Emanuele Piaia, Beatrice Turillazzi

Qualità nel processo edilizio

Progettare e realizzare edifici ad alte prestazioni energetiche



Ricerche di tecnologia dell'architettura

FrancoAngeli

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

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.

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413



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.

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

Emanuele Piaia, Beatrice Turillazzi

Qualità nel processo edilizio

Progettare e realizzare edifici ad alte prestazioni energetiche

Ricerche di tecnologia dell'architettura

FrancoAngeli

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

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 *Roberto Di Giulio* 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. *Governance* 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

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

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

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

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.

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

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 autoistruzione 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

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

consolidamento dell'evidenza, confermata da numerosi studi e casi applicativi, che nella filiera dell'industrializzazione del processo edilizio i *bottlenecks* 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

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

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

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

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.

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413

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.

Copyright © 2025 Beatrice Turillazzi. ISBN 9788835185413