e auto-ispezione dall'ambiente sperimentale ai cantieri reali e alle fabbriche. I pilotaggi hanno coinvolto maestranze, tecnici e responsabili della qualità, confermando che la traduzione della metodologia in unità di apprendimento, linee guida e materiali operativi rappresenta un ponte concreto tra raccomandazioni tecniche e adozione industriale, mantenendo la coerenza con la catena dati BIM-centrica.

Dalle dimostrazioni emergono anche limiti e raccomandazioni operative. In diversi casi, le prove sono state eseguite “in corso d’opera”, con la conseguenza che il miglioramento delle prestazioni energetiche è rimasto, nell'immediato, una stima di progetto più che una misura consuntiva. Tuttavia, la riduzione degli errori, l'anticipo delle decisioni correttive e la migliore documentazione dell'*as-built* costituiscono risultati tangibili, che aumentano sensibilmente la probabilità di raggiungere gli obiettivi energetici a fine lavori.

La raccomandazione che ne deriva è quella di consolidare la metodologia INSITER come procedura organizzativa stabile: definire responsabilità per ciascuna fase, fissare soglie e criteri di accettazione per le misure, pianificare i *set-up* di prova in funzione delle condizioni ambientali e integrare sistematicamente gli esiti nel modello informativo e nel fascicolo dell'opera.

La metodologia, supportata dai protocolli di prova e dalle raccomandazioni sviluppate in laboratorio e in fabbrica, si dimostra trasferibile tra casi di involucro e di impianti, tra ambiente di cantiere e stabilimento, e tra contesti di nuova costruzione e di ristrutturazione profonda. La chiusura del divario tra progetto e realizzazione avviene così attraverso l'accumulo di scelte corrette, rese possibili da una filiera digitale che integra identificazione dei componenti, controllo geometrico, guida visuale e diagnostica termica, con il modello informativo a fungere da “spina dorsale” della qualità.

Conclusioni

Conclusions

Quality in the building process must be seen as a dynamic, systemic outcome, not a static property of the finished work.

It requires integration across performance indicators, organizational procedures, and cultural values, ensuring that design, production, and construction are aligned throughout the building life cycle.

Digital tools such as BIM, self-inspection methods, and digital twins have shown great potential to reduce errors and increase transparency, but their effectiveness depends on cultural adoption and systemic.

Looking ahead, quality will be central to both the ecological transition – with nearly-zero energy buildings, circular approaches, and resilience to climate change – and the digital transition, with real-time monitoring and predictive management.

Quality is therefore a strategic investment that enhances performance, reduces risks, and safeguards user well-being, while also enabling innovation and competitiveness in the construction sector.

Il percorso sviluppato nel volume ha mostrato come la qualità nel processo edilizio debba essere considerata una costruzione dinamica, frutto di una serie di interazioni tra attori, strumenti e fasi operative, piuttosto che un attributo statico e univoco dell'opera realizzata. Tale approccio implica un cambiamento di prospettiva: non è più sufficiente controllare ex-post l'esito del processo, verificando se l'edificio corrisponde alle prescrizioni progettuali; è necessario, al contrario, governare preventivamente le condizioni di qualità, anticipando rischi e difformità attraverso un sistema integrato di indicatori, procedure e responsabilità.

L'analisi ha evidenziato almeno tre direzioni lungo le quali si articola oggi il concetto di qualità. La prima riguarda la dimensione prestazionale, che si esprime attraverso i *Key Performance Indicators* (KPI) e la loro capacità di misurare il comportamento dell'edificio in relazione all'efficienza energetica, al comfort ambientale, alla sicurezza e alla durabilità. La seconda è di natura organizzativa e gestionale: la qualità si costruisce attraverso la chiarezza dei ruoli, la formalizzazione delle fasi, la tracciabilità dei dati e

l'adozione di sistemi di controllo progressivi, che consentano di verificare passo dopo passo la coerenza tra obiettivi e risultati. La terza direzione è invece culturale e sociale: la qualità edilizia non è un fatto esclusivamente tecnico, ma un valore condiviso che deve essere compreso, accettato e promosso da tutti gli attori della filiera, inclusi i committenti e gli utenti finali.

Il contributo specifico del volume è consistito nel mettere in relazione questi tre piani attraverso una struttura che, partendo dai fondamenti teorici e normativi, si è progressivamente focalizzata sugli aspetti applicativi e sulle innovazioni introdotte dalla digitalizzazione. La trattazione delle componenti dell'involucro edilizio, con la distinzione tra errori ricorrenti e KPI da presidiare, ha reso evidente come sia possibile passare da un approccio descrittivo a un approccio operativo, in cui i requisiti di qualità si trasformano in strumenti di lavoro per progettisti, imprese e operatori di cantiere.

Un ruolo decisivo è stato riconosciuto alle tecnologie digitali, che consentono oggi di integrare progettazione, produzione e realizzazione in un flusso continuo di dati. L'esperienza del progetto INSITER ha dimostrato che strumenti come il BIM, le piattaforme collaborative, i sistemi di auto-ispezione assistita e le tecniche di rilievo digitale possono ridurre in modo significativo il rischio di errore, migliorare la comunicazione tra gli attori e incrementare la trasparenza del processo. Tali innovazioni non sostituiscono la necessità di competenza e responsabilità individuale, ma la rafforzano, offrendo ai diversi operatori strumenti più efficaci per il controllo della qualità. È tuttavia opportuno sottolineare come la digitalizzazione, pur essendo condizione necessaria, non sia di per sé sufficiente a garantire la qualità. Occorre una integrazione sistemica tra strumenti, regole e culture professionali. La qualità richiede una cornice normativa chiara e coerente, che fissi obiettivi misurabili e procedure di verifica; ma richiede anche un salto culturale, in grado di trasformare il controllo da adempimento burocratico a pratica quotidiana, interiorizzata e condivisa lungo tutta la filiera edilizia.

Dal punto di vista prospettico, il tema della qualità si intreccia con due grandi transizioni in atto. La prima è quella ecologica, che impone di ridurre i consumi energetici, le emissioni e l'impatto ambientale del costruito, promuovendo edifici a energia quasi zero, cicli di vita più lunghi e pratiche di economia circolare. La seconda è quella digitale, che apre scenari inediti di monitoraggio, manutenzione predittiva e gestione intelligente, grazie ai gemelli digitali e ai sistemi di intelligenza artificiale applicati all'ambiente costruito.

In questo quadro, la qualità non si limita a garantire conformità prestazionale, ma diventa un vero e proprio fattore abilitante dell'innovazione, capace di orientare la progettazione e la costruzione verso modelli più resilienti e sostenibili.

Il volume ha inteso dunque offrire una duplice prospettiva. Da un lato, una prospettiva analitica, che ha permesso di sistematizzare concetti, strumenti e norme, chiarendo come la qualità edilizia si configuri oggi come un obiettivo complesso, multilivello e misurabile. Dall'altro, una prospettiva operativa, che attraverso esempi e procedure ha tradotto tali concetti in strumenti pratici, utilizzabili nella quotidianità della progettazione e del cantiere. In definitiva, il messaggio principale che emerge è che la qualità non può più essere considerata un costo aggiuntivo o un requisito esterno, ma deve essere intesa come un investimento strategico. La qualità migliora le prestazioni, riduce i rischi di contenzioso, aumenta il valore dell'opera e, soprattutto, contribuisce a garantire ambienti più sicuri, salubri e confortevoli. Essa costituisce una condizione necessaria per la competitività del settore edile e per la credibilità della professione tecnica, ma anche un diritto degli utenti e della collettività.

Sotto questo profilo, la sfida per il futuro è duplice. Da un lato, consolidare i sistemi e le pratiche già disponibili, diffondendone l'uso e adattandoli alle diverse realtà produttive e territoriali. Dall'altro, sperimentare nuovi strumenti e metodologie, capaci di affrontare i cambiamenti introdotti dalla crisi climatica, dalla scarsità di risorse e dalla trasformazione digitale. In entrambi i casi, il successo dipenderà dalla capacità di costruire un linguaggio comune della qualità, che unisca norme, procedure e valori condivisi.

Il volume si propone come contributo a questo percorso, mettendo a disposizione della comunità scientifica e professionale un insieme di riflessioni e di strumenti che possano alimentare un dibattito aperto e fornire una base solida per l'innovazione futura.

La qualità, in ultima analisi, non è un obiettivo da raggiungere una volta per tutte, ma un processo continuo, che richiede vigilanza, adattamento e capacità di apprendimento collettivo.

Glossario e acronimi

Glossary of Terms and Acronyms

AECO: Architecture, Engineering, Construction & Operations
AIR: Asset Information Requirements
APE: Attestati di Prestazione Energetica
AR: Augmented Reality (Realtà aumentata)
ASD: Active Soil Depressurization
ASE: Annual Sun Exposure
AVCP: Autorità per la Vigilanza sui Contratti Pubblici di lavori, servizi e forniture
BACS: Building Automation and Control Systems
BEP: BIM Execution Plan
BIM: Building Information Modeling
BIM Coordinator: Coordinatore BIM
BIM Manager: Manager BIM
BIPV: Building-Integrated Photovoltaics
BMS: Building Management Systems
CAM: Criteri Ambientali Minimi
CAFM: Computer-Aided Facility Management
CDE: Common Data Environment
CDE Manager: Gestore del Common Data Environment
CIBSE: Chartered Institution of Building Services Engineers
CMIS: Content Management Interoperability Services
CMMS: Computerized Maintenance Management System
COBie: Construction-Operations Building information exchange
COV: Composti Organici Volatili
CSE: Coordinatore della Sicurezza in fase di Esecuzione
CSP: Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione
DCA: Design Coordination Analyzer
DCS: Design Coordination System
DGP: Daylight Glare Probability
Digital Building Logbook: Registro digitale dell'edificio
Digital Twin: Gemello digitale
DL: Direttore dei Lavori
DoP: Dichiarazioni di Prestazione
DTM: Digital Twin Manager

EPC: Energy Performance Contracting
EPD: Environmental Product Declaration (Dichiarazione ambientale di prodotto)
EIR: Exchange Information Requirements
EnerPHit: Standard di ristrutturazione energetica secondo Passivhaus Institut
EU Level(s) framework: Quadro europeo Level(s)
EVM: Earned Value Management
FLD: Fattore di Luce Diurna
FPC: Factory Production Control
GHG: Greenhouse Gas (Gas a effetto serra)
GNSS: Global Navigation Satellite System
GSL: Government Soft Landings
HFM: Heat Flow Meter (Metodo della piastra calda protetta)
HVAC: Heating, Ventilation and Air Conditioning
IAQ: Indoor Air Quality (Qualità dell'aria interna)
ICT: Information Communication Technology
IEQ: Indoor Environmental Quality (Qualità ambientale interna)
IFC: Industry Foundation Classes
IQM: Integrated Quality Management
IR: Infrared (Infrarossi)
IoT: Internet of Things
JRC: Joint Research Centre
KPI: Key Performance Indicators
LCA: Life Cycle Assessment
Lean Construction: Costruzione snella
LOIN: Level of Information Need
LPS: Last Planner System
M&V: Misurazione e Verifica
MEP: Mechanical, Electrical, Plumbing
MR: Mixed Reality (Realtà mista)
nZEB: Nearly Zero Energy Building (Edificio a energia quasi zero)
NIST infiltration correlations: Correlazioni di infiltrazione NIST (National Institute of Standards and Technology)
OMS: Organizzazione Mondiale della Sanità
openBIM: Approccio interoperabile basato su standard aperti BIM
Passivhaus: Casa passiva
PFTE: Progetto di Fattibilità Tecnico Economica
PMV: Predicted Mean Vote
POE: Post-Occupancy Evaluation
POS: Piani Operativi di Sicurezza
PPC: Percent Plan Complete
PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied
PSC: Piano di Sicurezza e Coordinamento
QMS: Quality Management System
QR Code: Quick Response Code
Renovation Passport: Passaporto di ristrutturazione

RIBA: Royal Institute of British Architects
RTK: Real-Time Kinematic
RUP: Responsabile Unico del Procedimento / Progetto
SAL: Stati di Avanzamento Lavori
sDA: Spatial Daylight Autonomy
SoundBrush: Sistema per misurazioni acustiche a scansione
SPR: Spatial Prominence Ratio
SRI: Smart Readiness Indicator
SSD: Sub-Slab Depressurization
TM: Technical Memoranda
TQM: Total Quality Management
UDI: Useful Daylight Illuminance
UGR: Unified Glare Rating
UK BIM Framework: Quadro normativo e operativo BIM nel Regno Unito
VMC: Ventilazione Meccanica Controllata
VR: Virtual Reality (Realtà virtuale)
WBS: Work Breakdown Structure

Bibliografia

References

Letteratura scientifica e tecnica

- Alencastro J., Fuertes A., de Wilde P. (2018), “The relationship between quality defects and the thermal performance of buildings”, *Renewable and Sustainable Energy*, 81: 883-894. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.029>.
- Argiolas C. (2001), *Programmazione e misura della qualità nelle fasi del processo edilizio*, CUEC, Cagliari.
- ASHRAE (2019), *ASHRAE Guideline 0-2019 – The Commissioning Process*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta.
- ASHRAE (2014), *ASHRAE Guideline 14-2014 – Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta.
- ASHRAE (2018), *ANSI/ASHRAE Standard 202-2018 – Commissioning Process for Buildings and Systems*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta.
- ATTMA – Air Tightness Testing & Measurement Association (2021), *Technical Standard L1 (TSL1) – Measuring Air Permeability of Building Envelopes (Dwellings)*, ATTMA.
- ATTMA – Air Tightness Testing & Measurement Association (2021), *Technical Standard L2 (TSL2) – Measuring Air Permeability of Building Envelopes (Non-Dwellings)*, ATTMA.
- Balasso R. (2021), *Diffformità, vizi e difetti delle opere edili*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.
- Boriani A., Cariani W., Romani R. (2020), *Agenzia Nazionale Efficienza Energetica – ENEA, febbraio 2020, Guida pratica alla ristrutturazione e riqualificazione energetica degli edifici per amministratori di condominio. I BONUS nel Settore Edilizio con le Novità della Legge di Bilancio 2020 (Legge 27 dicembre 2019, n. 160, G.U. n. 304 del 30 dicembre 2019), p. 14. Disponibile online: <https://www.pubblicazioni.enea.it/download.html?task=download.send&id=18:guida-pratica-alla-ristrutturazione-e-riqualificazione-energetica-degli-edifici-per-amministratori-di-condominio&catid=3>.*

- BSRIA (2014), *Soft Landings Framework. Version 2*, BSRIA (Building Services Research and Information Association), Bracknell.
- Carpino C., Loukou E., Heiselberg P., Arcuri N. (2020), “Energy performance gap of a nearly Zero Energy Building (nZEB) in Denmark: the influence of occupancy modelling”, *Building Research & Information*, 48(8): 899-921. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1707639>.
- CII – Construction Industry Institute (2001), “The Field Rework Index Study: Early Warning for Field Rework and Cost Growth”, *Research Summary RS153-1*, Construction Industry Institute, The University of Texas at Austin, Austin.
- van Dronkelaar C., Dowson M., Spataru C., Mumovic D. (2016), “A review of the energy performance gap and its underlying causes in non-domestic buildings”, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 1: 17.
- EVO – Efficiency Valuation Organization (2012), *International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP): Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings*, EVO, Washington D.C.
- EVO – Efficiency Valuation Organization (2022), *International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP) – Core Concepts, 2022*, EVO, Ottawa.
- Eon C., Breadsell J.K., Byrne J., Morrison G.M. (2020), “The Discrepancy between As-Built and As-Designed in Energy Efficient Buildings: A Rapid Review”, *Sustainability*, 12, 6372. <https://doi.org/10.3390/su12166372>.
- European Union (2017), *EU BIM Task Group. Handbook for the Introduction of Building Information Modeling by the European Public Sector*, Brussels.
- Far C., Far H. (2019), “Improving energy efficiency of existing residential buildings using effective thermal retrofit of building envelope”, *Indoor and Built Environment*, 28, 744-760. <https://doi.org/10.1177/1420326X18794010>.
- Feigenbaum A.V. (1991), *Total quality control*, McGraw-Hill, London.
- FILLEA-CGIL (2023), *Testo Unico Degli Incentivi*. Disponibile online: <https://www.filleacgil.net/images/cannata/EVENTI/27luglio2023/PropostaFilleaIntegrale.pdf>.
- Gan V.J.L., Lo I.M.C., Ma J., Tse K.T., Cheng J.C.P., Chan C.M. (2020), “Simulation optimisation towards energy efficient green buildings: Current status and future trends”, *Journal of Cleaner Production*, 254: 120012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120012>.
- IEA-EBC – International Energy Agency (2011), *Energy in Buildings and Communities Programme (EBC). Annex 50: Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings – Final Report*, IEA-EBC.
- IEA-EBC – International Energy Agency (2019), *Energy in Buildings and Communities Programme (EBC). Annex 66: Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings – Final Report*, IEA-EBC.
- IEA (2023), *Energy Efficiency; License: CC BY 4.0*, IEA, Paris. Disponibile online: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>.
- IEA (2023), *Tracking Clean Energy Progress 2023; License: CC BY 4.0*, IEA, Paris. Disponibile online: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>.
- Ioannou A., Itard L.C.M. (2015), “Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy”, *Energy and Buildings*, 92: 216-233. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.055>.

- Kubba S. (2017), *Handbook of Green Building Design and Construction, LEED, BREEAM, and Green Globes, Second Edition*, Elsevier, Amsterdam.
- Lotfabadi P., Hançer P. (2019), “A comparative study of traditional and contemporary building envelope construction techniques in terms of thermal comfort and energy efficiency in hot and humid climates”, *Sustainability*, 11: 3582. <https://doi.org/10.3390/su11133582>.
- Mahdavi A., Berger C., Amin H., Ampatz E., Andersen R.K., Azar E., Barthelmes V.M., Favero M., Hahn J., Khovalyg D., Knudsen H.N., Luna-Navarro A., Roetzel A., Sangogboye F.C., Schweiker M., Taheri M., Teli D., Touchie M., Verbruggen S. (2021), “The Role of Occupants in Buildings’ Energy Performance Gap: Myth or Reality?”, *Sustainability*, 13: 3146. <https://doi.org/10.3390/su13063146>.
- Martinaitis V., Edmundas E.K., Motuzienė V., Vilutienė T. (2015), “Importance of occupancy information when simulating energy demand of energy efficient house: A case study”, *Energy and Buildings*, 101: 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.031>.
- Martinez L., Klitou T., Olschewski D., Camero Melero P., Fokaides P. A. (2025), “Advancing building intelligence: Developing and implementing standardized Smart Readiness Indicator (SRI) on-site audit procedure”, *Energy*, 316: 134538.
- Navigant Construction Forum (2012), *The Impact of Rework on Construction & Some Practical Remedies*, Navigant Consulting Inc., Chicago.
- Noghabaei M., Heydarian A., Balali V., Han K. (2020), “Trend Analysis on Adoption of Virtual and Augmented Reality in the Architecture, Engineering, and Construction Industry”, *Data*, 5(1): 26. <https://doi.org/10.3390/data5010026>.
- O’Brien J.J. (2002), *Construction inspection handbook: total quality management 4th ed.*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Pan N.H., Isnaeni N.N. (2024), “Integration of Augmented Reality and Building Information Modeling for Enhanced Construction Inspection – A Case Study”, *Buildings*, 14: 612. <https://doi.org/10.3390/buildings14030612>.
- Pascucci F., Savelli E., Gistri G. (2023), “How digital technologies reshape marketing: Evidence from a qualitative Investigation”, *Italian Journal of Marketing*, 27-58. <https://doi.org/10.1007/s43039-023-00063-6>.
- Perera I., Hewage K., Rana A., Sadiq R. (2025), “Combining Energy Performance and Indoor Environmental Quality (IEQ) in Buildings: A Systematic Review on Common IEQ Guidelines and Energy Codes in North America”, *Energies*, 18(7): 1740. <https://doi.org/10.3390/en18071740>.
- Persily A.K., Emmerich S.J. (1999), “Energy impacts of infiltration and ventilation in U.S. office buildings using multizone airflow simulation”, in *Proceedings of the 20th AIVC Conference, Ventilation and Cooling*, pp. 167-174.
- Rastegari M., Del Pero C., Leonforte F. (2025), “Assessment of LEVEL(S) Key Sustainability Indicators”, *Energies*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/en18082027>.
- Rumane A.R. (2013), *Quality Tools for Managing Construction Projects (1st ed.)*, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b14754>.
- Shewhart W. A., Istituto di Geodesia (1931), *Economic control of quality of manufactured product (8th ed.)*, D. Van Nostrand Company.

- Sleiman S., Ouf M., Luo W., Kramer R., Zeiler W., Borkowski E., Hong T., Nagy Z., Chen Z. (2024), “Overview of occupant-centric KPIs for building performance and their value to various building stakeholders”, *Energy and Buildings*, 322: 114704. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114704>.
- Sunikka-Blank M., Galvin R. (2012), “Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption”, *Building Research & Information*, 40(3): 260-273.
- U.S. FEMP – Department of Energy – Federal Energy Management Program (2023), *M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects. Version 5.0 (Draft Update)*, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.
- Wang M., Wang C.C., Sepasgozar S., Zlatanova S. (2020), “A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction: Current Status and Future Direction towards Industry 4.0”, *Buildings*, 10: 204. <https://doi.org/10.3390/buildings10110204>.
- Wargocki P., Wei W., Bendžalová J., Espigares-Correa C., Gerard C., Greslou O., Rivallain M., Sesana M. M., Olesen B. W., Zirmgibl J., Mandin C. (2021), “TAIL, a new scheme for rating indoor environmental quality in offices and hotels undergoing deep energy renovation (EU ALDREN project)”, *Energy and Buildings*, 244, art. 111029. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111029>.
- de Wilde P. (2014), “The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation”, *Automation in Construction*, 41, 40-49.
- Wingfield J., Bell M., Miles-Shenton D., South T. (2008), *Lessons from Stamford Brook – Understanding the Gap between Designed and Real Performance*, Department for Communities and Local Government (DCLG), London.
- You Z., Feng L. (2020), “Integration of Industry 4.0 Related Technologies in Construction Industry: A Framework of Cyber-Physical System”, *IEEE Access*, 8: 122908-122922. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007206>.
- Zaffagnini M. (1981). *Progettare nel processo edilizio*, Parma editore, Bologna.
- Zamanidou A., Carnero Melero P., Martinez Garcia L., Novakova A., Litiu A.V., Olschewski D., Tzanev D., Fokaides P.A. (2024), “Enhancing smart readiness of buildings: bridging the knowledge gap to European citizens”, *International Journal of Sustainable Energy*, 43(1). <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2385632>.
- Zero Carbon Hub, (2014), *Closing the Gap Between Design and As-Built Performance: Evidence Review Report*, London.
- Zheng S., Zhou J., Jiaqin Z., Yang Y., Xu F., Liu H. (2024), “Review of the building energy performance gap: causes, measurements and future directions”, *Energy and Buildings*, 304: 113948.

Documenti istituzionali e normativi

- ASTM E90-09 (2016), *Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements*, ASTM International, West Conshohocken (PA).

- ASTM E2249-02 (2016), *Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Transmission Loss of Building Partition and Elements Using Sound Intensity*, ASTM International, West Conshohocken (PA).
- BS 5250:2021 (2021), *Management of moisture in buildings – Code of practice*, British Standards Institution (BSI), London.
- Circolare del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 21 gennaio 2019, n. 7 – Istruzioni per l'applicazione dell'“Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 17 gennaio 2018 (Circolare applicativa NTC 2018)* (2018), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 35 dell'11 febbraio 2019, Supplemento Ordinario n. 5.
- Comité Européen de Normalisation (2017), *CEN/TR 17052:2017 – Prodotti isolanti termici per applicazioni edilizie – Istruzioni per la posa e il fissaggio per la determinazione della reazione al fuoco nelle prove*, Comité Européen de Normalisation, Bruxelles.
- Commissione Europea (2019), *Il Green Deal europeo. COM(2019) 640 final*, Bruxelles.
- Commissione Europea (2020), *Un'ondata di ristrutturazioni per l'Europa – Innescare la trasformazione del settore edilizio per il clima, la sostenibilità e l'occupazione. COM(2020) 662 final*, Bruxelles.
- Commissione Europea (2022), *REPowerEU Plan – Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2022) 230 final*, Bruxelles.
- Corte Suprema di Cassazione (2017), *Sezioni Unite civili, sentenza 27 marzo 2017, n. 7756*.
- Decreto del Ministero della Transizione Ecologica, 23 giugno 2022 – Criteri ambientali minimi per l'edilizia (CAM) (2022)*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 183 del 6 agosto 2022, Supplemento Ordinario n. 26.
- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” (NTC 2018)* (2018), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico, 26 giugno 2015 – Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici (Decreto requisiti minimi) (2015)*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 162 del 15 luglio 2015, Supplemento Ordinario n. 39.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico, 26 giugno 2015 – Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009 – Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici (APE) (2017)*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 162 del 15 luglio 2015, Supplemento Ordinario n. 39.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico, 16 febbraio 2016 – Aggiornamento del decreto 26 giugno 2009, linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici (2016)*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 39 del 17 febbraio 2016.

- Decreto del Presidente della Repubblica 6 giugno 2001, n. 380 – Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia (Testo Unico dell’Edilizia – TUE) (2001), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 245 del 20 ottobre 2001, Supplemento Ordinario n. 239.*
- Decreto del Presidente della Repubblica 16 aprile 2013, n. 74 – Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell’acqua calda sanitaria, a norma dell’articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192 (2013), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 149 del 27 giugno 2013.*
- Decreto del Presidente della Repubblica 16 aprile 2013, n. 75 – Regolamento recante i requisiti professionali e i criteri di accreditamento per assicurare la qualificazione e l’indipendenza degli esperti e degli organismi a cui affidare la certificazione energetica degli edifici, a norma dell’articolo 4, comma 1, lettera c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192 (2013), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 149 del 27 giugno 2013.*
- Decreto-Legge 19 maggio 2020, n. 34 – Misure urgenti in materia di salute, sostegno al lavoro e all’economia, nonché di politiche sociali connesse all’emergenza epidemiologica da COVID-19 (c.d. “Decreto Rilancio”) (2020), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 128 del 19 maggio 2020, Supplemento Ordinario n. 21.*
- Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 – Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia (2005), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 222 del 23 settembre 2005.*
- Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 – Attuazione dell’articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro (Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro) (2008) Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 101 del 30 aprile 2008, Supplemento Ordinario n. 108.*
- Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28 – Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE (2011), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 71 del 28 marzo 2011 – Supplemento Ordinario n. 81.*
- Decreto Legislativo 10 giugno 2020, n. 48 – Attuazione della direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell’edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica (2020), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 146 del 10 giugno 2020.*
- Decreto Legislativo 31 marzo 2023, n. 36 – Codice dei contratti pubblici in attuazione dell’articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici (2023), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 77 del 31 marzo 2023, Supplemento Ordinario n. 12.*

- DIN 18202:2019 – Tolerances in building construction – Structures* (2019), Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin.
- Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico nell'edilizia* (2003), Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, L 1, del 4 gennaio 2003.
- Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE (Renewable Energy Directive I, RED I)* (2009), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 140, del 5 giugno 2009.
- Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)* (2010), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 153, del 18 giugno 2010.
- Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio, del 5 dicembre 2013 – Norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti* (2014), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 13/1, del 17 gennaio 2014.
- Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica* (2018), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 156, del 19 giugno 2018.
- Direttiva (UE) 2023/959 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 10 maggio 2023, che modifica la direttiva 2003/87/CE per rafforzare il sistema per lo scambio di quote di emissione dell'Unione (EU ETS) e la decisione (UE) 2015/1814 relativa alla riserva stabilizzatrice del mercato* (2023), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 130, del 16 maggio 2023.
- Direttiva (UE) 2023/1791 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 13 settembre 2023, sull'efficienza energetica, che modifica i regolamenti (UE) 2023/955 e (UE) 2021/241 e abroga la direttiva 2012/27/UE. (EED)* (2023), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 231, 20 settembre 2023.
- Direttiva (UE) 2023/2413 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 18 ottobre 2023, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, che modifica la direttiva (UE) 2018/2001 e i regolamenti (UE) 2018/1999, (UE) 2019/943 e (UE) 2018/2000. (RED III – Renewable Energy Directive III)* (2023), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 2023/2413, del 31 ottobre 2023.
- Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 aprile 2024, sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD rifusa 2024/1275)* (2024), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 1275, dell'8 maggio 2024.
- European Commission (2017, revised 2021), *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings (Level(s) – Quadro comune dell'UE di indicatori chiave di sostenibilità per edifici per uffici e residenziali)*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- IP 1/06 – Condensation in buildings. Building Research Establishment (BRE) Information Paper* (2006), Watford.
- ISO 16798 (serie) – Energy performance of buildings – Ventilation for buildings*, International Organization for Standardization (ISO), Genève.

- ISO 23247 (serie) – Automation systems and integration — Digital Twin framework for manufacturing (Sistemi di automazione e integrazione — Quadro di riferimento per i digital twin nella manifattura)*, International Organization for Standardization, Genève.
- Legge 9 gennaio 1991, n. 10 – Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia* (1991), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 13 del 16 gennaio 1991, Supplemento Ordinario n. 6.
- Legge 11 febbraio 1994, n. 109 – Legge quadro in materia di lavori pubblici* (1994), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 41 del 19 febbraio 1994.
- Legge 3 agosto 2013, n. 90 – Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63, recante disposizioni urgenti per il recepimento della direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale* (2013), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 181 del 3 agosto 2013.
- Regio Decreto 16 marzo 1942, n. 262 – Approvazione del testo del Codice civile, e successive modificazioni* (1942), Gazzetta Ufficiale del Regno d'Italia, Serie Generale n. 79 del 4 aprile 1942, Supplemento Ordinario.
- Regolamento (UE) 2020/852 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 18 giugno 2020, sulla definizione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili e recante modifica del regolamento (UE) 2019/2088 (Tassonomia UE)* (2020), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L. 198, del 22 giugno 2020, pp. 13-43.
- Regolamento (UE) 2021/241 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 12 febbraio 2021, che istituisce il dispositivo per la ripresa e la resilienza (PNRR)* (2021), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L. 57, del 18 febbraio 2021, pp. 17-75.
- Regolamento (UE) 2024/573 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'7 febbraio 2024, che istituisce un quadro per garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche e che modifica i regolamenti (UE) n. 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 e (UE) 2019/1020. (Critical Raw Materials Act, CRMA)* (2024), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L. 2024/573, del 6 marzo 2024.
- Regolamento (UE) 2024/3110 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 27 novembre 2024, che fissa norme armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e abroga il regolamento (UE) n. 305/2011* (2024), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L. 3110, del 18 dicembre 2024.
- Regolamento (UE) n. 305/2011 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 9 marzo 2011, che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione (CPR) e abroga la direttiva 89/106/CEE del Consiglio* (2011), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L. 88, del 4 aprile 2011, pp. 5-43.
- Royal Institute of British Architects (RIBA) (2021), *Plan for Use Guide*, RIBA Publishing, London.
- Royal Institute of British Architects (RIBA), *RIBA Plan of Work 2020: Overview*, RIBA Publishing, London.
- UNI 8289:1981 – Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione* (1981), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.

- UNI 8290 (serie) – *Edilizia residenziale – Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia; Analisi dei requisiti; Analisi degli agenti* (n.d.), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI 10349 (serie) – *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici* (varie edizioni), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI 11063:2017 – *Criteri per la stesura del manuale d'uso, manutenzione e gestione degli edifici* (2017), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI 11165:2005 – *Luce e illuminazione – Valutazione dell'illuminazione naturale negli edifici – Metodo del fattore medio di luce diurna* (2005), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI 11337 (serie) – *Edilizia e opere di ingegneria civile – Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni (Digital management of the informative processes of constructions)* (n.d.), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI 11367:2023 – *Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera* (2023), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI 11673 (serie) – *Posatori di serramenti – Requisiti di conoscenza, abilità e competenza* (n.d.), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI CEI EN ISO 50001:2018 – *Sistemi di gestione dell'energia – Requisiti e linee guida per l'uso (ISO 50001:2018)* (2018), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI), Milano.
- UNI CEI EN ISO/IEC 17020:2012 – *Valutazione della conformità – Requisiti per il funzionamento di vari tipi di organismi che eseguono ispezioni (ISO/IEC 17020:2012)* (2012), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI), Milano.
- UNI EN 410:2011 – *Vetro per edilizia – Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate* (2011), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 495-5:2013 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Membrane plastiche e gommose per tetti – Determinazione della flessibilità a bassa temperatura* (2013), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 673:2011 – *Vetro per edilizia – Determinazione della trasmittanza termica (valore U) – Metodo di calcolo* (2011), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 1026:2016 – *Finestre e porte – Permeabilità all'aria – Metodo di prova* (2016), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 1027:2016 – *Finestre e porte – Permeabilità all'acqua – Metodo di prova* (2016), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 1107-1:2002 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Determinazione della stabilità dimensionale – Parte 1: Membrane bituminose* (2002), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 1107-2:2002 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Determinazione della stabilità dimensionale – Parte 2: Membrane plastiche e gommose* (2002), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.

- UNI EN 1109:2013 – Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Membrane bituminose, plastiche e gommose per tetti – Determinazione della flessibilità a bassa temperatura* (2013), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 1296:2001 – Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Membrane bituminose, plastiche e gommose per tetti – Metodi di prova per la resistenza all'invecchiamento artificiale mediante esposizione a lungo termine a calore elevato* (2001), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 12114:2000 – Prestazioni termiche degli edifici – Permeabilità all'aria dei componenti per edilizia – Metodo di prova in laboratorio* (2000), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 12152:2002 – Facciate continue – Permeabilità all'aria – Metodo di prova* (2002), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 12155:2002 – Facciate continue – Tenuta all'acqua – Metodo di prova mediante pressione dinamica dell'acqua con irrorazione uniforme* (2002), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 12207:2017 – Finestre e porte – Permeabilità all'aria – Classificazione* (2017), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 12208:2000 – Finestre e porte – Permeabilità all'acqua – Classificazione* (2000), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 12210:2016 – Finestre e porte – Resistenza al carico del vento – Classificazione* (2016), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 12211:2016 – Finestre e porte – Resistenza al carico del vento – Metodo di prova* (2016), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 12865:2002 – Facciate continue – Tenuta all'acqua – Prova con pressione differenziale ciclica* (2002), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 12354 (serie) – Acustica in edilizia – Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti* (n.d.), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 13187:1999 – Prestazione termica degli edifici – Rilevamento qualitativo delle irregolarità termiche negli involucri edilizi – Metodo della termografia all'infrarosso* (1999), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 13369:2023 – Regole comuni per i prodotti prefabbricati di calcestruzzo (EN 13369:2023)* (2023), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 13707:2013 – Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Membrane bituminose, plastiche e gommose da utilizzare come strati di impermeabilizzazione per tetti – Definizioni e caratteristiche* (2013), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 13830:2015 – Facciate continue – Norma di prodotto* (2015), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 13859-1:2014 – Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Definizioni e caratteristiche delle membrane sottotetto – Parte 1: Membrane sottotetto per tetti a falda* (2014), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 13859-2:2014 – Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Definizioni e caratteristiche delle membrane sottotetto – Parte 2: Membrane sottotetto per pareti verticali* (2014), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.

- UNI EN 13956:2013 – Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Membrane plastiche e gommose da utilizzare come strati di impermeabilizzazione per tetti – Definizioni e caratteristiche* (2013), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 13984:2013 – Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Membrane di controllo del vapore – Definizioni e caratteristiche* (2013), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 14351-1:2006+A2:2016 – Finestre e porte – Norma di prodotto, caratteristiche prestazionali – Parte 1: Finestre e porte pedonali esterne* (2016), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 15026:2008 – Prestazioni igrotermiche dei componenti edili e degli elementi edilizi – Valutazione della migrazione dell'umidità mediante simulazione numerica* (2008), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 15221 (serie) – Facility Management (n.d.)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 15251:2008 – Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica* (2008), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 15804:2012+A2:2019 – Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro per la categoria di prodotto dei prodotti da costruzione* (2019), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 15978:2011 – Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione della prestazione ambientale degli edifici – Metodo di calcolo (Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method)* (2011), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 17037:2019 – Luce diurna negli edifici (EN 17037:2018)* (2019), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN 17412-1:2020 – Building Information Modeling – Livello di fabbisogno informativo – Parte 1: Concetti e principi* (2020), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 6781-3:2021 – Prestazione termica degli edifici – Rilevamento delle irregolarità termiche negli involucri edilizi – Parte 3: Qualificazione dei servizi di termografia all'infrarosso (ISO 6781-3:2015)* (2021), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 6946:2018 – Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo (ISO 6946:2017)* (2018), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 7730:2006 – Ergonomia degli ambienti termici – Analisi e interpretazione del comfort termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale (ISO 7730:2005)* (2006), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 8990:2000 – Prestazioni termiche degli edifici – Determinazione della trasmittanza termica mediante il metodo della camera calda con anello di guardia* (2000), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.

- UNI EN ISO 9000:2005 – Sistemi di gestione per la qualità – Fondamenti e terminologia (ISO 9000:2005) (2005)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 9001:2015 – Sistemi di gestione per la qualità – Requisiti (ISO 9001:2015) (2015)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 9614 (serie) – Acustica – Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti sonore a partire dalla misurazione dell'intensità sonora (n.d.)*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 9869-1:2015 – Prestazioni termiche degli edifici – Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica – Parte 1: Metodo a regime stazionario (ISO 9869-1:2014) (2015)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 9972:2015 – Prestazione termica degli edifici – Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici – Metodo di pressurizzazione con ventilatore (Blower Door Test) (ISO 9972:2015) (2015)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 10077 (serie) – Prestazione termica di finestre, porte e chiusure – Calcolo della trasmittanza termica (n.d.)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 10140 (serie) – Acustica – Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di elementi edilizi (n.d.)* Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 10211:2018 – Prestazioni termiche degli edifici – Calcolo del flusso termico per ponti termici negli elementi edilizi – Metodi dettagliati (ISO 10211:2017) (2018)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 10140 (serie) – Acustica – Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di elementi edilizi (n.d.)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 11665 (serie) – Misura della radioattività nell'ambiente – Aria: radon-222 (n.d.)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 13370:2019 – Prestazione termica degli edifici – Scambio termico attraverso il terreno – Metodi di calcolo (2019)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 13788:2013 – Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e metodo di calcolo della condensazione interstiziale (ISO 13788:2012) (2013)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 14001:2015 – Sistemi di gestione ambientale – Requisiti e guida per l'uso (ISO 14001:2015) (2015)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 14025:2010 – Etichette e dichiarazioni ambientali – Dichiarazioni ambientali di Tipo III – Principi e procedure (ISO 14025:2006) (2010)*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.
- UNI EN ISO 14683:2018 – Prestazioni termiche degli edifici – Ponti termici negli elementi edilizi – Valori tabulati per la trasmittanza termica lineica e metodi*

- semplificati di calcolo (ISO 14683:2017) (2018). Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI EN ISO 15186 (serie) – Acustica – Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico al rumore aereo dei componenti edilizi utilizzando l'intensità sonora (n.d.), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI EN ISO 16739-1:2018 – Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries – Part 1: Data schema (2018), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI EN ISO 19650 (serie) – Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modeling (BIM) — Gestione dell'informazione tramite il Building Information Modeling (n.d.), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI EN ISO 20887:2020 – Sostenibilità delle opere di costruzione – Progettazione per la disassemblabilità e l'adattabilità – Principi, requisiti e linee guida (ISO 20887:2020) (2020) Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI EN ISO 52000 (serie) – Prestazione energetica degli edifici (EPB) – Quadro generale, metodi di calcolo, dati climatici e requisiti (n.d.), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI EN ISO 52018 (serie) – Prestazione energetica degli edifici – Indicatori per l'involucro edilizio (2018), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI EN ISO 52022 (serie) – Prestazione energetica degli edifici – Proprietà termiche, solari e luminose dei componenti trasparenti (n.d.), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI EN ISO 52120-1:2022 – Prestazione energetica degli edifici – Contributo degli impianti di automazione, regolazione e gestione tecnica degli edifici – Parte 1: Quadro generale (ISO 52120-1:2021) (2022), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI ISO 21500:2021 – Project, programme and portfolio management – Context and concepts (ISO 21500:2021) (2021), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI/PdR 78:2020 – Linee guida per l'applicazione in Italia delle norme della serie UNI EN ISO 52000 (EPB – Energy Performance of Buildings) (2020), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*
- UNI/TS 11300 (serie) – Prestazioni energetiche degli edifici (varie edizioni), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Milano.*

Fonti online

- BRE – Building Research Establishment. Disponibile online (consultato il 10 aprile 2025) all'indirizzo: <https://bregroup.com/>.
- buildingSMART. Disponibile online (consultato il 4 agosto 2025) all'indirizzo: <https://www.buildingsmart.org/>.

- CIBSE. Disponibile online (consultato il 10 aprile 2025) all'indirizzo: <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-resources/engineering-guidance/technical-memoranda/>.
- CORDIS – EU research results. ACCEPT – Assistant for Quality Check during Construction Execution Processes for Energy-efficient buildings. Disponibile online (consultato il 20 aprile 2024) all'indirizzo: <https://cordis.europa.eu/project/id/636895>.
- CORDIS – EU research results. BUStoB – BUILD UP Skills to Business. Disponibile online (consultato il 20 aprile 2024) all'indirizzo: <https://cordis.europa.eu/project/id/649737/it>.
- CORDIS – EU research results. Built2Spec – Built to Specifications: Self-Inspection, 3D Modelling, Management and Quality-Check Tools for the 21st Century Construction Worksite. Disponibile online (consultato il 20 aprile 2024) all'indirizzo: <https://cordis.europa.eu/project/id/637221>.
- CORDIS – EU research results. INSITER – Intuitive Self-Inspection Techniques using Augmented Reality for construction, refurbishment and maintenance of energy-efficient buildings made of prefabricated components. Disponibile online (consultato il 2 febbraio 2024) all'indirizzo: <https://cordis.europa.eu/project/id/636063>.
- CORDIS – EU research results. P2ENDURE – Plug-and-Play product and process innovation for Energy-efficient building deep renovation, Horizon 2020 Project (Grant Agreement No 723391), 2016-2021. Disponibile online (consultato il 4 agosto 2025) all'indirizzo: <https://cordis.europa.eu/project/id/723391>.
- CORDIS – EU research results. PROF-TRAC – PROfessional multi-disciplinary TRaining and Continuing development in skills for NZEB principles. Disponibile online (consultato il 20 aprile 2024) all'indirizzo: <https://cordis.europa.eu/project/id/649473>.
- Department of Veterans Affairs (VA). Disponibile online (consultato il 7 giugno 2025) all'indirizzo: <https://www.va.gov/orm/index.asp>.
- Design for Performance (DfP) initiative. Disponibile online (consultato il 25 giugno 2025) all'indirizzo: <https://www.betterbuildingspartnership.co.uk/our-priorities/design-performance>.
- European Commission. BUILD UP. The European portal for energy efficiency and renewable energy in buildings. Disponibile online (consultato il 20 aprile 2024) all'indirizzo: <https://build-up.ec.europa.eu/en/home>.
- European Commission. European Construction Sector Observatory (ECSO). Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (DG GROW), Brussels. Disponibile online (consultato il 13 luglio 2025) all'indirizzo: <https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/observatory>.
- European Commission. (n.d.). European Green Deal: Commission proposes to boost renovation and decarbonisation of buildings. Disponibile online (consultato il 6 marzo 2024) all'indirizzo: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6683.
- European Commission. Smart readiness indicator. Disponibile online (consultato il 4 luglio 2025) all'indirizzo: <https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/smart-readiness-indicator>.

European Labour Authority (ELA). EURES – The European Job Mobility Portal. European Union, Brussels. Disponibile online (consultato il 13 luglio 2025) all'indirizzo: <https://eures.ec.europa.eu>.

Eurostat, Energy consumption in households, Statistics Explained, 2023. Disponibile online (consultato il 4 agosto 2025) all'indirizzo: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households.

Federal Highway Administration. Disponibile online (consultato il 16 febbraio 2025) all'indirizzo: <https://highways.dot.gov/Lean>.

FIEC – European Construction Industry Federation. Disponibile online (consultato il 7 giugno 2025) all'indirizzo: <https://www.fiec.eu>.

General Services Administration (GSA), Disponibile online (consultato il 4 agosto 2025) all'indirizzo: <https://www.gsa.gov/>.

IEA-EBC, Energy in Buildings and Communities Programme. Disponibile online (consultato il 4 agosto 2025) all'indirizzo: <https://www.iea-ebc.org/>.

iea-ebc.org NABERS UK (National Australian Built Environment Rating System UK), Disponibile online (consultato il 9 febbraio 2025) all'indirizzo: <https://www.nabers.gov.au/about/nabers-international/nabers-uk>.

Lean Construction Institute. Disponibile online (consultato il 20 aprile 2025) all'indirizzo: <https://leanconstruction.org/>.

National Institute of Standards and Technology (NIST). Disponibile online (consultato il 20 aprile 2025) all'indirizzo: <https://www.nist.gov/>.

Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica. Disponibile online (consultato il 16 dicembre 2024) all'indirizzo: <https://siape.enea.it/>.

UK BIM Framework / UK BIM Alliance / BSI / CDBB. Disponibile online (consultato il 12 maggio 2025) all'indirizzo: <https://imiframework.org/>.

UNI. EN 13369:2018 (2018), Common rules for precast concrete products, UNI. Disponibile online (consultato il 20 aprile 2024) all'indirizzo: <https://store.uni.com/en-13369-2018>.

Verheyen J. (2002), *TIMEPAC Session 2: X-tendo BE*. Disponibile online (consultato il 16 maggio 2025) all'indirizzo: https://timepac.eu/wp-content/uploads/2022/01/TIMEPAC_Session_2_Jan_Verheyen_X-tendo_BE.pdf.

X-tendo project (2020), *Exploring Innovative Indicators for the Next-Generation EPC Features: Smart Readiness (Deliverable D3.1)*, Buildings Performance Institute Europe (BPIE). Disponibile online (consultato il 4 agosto 2025) all'indirizzo: https://x-tendo.eu/wp-content/uploads/2020/01/D3.1_SRI.pdf.

X-tendo project (2020), *Report on Smart Readiness Indicator (SRI) (Deliverable F1)*, RDA Scientific Consultants. Disponibile online (consultato il 9 giugno 2025) all'indirizzo: https://x-tendo.eu/wp-content/uploads/2020/01/X-tendo_F1_SRI_Report_RDA.pdf.

Whole Building Design Guide (WBDG). Disponibile online (consultato il 13 luglio 2025) all'indirizzo: <https://www.wbdg.org/>.

Profili degli autori

About the Authors

Emanuele Piaia

Professore Associato in Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura presso l'Università degli Studi di Ferrara, insegna Progettazione esecutiva nel Corso di Laurea Magistrale in Architettura e Design per la sostenibilità e l'accessibilità degli spazi di vita nel Corso di Laurea Magistrale in Design di prodotto e servizio per la cultura e la salute. Presso la stessa università è membro dell'*Academic Board* dell'*International Doctorate in Architecture and Urban Planning*. La sua attività di ricerca si concentra su sostenibilità ambientale, innovazione tecnologica, transizione digitale, efficienza energetica, processi edilizi avanzati e strategie di riqualificazione e valorizzazione del patrimonio costruito, con particolare attenzione agli edifici storici e culturali. È membro della SITdA – Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura, dove è anche referente di sede per i cluster “Riuso, Riqualificazione, Manutenzione” e “Abitare”, e Delegato per la Commissione Terzo Settore. È co-fondatore della start-up innovativa INCEPTION S.r.l., spin-off dell'Università di Ferrara, dedicata alla digitalizzazione e valorizzazione del patrimonio architettonico e culturale.

emanuele.piaia@unife.it

Beatrice Turillazzi

Professoressa Associata di Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna. Architetto (Università di Firenze) e dottore di ricerca in Riqualificazione e recupero insediativo (La Sapienza Roma). Membro della SITdA – Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura, dove è anche referente di sede per i cluster “Riuso, Riqualificazione, Manutenzione” e “Patrimonio Culturale”, e membro del CIRI ICT e CIRI Edilizia e Costruzioni. Ha svolto attività di ricerca presso l'Università degli Studi di Ferrara e Firenze e parallela attività professionale con Ipostudio di Firenze, prima come collaboratrice (2000-2010), poi come Direttore Tecnico (2010-2018) e Socio (2014). È esperta di ricerca competitiva nazionale ed internazionale. Tra i temi di ricerca approfonditi: i modelli organizzativi nell'edilizia sanitaria, l'accessibilità e la manutenzione in edilizia, le tecnologie innovative e il comportamento energetico dell'edilizia sanitaria e residenziale, la modellazione BIM degli edifici, la digitalizzazione dell'ambiente costruito, il patrimonio culturale.

beatrice.turillazzi@unibo.it

Nell'epoca della transizione ecologica e della trasformazione digitale, la qualità nel settore delle costruzioni non può più essere ridotta alla sola conformità normativa o al controllo finale dei risultati. Deve essere interpretata come un processo continuo, integrato e verificabile, che attraversa l'intero ciclo di vita dell'edificio: dalla programmazione alla progettazione, dalla realizzazione alla gestione in esercizio.

Il volume esplora questa evoluzione attraverso una prospettiva interdisciplinare che intreccia aspetti tecnici, organizzativi e ambientali. Partendo dall'esperienza del progetto europeo *INSITER*, illustra metodologie avanzate per l'auto-ispezione, la tracciabilità e il monitoraggio delle prestazioni energetiche, mostrando come l'uso consapevole delle tecnologie digitali – dal Building Information Modeling (BIM) alla realtà aumentata – possa rendere la qualità un obiettivo misurabile, documentato e condiviso.

Unendo riflessione teorica e strumenti operativi, gli autori delineano una vera e propria “grammatica della qualità”, che collega requisiti, indicatori e procedure di verifica a ciascuna fase del processo edilizio, allineando modelli internazionali come il *RIBA Plan of Work* al contesto normativo e costruttivo italiano.

Ne risulta un testo di riferimento scientifico e professionale, capace di

offrire una visione aggiornata e praticabile della qualità come valore sistemico: una guida per progettare e costruire edifici più affidabili, sostenibili e coerenti con le sfide della transizione energetica e digitale.

Emanuele Piaia è architetto, PhD e professore associato di Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura all'Università di Ferrara. Le sue ricerche riguardano sostenibilità, efficienza energetica, innovazione e digitalizzazione dei processi edilizi, con particolare attenzione alla riqualificazione del patrimonio e alla gestione della qualità nel ciclo di vita dell'edificio. È membro SITdA e co-fondatore dello spin-off INCEPTION, dedicato allo sviluppo di prodotti, strategie di valorizzazione e contenuti digitali per il costruito.

Beatrice Turillazzi è architetto, PhD e professoressa associata di Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura all'Università di Bologna. Le sue attività di ricerca riguardano modelli organizzativi e processuali, accessibilità e manutenzione, innovazione tecnologica e ambientale, BIM e digitalizzazione del patrimonio costruito e storico. È membro SITdA e dei CIRI ICT ed Edilizia e Costruzioni; ha maturato esperienza accademica e professionale con Ipostudio Architetti.



FrancoAngeli
La passione per le conoscenze