



Politecnico di Bari

Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico: un approccio Archive+Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata

This is a PhD Thesis

Original Citation:

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico: un approccio Archive+Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata (Italia) e Aragona (Spagna) / Rossi, N.. - ELETTRONICO. - (2026).

Availability:

This version is available at <http://hdl.handle.net/11589/305461> since: 2026-07-20

Published version

DOI:

Publisher: Politecnico di Bari

Terms of use:

(Article begins on next page)



D.R.S.A.T.E.

POLITECNICO DI BARI

13

PhD in Rischio e Sviluppo Ambientale, Territoriale ed Edilizio

2026

Coordinatore: Prof. Francesco Fiorito

XXXVIII Ciclo

Curriculum: CEAR-10/A - DISEGNO

DICATECh

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e Chimica

Nicola Rossi

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico: un approccio Archive+ Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata (Italia) e Aragona (Spagna)

Prof. Cesare Verdoscia (*supervisore*)

DICATECh - Politecnico di Bari

Prof. Luis Augustin Hernández (*supervisore*)

Departamento de Arquitectura - Universidad de Zaragoza

Ing. Michele Buldo PhD (*co-supervisore*)

DICATECh - Politecnico di Bari



INDICE

1. INTRODUZIONE	4
1.1 Contesto e rilevanza della ricerca	1
1.2 Obiettivi della ricerca	7
1.3 Stato dell'arte e motivazione della ricerca	10
1.4 Metodologia della ricerca	14
1.5 Struttura della tesi	17
2. L'EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA: ITALIA E SPAGNA	19
2.1 Storia e normativa dell'edilizia residenziale pubblica in Italia	19
2.2 Esperienze architettoniche italiane e progettisti del settore	27
2.3 Condizione attuale dell'edilizia residenziale pubblica in Italia	35
2.4 Storia e normativa dell'edilizia residenziale pubblica in Spagna: il caso di Saragozza	43
2.5 Esperienze architettoniche spagnole e progettisti del settore: Saragozza	53
2.6 Condizione attuale dell'edilizia residenziale pubblica in Spagna: Saragozza	60
3. IL PATRIMONIO ARCHITETTONICO CONTEMPORANEO: CONOSCENZA E VALORIZZAZIONE	66
3.1 Tipologie di edilizia popolare e loro valore architettonico	66
3.2 Casi studio di conoscenza, valorizzazione e conservazione	71
3.3. Il censimento delle architetture contemporanee e il loro stato attuale	76
3.4 Digitalizzazione e strumenti innovativi per la gestione edilizia	83
4. BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) E HBIM	91
4.1 Stato dell'arte sul BIM e HBIM	91

4.2 Applicazioni del BIM per l'edilizia residenziale pubblica	102
4.3 L'integrazione del BIM nei processi di conoscenza e valorizzazione	114
5. METODOLOGIE DI RILIEVO PER IL PATRIMONIO ARCHITETTONICO	125
5.1 Metodologie di rilievo tradizionali e innovative	125
5.2 Laser scanner e fotogrammetria per il rilievo architettonico	131
5.3 Scan-to-BIM	141
5.4 Gli archivi e le tecniche di conservazione e digitalizzazione degli elaborati	150
6. L'ESPERIENZA CON A.R.C.A. CAPITANATA	158
6.1 L'Ente e le sue attività	158
6.2 Problematiche nella gestione del patrimonio edilizio	161
6.3 Come la ricerca può supportare l'Ente	167
7. DEFINIZIONE DEL WORKFLOW OPERATIVO	172
7.1 Introduzione al workflow	172
7.2 Fasi del workflow	177
7.2.1. <i>Data collection</i>	177
7.2.2. <i>Analysis of model uses</i>	180
7.2.3. <i>Analysis and structuring of archival data</i>	190
7.2.4. <i>Survey</i>	195
7.2.5. <i>Post-processing</i>	199
7.2.6. <i>Data coordination</i>	202
7.2.7. <i>BIM authoring</i>	207
7.2.8. <i>Data integration</i>	214
7.2.9. <i>Quality control</i>	220
7.2.10. <i>openBIM export</i>	225

8. CASI STUDIO E APPLICAZIONE DEL WORKFLOW	229
8.1 Criteri di selezione dei casi studio	229
8.1.1 <i>Data collection</i>	235
8.2 Digitalizzazione e modellazione BIM dei casi studio	238
8.2.1 <i>Analysis and structuring of archival data</i>	239
8.2.2 <i>Survey</i>	241
8.2.3 <i>Post-processing</i>	247
8.2.4 <i>Data coordination</i>	252
8.2.5 <i>BIM authoring</i>	255
8.2.6 <i>Data integration</i>	257
8.2.7 <i>Quality control</i>	259
8.2.8 <i>openBIM export</i>	262
8.3 Applicazione del workflow e valutazione dell'efficacia	264
9. ANALISI DEI RISULTATI	268
9.1 Benefici e criticità riscontrate	268
9.2 Limiti della ricerca	275
10. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	279
11. BIBLIOGRAFIA	286

ABSTRACT ESTESO

Il patrimonio architettonico residenziale pubblico del secondo Novecento, realizzato nell'ambito dei grandi programmi di edilizia sociale in Italia e in Spagna, rappresenta una testimonianza storicamente e architettonicamente significativa, spesso progettata da figure di primo piano del panorama disciplinare. Questo patrimonio è oggi soggetto a un circolo vizioso nel quale la prossimità temporale ne ostacola il riconoscimento culturale, l'assenza di riconoscimento scoraggia l'investimento di risorse conoscitive e la mancanza di conoscenza ne impedisce la valorizzazione, producendo un progressivo scivolamento verso l'anonimato. A questa condizione di invisibilità culturale si sovrappongono le condizioni socioeconomiche critiche che caratterizzano molti di questi contesti abitati e le esigenze di tutela della privacy degli inquilini, le quali rendono ampie porzioni del manufatto inaccessibili e le procedure convenzionali di rilievo integrale spesso inapplicabili.

La presente ricerca affronta questa duplice criticità proponendo e validando un workflow metodologico originale, denominato Archive+Scan-to-BIM, concepito per la costruzione di modelli informativi BIM in contesti nei quali l'accessibilità fisica è strutturalmente limitata. L'originalità del contributo risiede nell'integrazione sistematica di tecniche consolidate e, soprattutto, nel fatto che il workflow assume l'accessibilità parziale come condizione di partenza del processo e non come eccezione da gestire volta per volta. Il metodo integra il rilievo laser scanner delle parti fisicamente accessibili (esterni, spazi comuni, eventuali unità campione) con la ricostruzione model-based delle zone inaccessibili, ricavata dalla documentazione d'archivio originale reperita presso archivi storici e istituzionali. La componente archivistica costituisce un'operazione di ricerca storica che fonda le decisioni di modellazione per le zone non rilevabili, richiedendo competenze critiche analoghe a quelle della storia dell'architettura.

Il workflow è strutturato in dieci fasi operative sequenziali, dalla raccolta dei dati e dalla definizione degli usi del modello fino all'esportazione in formato openBIM, ed è stato applicato a quattro casi studio selezionati in due contesti geografici distinti: il quartiere INA-Casa di Cerignola e il complesso ISES di Foggia, progettati da Mario Ridolfi e Wolfgang Frankl, nel contesto italiano; la tipologia a torre e quella lineare del Conjunto

Balsas de Ebro Viejo a Saragozza, progettato da Fausto García Marco, nel contesto spagnolo.

La ricerca persegue quattro obiettivi convergenti: la definizione e validazione del workflow; la produzione di una lettura storica e tipologica dei casi studio come condizione preliminare alla corretta modellazione; la progettazione di modelli direttamente utilizzabili dall'ente gestore, sviluppati in collaborazione con A.R.C.A. Capitanata per i casi italiani; la verifica della replicabilità del metodo in contesti geografici e istituzionali diversi. L'affidabilità dei dati viene resa esplicita e tracciabile all'interno del modello attraverso criteri di classificazione degli elementi in funzione della fonte, rilievo diretto o ricostruzione documentaria, e del relativo livello di attendibilità. I risultati evidenziano i benefici dell'integrazione sistematica delle fonti d'archivio nel processo Scan-to-BIM e ne delineano al contempo i limiti, offrendo indicazioni per futuri sviluppi legati all'automazione dei processi, all'estensione del metodo a scale patrimoniali più ampie e al rafforzamento delle metriche di validazione geometrica.

Parole chiave:

Archive+Scan-to-BIM; Scan-to-BIM; Edilizia Residenziale Pubblica; Rilievo laser scanner; Accessibilità limitata; Ricerca d'archivio; Valorizzazione del patrimonio costruito; Affidabilità del dato.

EXTENDED ABSTRACT

The public residential architectural heritage of the second half of the twentieth century, built within the framework of major social housing programmes in Italy and Spain, represents a historically and architecturally significant body of work, often designed by leading figures in the discipline. This heritage is now caught in a vicious cycle in which its temporal proximity hinders cultural recognition, the lack of recognition discourages the investment of cognitive resources, and the absence of knowledge prevents its valorization, producing a progressive slide into anonymity. Compounding this condition of cultural invisibility are the critical socioeconomic conditions that characterize many of these inhabited contexts and the need to protect tenants' privacy, which render large portions of the building fabric inaccessible and conventional comprehensive survey procedures often inapplicable.

This research addresses this twofold challenge by proposing and validating an original methodological workflow, termed Archive + Scan-to-BIM, designed for the construction of BIM information models in contexts where physical accessibility is structurally limited. The originality of the contribution lies in the systematic integration of established techniques and, above all, in the fact that the workflow assumes partial accessibility as a starting condition of the process rather than as an exception to be managed on a case-by-case basis. The method combines laser scanner surveying of physically accessible areas (exteriors, common spaces, sample dwelling units where available) with model-based reconstruction of inaccessible zones, derived from original archival documentation retrieved from historical and institutional archives. The archival component constitutes a historical research operation that underpins modelling decisions for areas that cannot be surveyed, requiring critical skills akin to those of architectural history.

The workflow is structured in ten sequential operational phases, from data collection and the definition of model uses through to openBIM export, and has been applied to four case studies selected in two distinct geographical contexts: the INA-Casa neighbourhood in Cerignola and the ISES housing complex in Foggia, designed by Mario Ridolfi and Wolfgang Frankl, in the Italian context; and the tower and linear

typologies of the Conjunto Balsas de Ebro Viejo in Zaragoza, designed by Fausto García Marco, in the Spanish context.

The research pursues four converging objectives: the definition and validation of the workflow; the production of a historical and typological reading of the case studies as a prerequisite for correct modelling; the design of models directly usable by the managing authority, developed in collaboration with A.R.C.A. Capitanata for the Italian cases; and the verification of the method's replicability across different geographical and institutional contexts. Data reliability is made explicit and traceable within the model through classification criteria that categorize elements according to their source, whether direct survey or documentary reconstruction, and the corresponding level of reliability. The results highlight the benefits of systematically integrating archival sources into the Scan-to-BIM process while also delineating its limitations, offering directions for future developments related to process automation, the extension of the method to broader heritage scales, and the strengthening of geometric validation metrics.

Keywords:

Archive+Scan-to-BIM; Scan-to-BIM; Post-war public housing; Laser Scanning; Limited accessibility; Archival research; Built heritage valorisation; Data reliability.

1. INTRODUZIONE

1.1 Contesto e rilevanza della ricerca

Il patrimonio architettonico prodotto nella seconda metà del Novecento occupa, nel contesto italiano ed europeo, una posizione per certi versi contraddittoria. Si tratta di un insieme vastissimo di edifici, quartieri e sistemi insediativi che costituiscono il tessuto connettivo delle città contemporanee, frutto in larga parte di un investimento progettuale e civile straordinario per impegno e qualità delle intenzioni. Eppure, questo patrimonio è spesso escluso dai circuiti della tutela formalizzata, scarsamente studiato nelle sue specificità costruttive e tipologiche, e quasi del tutto assente dall'orizzonte delle politiche di valorizzazione. La sua presenza fisica è evidente, impossibile da ignorare nel contesto urbano, ma la sua presenza culturale rimane debole, esposta all'erosione del tempo e senza che si attivino forme di attenzionamento che ne garantirebbero una trasmissione più consapevole nel futuro.

Questa esclusione deriva da una sorta di gerarchia che si è consolidata nella cultura della tutela, orientata a riconoscere valore ai requisiti di eccezionalità e antichità/monumentalità del costruito. Questa logica interpreta l'architettura contemporanea residenziale, talvolta seriale e realizzata in grandi volumi, come una categoria residuale rispetto ai manufatti dotati di unicità accertata. La definizione di "architettura minore del XX secolo", consolidata nel dibattito disciplinare, descrive una precisa posizione gerarchica interna ai sistemi di attribuzione del valore, configurandosi come una categoria distinta da valutazioni di ordine estetico. L'utilizzo del termine "minore" qualifica esclusivamente lo statuto della tutela, individuando una condizione di riconoscimento formale che prescinde dalla qualità intrinseca dell'opera. (Albani & Di Biase, 2013). In questo senso la minoranza rappresenta una costruzione culturale che può essere messa in discussione e modificata più che una proprietà dell'architettura. A scala europea, il legame tra patrimonio del Novecento e sistemi normativi di tutela è stato analizzato in profondità, rilevando come le politiche di

conservazione si confrontino con limiti temporali e concettuali che tracciano confini artificiali tra opere ritenute degne di protezione e testimonianze esposte a trasformazione irreversibile (Carughi & Visone, 2017). Il patrimonio architettonico del secondo Novecento costituisce un insieme poco conosciuto e fragile, la cui vulnerabilità deriva tanto da cause materiali quanto da cause culturali che si alimentano reciprocamente (Vittorini, 2022). La prossimità temporale della sua realizzazione produce un effetto paradossale che rende questi edifici familiari, consueti, percepiti come "normali" e dunque sottratti a quello sguardo distaccato e analitico che normalmente precede il riconoscimento del valore storico. La loro normalità è quindi al tempo stesso la loro forza, poiché sono testimonianza di come si immaginava, costruiva e viveva la città, e la causa principale della loro marginalizzazione culturale.

Ne deriva un vero e proprio circolo vizioso secondo il quale, affinché un patrimonio sia valorizzato occorre che sia conosciuto (Fig. 1); ma la conoscenza richiede investimento di risorse, che a sua volta presuppone un riconoscimento del valore; e il riconoscimento non si produce in assenza di conoscenza.



Fig. 1 - Circolo vizioso a cui è soggetto il "patrimonio grigio".

Questo meccanismo mantiene una quota rilevante del costruito novecentesco in una condizione di progressivo scivolamento verso l'anonimato, privandolo della capacità di narrare la storia urbana di cui è portatore.

All'interno di questo panorama, l'Edilizia Residenziale Pubblica (di seguito ERP) del secondo dopoguerra rappresenta il caso più emblematico e al tempo stesso più critico. I grandi programmi di costruzione pubblica avviati in Italia a partire dal 1949 come il Piano INA-Casa (Istituto Nazionale delle Assicurazioni - Gestione Case per Lavoratori), l'ISES (Istituto per lo Sviluppo dell'Edilizia Sociale), i programmi UNRRA-Casas (United Nations Relief and Rehabilitation Administration - Comitato Amministrativo Soccorso ai Senzatetto) e le successive iniziative degli IACP (Istituti Autonomi per le Case Popolari), hanno prodotto un numero straordinario di architetture, spesso progettate da figure di primo piano del panorama architettonico nazionale. Mario Ridolfi, Ludovico Quaroni, Adalberto Libera, Carlo Aymonino e molti altri hanno consegnato a questo patrimonio opere che costituiscono all'epoca (e tuttora) una delle più importanti e diffuse esperienze di realizzazione di edilizia sociale, un momento irripetibile nella storia dell'architettura italiana del Novecento (Di Biagi, 2001). Questa non era edilizia anonima, era frutto di concorsi nazionali, di manuali tecnici di alta qualità, di un investimento progettuale che intendeva fare dell'abitazione popolare uno strumento esplicito di riforma sociale e urbana.

Nonostante ciò, distanza di oltre settant'anni, questi quartieri si trovano spesso in uno stato di degrado fisico e di quasi totale invisibilità culturale. Già nei primi anni del duemila si registrava l'assenza di una condivisa consapevolezza del valore patrimoniale dei quartieri realizzati e di un conseguente interesse per la loro riqualificazione e tutela (Di Biagi, 2001), una condizione che nei decenni successivi non ha conosciuto inversioni significative. Edifici che costituiscono a metà Novecento una stagione irripetibile di qualità progettuale e investimento civile sono oggi ridotti a "patrimoni

grigi¹, sospesi tra il valore d'uso che li mantiene abitati e l'assenza di riconoscimento che ne accelera il deterioramento. Proprio questa contraddizione, tra la qualità originaria del progetto e la condizione attuale di trascuratezza, rende la questione particolarmente urgente sul piano scientifico e civile.

La questione della conoscenza di questo patrimonio si intreccia in modo inseparabile con quella della sua gestione. Un patrimonio non documentato non può essere governato in maniera efficace, e un patrimonio gestito in modo approssimativo si deteriora più rapidamente di quanto qualsiasi intervento manutentivo ordinario possa compensare. La prospettiva della rigenerazione urbana integrata che considera gli interventi sull'ERP come strategie di valorizzazione complessiva capaci di produrre miglioramenti nell'identità architettonica, nell'efficienza energetica e nella qualità degli spazi collettivi, non come operazioni puntuali di manutenzione, presuppone una base conoscitiva accurata e strutturata che, nella grande maggioranza dei casi, non è disponibile (Paris & Bianchi, 2015). La costruzione di questa base conoscitiva è dunque una condizione preliminare della valorizzazione e una delle principali carenze che la ricerca scientifica applicata al patrimonio contemporaneo è chiamata a colmare.

A complicare ulteriormente questo scenario interviene un elemento che distingue l'ERP dal patrimonio storico-monumentale, e che costituisce una delle questioni più problematiche in questa ricerca, ovvero la questione dell'accessibilità. Gli edifici monumentali (chiese, palazzi, complessi con valenza storica), sono nella grande parte dei casi visitabili e rilevabili nella loro interezza. L'ERP abitata segue una logica diversa, quella della privacy degli inquilini, e questo costituisce un vincolo che, molto spesso, impedisce l'accesso alle unità abitative. Accanto a questo vincolo, in molti contesti ERP opera una condizione di fragilità sociale che rende la questione più complessa. Si tratta quindi di un ostacolo, di una condizione, che è permanente, intrinseca alla natura del

¹ L'espressione "patrimonio grigio" è entrata nel lessico della critica architettonica per descrivere quegli oggetti edilizi che, pur non essendo ancora considerati "storici" dal punto di vista legislativo, non sono più "nuovi" dal punto di vista tecnologico. Il colore grigio evoca sia la materialità prevalente del cemento, sia quella zona d'ombra normativa in cui l'assenza di vincoli di tutela espone gli edifici a interventi di efficienza energetica (come i "cappotti" termici) che ne cancellano i dettagli originali.

patrimonio abitato, che produce sistematicamente delle zone inaccessibili, delle "zone d'ombra", all'interno di qualsiasi processo di rilievo e documentazione.

Le ricadute di questa condizione sui processi di acquisizione della conoscenza architettonica sono rilevanti, nonostante siano frequentemente trascurate nella pratica disciplinare. L'accesso alle informazioni riguardanti le distribuzioni interne e le tecnologie proprie delle singole unità, rimane precluso ai sistemi di rilievo diretto. Le trasformazioni avvenute nel tempo all'interno degli appartamenti rimangono invisibili. Il dato metrico e morfologico che è possibile ottenere attraverso il rilievo diretto risulta inevitabilmente parziale, accurato per l'esterno, le facciate e gli spazi comuni, e deficitario per la componente interna.

La letteratura sull'Heritage Building Information Modeling (di seguito HBIM) applicato al patrimonio moderno ha affrontato con andamento crescente la questione della digitalizzazione e della valorizzazione, proponendo metodologie e strumenti di significativa qualità. Le review disponibili sul tema documentano tuttavia uno sviluppo metodologico concentrato prevalentemente sul patrimonio monumentale e già storicizzato, con applicazioni al patrimonio più moderno e residenziale ancora limitate (López et al., 2018). Quindi il problema dell'accessibilità limitata come condizione di partenza del patrimonio abitato non ha trovato un trattamento esplicitamente metodologico. Gli approcci esistenti presuppongono nella maggior parte dei casi la possibilità di un rilievo integrale, oppure affrontano la parzialità della documentazione come una eccezione da gestire caso per caso, anziché come prassi da incorporare nell'ideazione del processo stesso (Castellano-Román et al., 2022; Pontrandolfi, 2020). L'assenza di un approccio progettato specificamente per operare in queste condizioni rappresenta di conseguenza il vuoto conoscitivo più rilevante che la presente ricerca si propone di colmare.

Questo patrimonio garantisce un'opportunità operativa priva di equivalenti nell'edilizia privata diffusa, data la concentrazione della proprietà in un unico soggetto gestore. Gli enti pubblici responsabili dell'ERP (A.R.C.A., Agenzia Regionale per la Casa e l'Abitare;

ATER, Azienda Territoriale per l'Edilizia Residenziale e le loro equivalenti europee) amministrano infatti interi quartieri operando in qualità di soggetto giuridico unitario. Questa peculiarità rappresenta un vantaggio strategico di primo ordine per l'implementazione di politiche di conoscenza e gestione digitalizzata su larga scala (Paris & Bianchi, 2015). Laddove la frammentazione della proprietà rende praticamente impossibile l'adozione di strategie unitarie nell'edilizia privata diffusa, l'ERP consente in linea di principio di pianificare azioni di documentazione e valorizzazione coordinate. La transizione da una gestione analogica e frammentaria a una gestione digitale, supportata da modelli informativi strutturati e aggiornabili costituisce una trasformazione metodologica capace di orientare la sostenibilità economica degli enti e la permanenza del patrimonio amministrato, superando la funzione di semplice aggiornamento tecnologico.

Il Building Information Modeling (di seguito BIM), nella sua declinazione applicata al patrimonio esistente (HBIM), è lo strumento più adeguato a rispondere a questa esigenza. La sua specificità rispetto ad altri strumenti di documentazione digitale risiede nella natura di sistema informativo strutturato propria della metodologia, superando la capacità di generare restituzioni geometriche precise che risultano d'altronde raggiungibili anche mediante strumentazioni meno complesse. Il modello BIM si configura propriamente come un database spaziale in cui geometria, semantica, attributi materiali, dati prestazionali e riferimenti documentali coesistono entro un'unica struttura dati predisposta per essere costantemente interrogata e aggiornata. La letteratura ha individuato le criticità inerenti all'integrazione del BIM per il costruito rintracciandole nelle stesse condizioni che caratterizzano l'ERP, riguardanti la gestione di database incompleti o obsoleti, la difficoltà di aggiornare il modello nel tempo e il trattamento dell'incertezza informativa in quanto componente intrinseca del processo (Volk et al., 2014).

Al termine di questa ricognizione rimangono tre nodi tematici che definiscono l'orientamento dell'intera ricerca: un patrimonio storicamente e architettonicamente significativo che non riceve riconoscimento adeguato; un patrimonio che non può

essere documentato per intero perché è abitato; metodologie per operare in questa doppia condizione. La questione su come costruire una conoscenza sistematica su un patrimonio che non può essere rilevato integralmente rappresenta il fulcro di questa ricerca, che si propone di rispondere attraverso la definizione degli obiettivi specifici e l'elaborazione del workflow metodologico integrato, costituendone il contributo principale.

1.2 Obiettivi della ricerca

L'obiettivo principale della ricerca consiste nella definizione e validazione sperimentale di un workflow operativo replicabile, denominato "Archive+Scan-to-BIM", calibrato specificamente per la documentazione, la conoscenza e la valorizzazione del patrimonio residenziale pubblico del secondo Novecento in condizioni di accessibilità limitata, orientata a produrre modelli informativi direttamente utilizzabili dagli enti gestori. L'originalità del contributo non sta tanto nelle singole tecnologie impiegate (laser scanning, fotogrammetria, modellazione parametrica) che appartengono a un repertorio tecnico ormai consolidato nella letteratura disciplinare, quanto nella loro integrazione e soprattutto, nel fatto che il workflow è progettato per operare con l'accessibilità parziale come condizione di partenza del processo, non come eccezione da gestire volta per volta. La maggior parte degli approcci Scan-to-BIM esistenti presuppone, implicitamente o esplicitamente, la possibilità di rilevare l'intero manufatto, e un metodo che non tenga conto della parzialità strutturale del dato risulta inapplicabile alla scala del problema reale. L'assenza nella letteratura HBIM di protocolli esplicitamente concepiti per valorizzare un patrimonio a partire da rilievi incompleti è stata da più autori evidenziata come una delle principali carenze metodologiche del settore (Castellano-Román et al., 2022; Mazzei et al., 2024).

La validazione del workflow avviene attraverso l'applicazione di esso su quattro casi studio selezionati in due contesti geografici distinti: il quartiere INA-Casa di Cerignola e il complesso ISES di Foggia per il contesto italiano; la tipologia a torre e quella lineare del Conjunto Balsas de Ebro Viejo a Saragozza per il contesto spagnolo. Questi quattro casi studio condividono la medesima condizione originale di ERP, oltre a essere affini per cronologia e interesse architettonico. Li accomunano inoltre le criticità legate all'accessibilità degli spazi e alla frammentazione della documentazione, nonostante le differenze nei contesti normativi e gestionali. È proprio la combinazione dell'analogia di contesto che rende i casi studio idonei tanto alla costruzione del metodo quanto alla verifica della sua trasferibilità geografica.

Il workflow si articola in dieci fasi sequenziali: *data collection, analysis of model uses, analysis and structuring of archival data, survey, post-processing, data coordination, BIM authoring, data integration, quality control e openBIM export*. L'integrazione tra rilievo diretto delle parti fisicamente accessibili (esterni, spazi comuni, unità campione) e ricostruzione model-based da fonti archivistiche per le zone d'ombra rappresenta una strategia consapevole. L'affidabilità dei dati viene resa esplicita e tracciabile direttamente all'interno del modello, garantendo il rigore della metodologia adottata. Le fasi di *analysis and structuring of archival data* e di *data integration* assolvono precisamente questo compito, non limitandosi ad alimentare il modello con informazioni aggiuntive, ma stabilendo il livello di attendibilità di ogni componente, distinguendo ciò che è stato rilevato da ciò che è stato ricostruito per via documentaria.

Parallelamente all'obiettivo metodologico, la ricerca persegue una finalità conoscitiva di natura storica e tipologica, da intendersi come condizione preliminare della corretta costruzione del modello. Comprendere le logiche insediative, tipologiche e costruttive che governano i quartieri ERP oggetto di studio è necessario per produrre modelli semanticamente coerenti, capaci di restituire oltre alla geometria dell'esistente anche una sua leggibilità storica e architettonica. La componente "Archive" del workflow rappresenta un'operazione di ricerca storica e un atto tecnico, superando la funzione di semplice fase di acquisizione dati. In questo senso, l'attività integra l'indagine sulle fonti

con le pratiche tecniche del rilievo per definire la base informativa del progetto. L'indagine d'archivio operando attraverso la selezione delle fonti, la valutazione dell'attendibilità e l'interpretazione delle discrepanze tra progetto e realizzazione, richiede competenze critiche analoghe a quelle della storia dell'architettura e produce, come esito operativo, la base documentale su cui si fondano le decisioni di modellazione per le zone non accessibili. Questo nesso tra conoscenza storica e produzione tecnica del modello distingue l'approccio proposto dalle pratiche correnti di digitalizzazione del costruito, nelle quali la ricerca archivistica è generalmente trattata come attività preliminare e accessoria anziché come struttura portante del processo (Conte & Rossi, 2019; Pontrandolfi, 2020).

Il terzo obiettivo riguarda la trasferibilità del workflow nella sua dimensione gestionale. La ricerca è stata condotta in collaborazione con A.R.C.A. Capitanata per i casi italiani e questa prossimità ha condizionato le scelte metodologiche fin dall'inizio del percorso. La distanza tra modelli BIM prodotti in ambito accademico e la loro effettiva adozione nella pratica gestionale è un problema ricorrente nella letteratura HBIM (Volk et al., 2014). Questa tematica è stata affrontata dall'inizio nel percorso di ricerca ed è stata inclusa come criterio di progettazione del workflow stesso attraverso la definizione dei "model uses", i quali condizionano il livello di sviluppo geometrico e informativo di ogni componente, evitando tanto il sottodimensionamento quanto quell'eccesso di dettaglio che produce modelli geometricamente sofisticati ma inutilizzabili nella pratica gestionale.

La struttura aperta del workflow, predisposta per accogliere dati futuri attraverso parametri compilabili dall'ente, e la scelta di piattaforme di condivisione accessibili rispondono all'intenzione di rendere il modello uno strumento realmente adottabile dall'amministrazione che gestisce il patrimonio.

Il quarto obiettivo riguarda la replicabilità del metodo. I quattro casi studio sono stati selezionati in due contesti geografici e normativi distinti, Capitanata e Aragona, che condividono le stesse condizioni di fondo ma differiscono per prassi costruttive, quadro

istituzionale e organizzazione della gestione patrimoniale. Queste differenze costituiscono il banco di prova su cui misurare la robustezza del workflow e la sua adattabilità a condizioni operative che variano da un contesto all'altro, offrendo uno strumento applicabile alla scala del patrimonio residenziale pubblico europeo del secondo Novecento.

I quattro obiettivi: metodologico, conoscitivo, gestionale e comparativo, convergono in una ricerca che li tratta come elementi inscindibili dello stesso processo. Produrre un workflow standardizzato significa generare conoscenza sul patrimonio, porre le basi per la sua gestione attraverso un processo che trascende il singolo caso studio. La rappresentazione, di conseguenza, rimane strettamente legata alla conoscenza del patrimonio costruito e alla sua gestione.

1.3 Stato dell'arte e motivazione della ricerca

La necessità di definire un workflow operativo specifico per la digitalizzazione e la valorizzazione del patrimonio ERP del secondo Novecento nasce dalla constatazione dell'esistenza di tre livelli di criticità che la letteratura ha affrontato separatamente senza produrre, fino ad oggi, un approccio integrato capace di rispondere alle specificità di questo patrimonio.

Il primo livello di criticità riguarda la natura dell'informazione tecnica all'interno della Pubblica Amministrazione che gestisce l'ERP. Questa è caratterizzata da una ricorrente dissociazione tra il dato amministrativo e il dato fisico dell'edificio. Mentre le informazioni relative ai contratti di locazione, ai canoni e alle anagrafiche degli inquilini sono spesso migrate su piattaforme digitali gestionali, il dato costruttivo, la morfologia dell'edificio, la sua consistenza materica, la storia delle sue trasformazioni, sono rimasti ancorati a supporti cartacei statici, dislocati in archivi fisici non sempre accessibili o ordinati. Questa discrepanza nasce in parte da una cultura della gestione storicamente

sbilanciata verso l'ambito giuridico-patrimoniale, lasciando in secondo piano la cura degli aspetti tecnici. La perdita di informazione avviene molto spesso nei passaggi tra le diverse fasi della vita di un'opera (D'Auria, 2013). Nel modello sequenziale classico (progettazione, costruzione, gestione) ogni transizione comporta una drastica riduzione del contenuto informativo e quindi il gestore "riceve" il manufatto fisico ma raramente con una documentazione aggiornata, ereditando un'opera di cui non sempre detiene una conoscenza piena e aggiornata. Nel caso dell'ERP del dopoguerra, realizzata in condizioni di emergenza abitativa e con l'obiettivo della rapidità, questo fenomeno è stato accentuato, le varianti in corso d'opera erano frequenti, dettate dalla disponibilità dei materiali e quasi mai registrate con rigore negli elaborati finali. Di conseguenza, l'ente gestore si trova oggi a operare su edifici che non corrispondono, se non parzialmente, ai disegni conservati nei propri archivi, rendendo spesso gli interventi successivi un'operazione esplorativa ad alto rischio di imprevisti.

Il secondo livello riguarda invece lo stato dell'arte sul tema HBIM e la sua applicabilità al patrimonio moderno diffuso. Le revisioni della letteratura a riguardo rivelano una polarizzazione della ricerca verso casi studio eccezionali, per lo più monumenti storici, cattedrali, siti archeologici o edifici di alto pregio architettonico, nei quali la sfida principale è la rappresentazione di forme complesse e irregolari (López et al., 2018). Per questi manufatti, le metodologie Scan-to-BIM si sono evolute nella direzione di una sempre maggiore densità del dato geometrico e di una modellazione manuale volta a restituire la singolarità dell'oggetto, questo approccio risulta però inapplicabile, sia tecnicamente che economicamente, quando viene traslato sul patrimonio dell'ERP. L'edilizia residenziale pubblica è caratterizzata da serialità, ripetizione e standardizzazione, e da una scala urbana che non ammette la modellazione manuale di ogni singolo elemento. La principale barriera all'adozione del BIM per l'edilizia esistente diffusa è costituita proprio dall'assenza di processi efficaci per la conversione Scan-to-BIM su patrimoni seriali e dalla mancanza di librerie di oggetti parametrici specifiche per l'architettura del Novecento (López et al., 2018; Volk et al., 2014). L'approccio consolidato per il patrimonio monumentale, quindi, non è scalabile alla dimensione

dell'ERP, dove gli enti gestori amministrano centinaia di edifici con risorse limitate e dove la domanda non è la documentazione esaustiva del singolo manufatto ma la costruzione progressiva di una base conoscitiva operabile sull'intero parco immobiliare.

Il terzo livello di criticità sposta l'attenzione della ricerca, dal piano più tecnico a quello che potremmo definire socio-operativo, e riguarda quindi il confronto con la realtà abitata di questi quartieri. A differenza dei monumenti vuoti o musealizzati che popolano la letteratura HBIM, l'ERP è un "organismo vivo" e molto spesso attraversato da condizioni di fragilità sociale (specialmente al Sud Italia) dove il disagio abitativo non è solo una statistica socio-economica, ma un fattore determinante per l'accessibilità e la conoscibilità del patrimonio (Puccini & Tomassi, 2019). In molti di questi contesti, il rapporto tra inquilino ed ente gestore è segnato da una diffidenza sedimentata nel tempo, che spesso rende qualsiasi forma di accesso tecnico agli alloggi un'operazione tutt'altro che scontata. Questa caratteristica, di conseguenza, trasforma l'impossibilità di rilevamento in una condizione consolidata e non occasionale, con la quale qualsiasi strategia di digitalizzazione deve fare i conti.

Un approccio basato esclusivamente sulle tecnologie di acquisizione metrica, per quanto avanzato, può restituire con precisione l'involucro esterno, gli spazi comuni o le coperture, ma lascia completamente scoperto il nucleo distributivo interno dell'edificio. La questione dell'incertezza nei processi HBIM è stata affrontata con approcci concepiti per gestire edifici con informazioni limitate, nei quali l'incompletezza informativa è trattata come condizione operativa che il modello deve saper incorporare (Mazzei et al., 2024). Queste sperimentazioni si sono tuttavia concentrate su edifici abbandonati e parzialmente in rovina, la cui inaccessibilità è di natura prettamente fisica. Se il rilievo delle porzioni interne è precluso, diventa necessario allora sperimentare ed elaborare dei protocolli per la ricostruzione delle zone d'ombra a partire dalle fonti disponibili.

Alla luce di ciò possiamo dire che l'integrazione del dato d'archivio diventa la chiave operativa dell'intero processo. Il documento d'archivio (piante, sezioni, dettagli costruttivi dell'epoca, relazioni e fotografie) pur con tutte le sue incertezze e le sue discrepanze rispetto al costruito, contiene tutte le informazioni che consentono di ipotizzare con ragionevole affidabilità la configurazione degli spazi interni non visitabili. L'obiettivo della presente ricerca è quindi quello di trasformare questa operazione di integrazione, oggi lasciata all'istinto e alla soggettività del singolo operatore, in un workflow codificato, validato e replicabile. Si tratta di stabilire criteri per ponderare l'affidabilità delle diverse fonti, decidendo quando privilegiare il disegno d'archivio, quando la nuvola di punti dell'involucro esterno e come proiettare le informazioni acquisite sulle parti non accessibili. Il risultato è un modello informativo in cui ogni elemento dichiara il proprio livello di attendibilità rispetto alla fonte da cui deriva, senza alcuna pretesa di documentazione integrale di una realtà che, in queste condizioni, rimane per definizione parzialmente inaccessibile.

La digitalizzazione, se condotta non come semplice acquisizione geometrica ma come ricostruzione critica della vita dell'edificio, diventa un atto di risignificazione. Restituire agli enti gestori, e di riflesso alla comunità, una conoscenza ordinata, accessibile e visualizzabile dei propri luoghi di vita è il primo passo per innescare processi di rigenerazione fondati sulla consapevolezza delle risorse esistenti. Il modello BIM, arricchito dai dati d'archivio e validato dal rilievo esterno, può diventare l'interfaccia operativa per la gestione della città pubblica, consentendo di simulare scenari di intervento, ottimizzare le risorse manutentive e prolungare la vita utile di un patrimonio che costituisce ancora oggi l'unica risposta concreta al diritto alla casa per una parte significativa della popolazione.

1.4 Metodologia della ricerca

Il metodo *Archive + Scan-to-BIM* si fonda su una distinzione operativa tra due categorie di spazio: le parti fisicamente accessibili dell'edificio, documentate attraverso rilievo strumentale diretto con laser scanner terrestre; le parti inaccessibili ricostruite attraverso l'elaborazione critica della documentazione d'archivio originale. Questa suddivisione rispecchia una struttura metodologica che assegna a ciascuna fonte il ruolo per cui è più adeguata e che gestisce in modo esplicito la diversa affidabilità delle due componenti nel modello finale. Il dato strumentale fornisce la gabbia metrica dell'edificio, verificabile, per l'involucro e gli spazi comuni; la documentazione d'archivio restituisce le informazioni relative alle parti non rilevabili direttamente. Il ruolo del documento d'archivio nella ricostruzione digitale del patrimonio è riconosciuto dalla letteratura ed è in grado di restituire la genesi e la logica dell'edificio, consentendo la riunificazione virtuale di una documentazione spesso dispersa tra archivi diversi (Conte & Rossi, 2019). L'integrazione tra fonti bidimensionali e tridimensionali nella costruzione di modelli digitali è una pratica consolidata per il patrimonio perduto o parzialmente compromesso (Gherardini & Sirocchi, 2022).

Il workflow si articola in dieci fasi sequenziali, la cui logica è sintetizzata di seguito e la cui descrizione analitica è sviluppata nel Capitolo 7.

La prima fase, *data collection*, consiste nella raccolta sistematica di tutte le fonti disponibili sull'edificio e sul contesto urbano in cui è inserito (documentazione d'archivio conservata presso gli enti gestori o negli archivi storici, cartografia, fonti bibliografiche) condotta prima dell'avvio di qualsiasi operazione di rilievo. Questa precedenza è deliberata poichè la conoscenza preliminare dell'edificio orienta le successive fasi del processo e consente di pianificare il rilievo sapendo in anticipo quali porzioni saranno accessibili e quali dovranno essere ricostruite per via documentaria. La fase di *data collection* è un'indagine conoscitiva che richiede competenze critiche analoghe a quelle della ricerca storico-archivistica e che produce un corpus documentale eterogeneo, la cui strutturazione e il cui collegamento al modello digitale costituiscono una sfida specifica dei processi HBIM (Cursi et al., 2022).

La seconda fase, *analysis of model uses*, definisce gli usi previsti per il modello BIM che nella ricerca coincidono con la documentazione storico-architettonica, il supporto alla gestione e alla manutenzione del patrimonio, e la condivisione del modello con l'ente gestore. Da questa definizione discendono i Level of Information Need (LOIN), formalizzati dalla norma UNI EN 17412-1:2020, che stabiliscono per ciascuna categoria di elementi il livello minimo di informazione necessario, in termini di requisiti geometrici, informativi e documentali. I LOIN non vengono assegnati in modo unitario all'intero edificio, ma differenziati per categoria di elementi e per fonte di derivazione, distinguendo le parti reality-based dalle parti model-based.

La terza fase, *analysis and structuring of archival data*, prevede la digitalizzazione, l'organizzazione e la verifica di coerenza della documentazione raccolta. La comparazione tra i disegni originali e lo stato attuale dell'edificio consente di individuare varianti esecutive e trasformazioni successive. Il materiale digitalizzato viene organizzato all'interno di un Common Data Environment (CDE) strutturato secondo convenzioni di denominazione e archiviazione che ne garantiscono la tracciabilità.

La quarta fase, *survey*, riguarda il rilievo strumentale delle parti accessibili mediante laser scanner terrestre. La campagna di acquisizione non punta alla copertura metrica totale dell'edificio, ma alla produzione di un dataset che soddisfi contemporaneamente le necessità di fornire l'impalcatura geometrica per la modellazione delle porzioni accessibili e di produrre aree di sovrapposizione tra le parti rilevate e quelle che saranno ricostruite da archivio, in modo che nella fase successiva il confronto dimensionale tra nuvola di punti e disegni originali risulti significativo.

La quinta fase, *post-processing*, è dedicata all'elaborazione delle nuvole di punti attraverso registrazione, pulizia, decimazione e, in via sperimentale, segmentazione del dataset in porzioni corrispondenti a componenti architettonici distinti.

La sesta fase, *data coordination*, rappresenta il momento di convergenza tra i due canali informativi del workflow. Le nuvole di punti e la documentazione d'archivio digitalizzata vengono allineate su un sistema di riferimento comune, con verifica esplicita della

compatibilità metrica tra le due fonti. Un disegno coerente con il dato rilevato nelle porzioni accessibili può essere ragionevolmente impiegato per la ricostruzione delle zone d'ombra; un disegno che presenta difformità significative richiede cautela e dichiarazione esplicita dell'incertezza. In questa fase viene inoltre condotta la georeferenziazione del modello (secondo il sistema di coordinate ufficiale nazionale o regionale), che ne predispone la futura integrazione con ambienti GIS a scala territoriale.

La settima fase, *BIM authoring*, è il nucleo operativo del processo. La modellazione parametrica prevede elementi reality-based per le parti derivate dalla nuvola di punti ed elementi model-based per le zone d'ombra. La distinzione è resa tracciabile attraverso un parametro condiviso che consente di filtrare, interrogare e visualizzare separatamente le due categorie di componenti nel modello. La scomposizione tecnica dell'edificio (in strutture portanti, tamponamenti, chiusure, finiture) integra il rilievo geometrico con un'interpretazione critica della sua logica costruttiva, identificando il ruolo di ogni elemento all'interno dell'organismo edilizio (Potestà, 2020).

L'ottava fase, *data integration*, trasforma il modello geometrico in un sistema informativo strutturato, associando quindi agli elementi del modello, parametri condivisi contenenti dati su materiali, datazione, stato di conservazione, riferimenti ai documenti d'archivio originali e codici di classificazione per la gestione manutentiva.

La nona fase, *quality control*, opera su due livelli complementari: la verifica dell'accuratezza morfometrica, che confronta la geometria del modello con il dato metrico del rilievo, e la verifica della qualità informativa, che controlla la completezza del corredo parametrico e documentale. L'affidabilità complessiva del modello è articolata in tre dimensioni: il Level of Accuracy (LoA), che misura la deviazione geometrica; il Level of Quality (LoQ), che valuta la qualità delle fonti informative; e il Level of Reliability (LoR), che ne rappresenta la sintesi complessiva (Maiezza, 2019; Brusaporci et al., 2023). La distinzione tra componenti rilevati strumentalmente e componenti ricostruiti da archivio risulta tracciabile nel modello, garantendo la trasparenza del processo rispetto agli utenti futuri.

La decima e ultima fase, *openBIM export*, consiste nell'esportazione del modello in formato interoperabile IFC (Industry Foundation Classes) e nella sua condivisione attraverso una piattaforma CDE cloud accessibile dall'ente gestore via browser, senza necessità di software di modellazione. Il workflow segue una struttura aperta che permette di importare il modello in qualsiasi CDE conforme agli standard buildingSMART e di integrarlo in ambienti GIS grazie alla georeferenziazione, facilitando così le analisi a scala territoriale.

1.5 Struttura della tesi

La tesi è articolata in dieci capitoli organizzati secondo una progressione che muove dal quadro teorico e storico verso la definizione metodologica, l'applicazione sperimentale e la valutazione critica dei risultati.

Il Capitolo 1, introduttivo, definisce il contesto problematico dell'ERP come patrimonio a riconoscimento difficile e accessibilità parziale, enuncia gli obiettivi della ricerca, ricostruisce lo stato dell'arte e presenta il workflow Archive+Scan-to-BIM come risposta metodologica ai gap identificati.

Il Capitolo 2 offre un approfondimento storico-normativo comparato sull'evoluzione dell'edilizia residenziale pubblica in Italia e in Spagna, dalle principali stagioni progettuali del dopoguerra ai quadri legislativi di riferimento, con attenzione alla condizione attuale del patrimonio in Capitanata e in Aragona.

Il Capitolo 3 affronta il tema del patrimonio architettonico contemporaneo sotto il profilo della conoscenza e della valorizzazione, analizzando le caratteristiche tipologiche che ne giustificano la tutela e il ruolo delle iniziative di censimento e delle tecnologie digitali nella sua gestione.

Il Capitolo 4 è dedicato allo stato dell'arte sul BIM e sulla sua declinazione per il patrimonio esistente (HBIM), tracciandone l'evoluzione e le applicazioni specifiche nel campo dell'edilizia residenziale pubblica.

Il Capitolo 5 esplora le tecnologie di rilievo digitale per il patrimonio architettonico, con approfondimento sulle metodologie di acquisizione digitale, sui processi Scan-to-BIM e sulle tecniche di digitalizzazione degli elaborati d'archivio.

Il Capitolo 6 descrive l'esperienza di collaborazione con A.R.C.A. Capitanata, presentando la consistenza del patrimonio gestito dall'Ente e le criticità operative riscontrate, che hanno costituito il contesto applicativo privilegiato della ricerca.

Il Capitolo 7 espone nel dettaglio le dieci fasi del workflow Archive+Scan-to-BIM, documentando le scelte metodologiche adottate per ciascuna fase e il loro fondamento nella letteratura disciplinare.

Il Capitolo 8 illustra l'applicazione del workflow ai quattro casi studio, due italiani e due spagnoli, descrivendo i processi di modellazione e le strategie adottate per le diverse tipologie edilizie.

Il Capitolo 9 presenta l'analisi dei risultati conseguiti, discutendo benefici, criticità e limiti riscontrati nella sperimentazione.

Il Capitolo 10 raccoglie le conclusioni della ricerca e delinea le prospettive di sviluppo per la valorizzazione del patrimonio ERP attraverso i workflow digitali integrati.

Il volume si chiude con la bibliografia, organizzata per tematiche.

L'articolazione descritta riflette la struttura logica del metodo proposto: dalla comprensione del contesto alla definizione dello strumento, dall'applicazione alla valutazione, secondo una progressione in cui ciascun capitolo fornisce le premesse per la comprensione di quelli che seguono.

2. L'EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA: ITALIA E SPAGNA

2.1 Storia e normativa dell'edilizia residenziale pubblica in Italia

La questione abitativa che l'Italia si trovò ad affrontare all'indomani della Seconda guerra mondiale non era riducibile a un problema tecnico o amministrativo ordinario. Le distruzioni belliche avevano lasciato un paese profondamente lacerato: stime dell'epoca quantificavano in centinaia di migliaia le abitazioni rese inutilizzabili o demolite, mentre le migrazioni interne, alimentate dallo spostamento di popolazioni sfollate e dai flussi iniziali dall'economia rurale verso i centri urbani, esercitavano una pressione crescente su un tessuto residenziale già gravemente deficitario (Di Biagi, 2001). Il sovraffollamento delle abitazioni sopravvissute, la diffusione di baracche e soluzioni abitative di fortuna nelle periferie urbane, e l'incapacità delle rendite private di rispondere alla domanda di alloggi popolari configuravano un'emergenza sociale di vastissima portata, senza precedenti nella storia repubblicana italiana. A questa situazione si sommava l'urgenza economica della disoccupazione: nel secondo dopoguerra, milioni di lavoratori, in particolare nelle regioni meridionali, erano privi di occupazione stabile, e il settore edilizio, ad alta intensità di manodopera e a bassa richiesta di capitale iniziale, si presentava come leva privilegiata per avviare la ripresa produttiva nazionale (Di Biagi, 2001; Nicoloso, in Di Biagi, 2001; Maddaluno, 2007; Poretti, in Capomolla & Vittorini, 2003).

Da questa convergenza di emergenze abitative, occupazionali e sociali prende corpo il Piano INA-Casa, approvato dal Parlamento italiano con la Legge n. 43 del 28 febbraio 1949, recante *Provvedimenti per incrementare l'occupazione operaia, agevolando la*

*costruzione di case per lavoratori*² (L. n. 43, 1949). La legge istituiva un meccanismo di finanziamento fondato su un principio di solidarietà collettiva per il quale, trattenute obbligatorie sui salari dei lavoratori dipendenti, contributi dei datori di lavoro e integrazione statale alimentavano un fondo comune destinato alla costruzione di abitazioni da assegnare ai lavoratori stessi (Maddaluno, 2007; Nicoloso, in Di Biagi, 2001). Tale meccanismo divenne oggetto di un acceso dibattito parlamentare e le opposizioni di sinistra, in particolare il leader della CGIL Giuseppe Di Vittorio, contestarono la struttura del prelievo, ritenendola penalizzante per i lavoratori che si vedevano finanziare con il proprio salario un piano di cui avrebbero beneficiato solo in parte. Pur riconoscendo l'urgenza dell'intervento e l'obiettivo di garantire alloggi dignitosi alle classi lavoratrici, Di Vittorio insistette affinché i criteri di assegnazione fossero trasparenti e fondati sul bisogno effettivo, e affinché i nuovi insediamenti non si trasformassero in enclavi di segregazione sociale ma in quartieri dotati di servizi e integrati nel tessuto urbano (Maddaluno, 2007). Questa convergenza di posizioni, pur nella diversità delle prospettive ideologiche, permise l'avvio del Piano, che nei quattordici anni della sua attività avrebbe cambiato profondamente il volto delle città italiane.

Sul piano operativo, il Piano INA-Casa fu articolato in due distinti settenni. Il primo (1949–1956) fu caratterizzato da una forte spinta espansiva, l'obiettivo prioritario era realizzare nel minor tempo possibile il massimo numero di alloggi, e la Gestione INA-Casa, sotto la guida del presidente Arnaldo Foschini e con la supervisione tecnica di Adalberto Libera, sviluppò strumenti normativi e orientativi per guidare l'enorme massa di interventi progettuali che si andava dispiegando sull'intero territorio nazionale (Di Biagi, 2001). Tra questi strumenti, i manuali tecnici e le istruzioni tipologiche prodotti

² La Legge n. 43 del 28 febbraio 1949, nota storicamente anche come "Piano Fanfani" (dal nome dell'allora Ministro del Lavoro Amintore Fanfani che la promosse), ha istituito il celebre Piano INA-Casa. Si trattò di un provvedimento cruciale per l'Italia del secondo dopoguerra, nato per rispondere a due urgenze parallele: l'emergenza occupazionale (assorbire la disoccupazione rilanciando il settore dell'edilizia) e l'emergenza abitativa (costruire quartieri di case popolari per i lavoratori a basso costo dopo le distruzioni belliche). Il piano si basava su un sistema di finanziamento misto: trattenute sui salari dei lavoratori, contributi dai datori di lavoro e fondi statali. L'INA (Istituto Nazionale delle Assicurazioni) fu incaricato di gestire i fondi.

dalla Gestione ebbero un ruolo determinante. Essi non imponevano una standardizzazione rigida del tipo prefabbricato industriale, ma offrivano schemi distributivi, orientamenti tipologici e indicazioni tecnologiche che lasciavano ai progettisti la libertà di interpretare il contesto locale, incoraggiando una varietà morfologica e materica che differenziava gli insediamenti INA-Casa dai monoblocchi residenziali dell'edilizia di massa. I manuali costituivano, in sostanza, uno strumento di orientamento progettuale capace di garantire qualità diffusa senza imporre uniformità stilistica (Gabellini, in Di Biagi, 2001; Poretti, in Capomolla & Vittorini, 2003). Il secondo settennio (1956–1963) introdusse aggiustamenti significativi nelle modalità attuative: la dimensione degli interventi tendeva a crescere, le tipologie edilizie si orientavano verso soluzioni più compatte e intensive, e la questione del rapporto tra insediamento e città consolidata assumeva peso crescente nel dibattito urbanistico e architettonico. La transizione tra i due settenni non fu netta e segnò un progressivo spostamento di accento dall'emergenza abitativa immediata alla riflessione di più lungo periodo sulla qualità urbana degli insediamenti realizzati (Di Biagi, 2001; Maddaluno, 2007).

La dimensione quantitativa dell'intervento fu straordinaria per la storia dell'edilizia pubblica italiana. Nei quattordici anni di attività del Piano furono costruiti nel complesso oltre 350.000 alloggi, distribuiti su tutto il territorio nazionale, con una capillarità che raggiunse non soltanto i grandi centri urbani ma anche i comuni di media e piccola dimensione (Escudero, 2023; Maddaluno, 2007; Poretti, in Capomolla & Vittorini, 2003). Questa distribuzione capillare è una delle caratteristiche distintive del Piano INA-Casa rispetto ad altri programmi di edilizia pubblica coevi: gli interventi non seguirono una logica esclusivamente metropolitana, ma rispecchiarono la struttura articolata del sistema insediativo italiano, contribuendo a plasmare la periferia di città come Roma, Milano e Torino, ma anche di centri minori come Cerignola, Matera, Ferrara o Cosenza. La concentrazione territoriale fu tuttavia disomogenea. Le regioni meridionali, infatti, che presentavano i più acuti deficit abitativi e i più elevati tassi di disoccupazione, ricevettero una quota significativa degli investimenti, anche in risposta alla pressione politica

esercitata dai sindacati e dai partiti di sinistra affinché il Piano non si trasformasse in uno strumento di sviluppo esclusivamente settentrionale **(Maddaluno, 2007)**.

Il Piano INA-Casa non fu tuttavia l'unico strumento attraverso cui l'Italia del dopoguerra affrontò il problema abitativo. Un ruolo rilevante, spesso sottovalutato nella storiografia architettonica ma documentato dagli studi sulla ricostruzione, fu svolto dall'UNRRA-Casas (Comitato Amministrativo Soccorso Ai Senza Tetto), operativo tra il 1947 e il 1962. Questo organismo traeva le proprie risorse dal Piano Marshall (1947–1951) e dal programma ERP (European Recovery Program) statunitense, intervenendo con priorità nelle aree rurali del Centro-Sud Italia³ colpite dai bombardamenti e dalla crisi agricola (Pontrandolfi, 2020). I programmi UNRRA-Casas si caratterizzavano per una dimensione tipologicamente differente rispetto agli insediamenti INA-Casa: privilegiavano nuclei di piccola scala, borghi rurali e aggregazioni di villette a schiera destinate alle famiglie contadine, con un'attenzione alle relazioni di prossimità e alla ricostituzione dei legami comunitari che rifletteva l'influenza delle teorizzazioni nordamericane sulla *neighbourhood unit*⁴. L'esperienza del borgo La Martella a Matera (1951–1955), progettato da un gruppo di architetti legati a Ludovico Quaroni, costituisce l'esempio più noto e studiato di questo orientamento, dove l'approccio partecipativo e il riferimento alla tradizione costruttiva vernacolare locale si combinarono con le istanze del neorealismo architettonico in una formula sperimentale senza equivalenti nell'edilizia pubblica italiana del periodo (Pontrandolfi, 2020).

Parallelamente all'UNRRA-Casas e al Piano INA-Casa, e in parte come loro continuazione istituzionale, operava l'ISES (Istituto per lo Sviluppo dell'Edilizia Sociale), ente che intervenne nella realizzazione di edilizia residenziale con caratteristiche

³ Per un'analisi specifica della struttura organizzativa e degli esiti dell'UNRRA-Casas nel Mezzogiorno d'Italia, si rimanda a: Talamona M., "Dieci anni di politica dell'UNRRA-Casas: dalle case ai senzatetto ai borghi rurali nel Mezzogiorno d'Italia (1945–1955)", in *Costruire la città dell'uomo. Adriano Olivetti e l'urbanistica*, Edizioni di Comunità, Torino, 2001, pp. 173–204

⁴ Il concetto di *neighbourhood unit* (unità di vicinato), teorizzato originariamente da Clarence Perry nel 1929, prevedeva l'organizzazione dello spazio urbano in nuclei autosufficienti gravitanti attorno a servizi primari (scuole, aree verdi, centri sociali), con l'obiettivo di favorire la coesione sociale e proteggere la residenza dal traffico veicolare.

tipologiche proprie, orientate verso soluzioni più intensive e verticali rispetto al carattere prevalentemente orizzontale dei primi insediamenti INA-Casa. L'ISES operò in modo complementare rispetto alla Gestione INA-Casa, intervenendo in contesti urbani dove la pressione demografica richiedeva densità insediative più elevate, e i suoi complessi, talvolta affidati agli stessi progettisti che avevano lavorato al Piano Fanfani, rappresentano una fase di maturazione e intensificazione delle ricerche tipologiche avviate nel decennio precedente (Pontrandolfi, 2020). La presenza dell'ISES in Puglia, e specificamente nella provincia di Foggia, è documentata da interventi realizzati tra la metà e la fine degli anni Sessanta, che segnano una continuità con la stagione INA-Casa pur in un quadro normativo e programmatico parzialmente rinnovato.

La conclusione del Piano INA-Casa nel 1963 più che l'abbandono dell'intervento pubblico nel settore residenziale, sancì una riorganizzazione istituzionale dello stesso. Con la Legge Sullo del 1962 e la successiva trasformazione della Gestione INA-Casa in Gescal (Gestione Case per i Lavoratori), il programma fu prolungato fino al 1973 con modalità operative simili a quelle del secondo settennio (Poretti, in Capomolla & Vittorini, 2003), ma in un contesto economico e demografico profondamente mutato: il boom economico aveva alterato i flussi migratori interni, spostando la domanda di alloggi verso le aree metropolitane del triangolo industriale, mentre le regioni meridionali continuavano a soffrire di una domanda inevasa che le strutture della Gescal non riuscivano ad assorbire. Al termine dell'esperienza Gescal, la gestione del patrimonio residenziale pubblico fu affidata agli IACP (Istituti Autonomi per le Case Popolari), enti regionali e provinciali che ereditarono tanto il patrimonio fisico quanto le problematiche gestionali accumulate nei tre decenni precedenti (Di Biagi, 2001). La frammentazione istituzionale che ne derivò, con decine di IACP autonomi differentemente dotati di risorse tecniche e finanziarie, avrebbe condizionato per decenni la capacità di manutenzione e valorizzazione del patrimonio ERP.

Il contesto meridionale e pugliese merita una considerazione specifica, in quanto terreno diretto di due dei casi studio della presente ricerca e contesto in cui le specificità

dell'attuazione del Piano INA-Casa emergono con particolare chiarezza. L'applicazione del Piano nel Sud Italia presentava condizioni strutturalmente diverse rispetto al Centro-Nord: la disponibilità di materiali costruttivi locali di qualità, come il tufo di Canosa, la pietra calcarea di Trani e i laterizi delle fornaci di Lucera, consentiva soluzioni tecniche di notevole valore prestazionale e identitario, difficilmente replicabili nelle regioni settentrionali dove la tradizione costruttiva era orientata verso il mattone cotto e il cemento armato (Faccitondo & Panzini, 2023; Poretti, in Di Biagi, 2001). La manodopera artigianale pugliese, erede di una lunga tradizione costruttiva in pietra e tufo, consentiva lavorazioni di pregio difficilmente ottenibili con operai industrializzati, ma richiedeva una progettazione attenta al dettaglio costruttivo e capace di dialogare con le pratiche del cantiere locale (Faccitondo & Panzini, 2023). Il rapporto tra il nuovo insediamento e la città preesistente aveva nel Mezzogiorno una qualità specifica: i quartieri INA-Casa si inserivano spesso ai margini di centri storici compatti, talvolta su lotti agricoli periferici, dovendo costruire ex novo quella rete di servizi e spazi pubblici che nei contesti settentrionali era almeno parzialmente ereditabile dalla città già costruita (Maddaluno, 2007).

La scelta di alcune città pugliesi come sedi di interventi affidati a progettisti di rilievo nazionale non fu casuale. Cerignola, nel Foggiano, aveva una valenza simbolica precisa in quanto città natale di Giuseppe Di Vittorio, il leader della CGIL che aveva partecipato al dibattito parlamentare sul Piano, e il suo territorio era stato teatro delle principali lotte bracciantili del secondo dopoguerra. Affidare qui uno dei primi cantieri INA-Casa significava attribuire all'intervento edilizio un peso politico e sociale che andava oltre la semplice fornitura di alloggi, caricandolo di una valenza di restituzione nei confronti della classe operaia e contadina pugliese (Maddaluno, 2007). Questa dimensione della localizzazione degli interventi non era esclusiva della Puglia, ma qui assumeva una densità simbolica particolare, che si rifletteva nella qualità delle architetture realizzate e nell'impegno dei progettisti nel rispondere con serietà alle aspettative degli abitanti futuri.

I programmi di edilizia residenziale pubblica realizzati in Italia tra il 1949 e gli anni Settanta hanno prodotto un patrimonio costruito di straordinaria ampiezza e di qualità architettonica assai disomogenea. Accanto a interventi di notevole valore progettuale, nei quali le indicazioni dei manuali INA-Casa si combinavano con la sensibilità dei progettisti verso il contesto locale, i materiali e il dettaglio costruttivo, esiste una massa molto più vasta di realizzazioni anonime, prodotte dall'accelerazione dei ritmi costruttivi e dalla pressione quantitativa del secondo settennio e dell'era Gescal, con caratteristiche tipologiche ripetitive e una qualità costruttiva non sempre adeguata (Di Biagi, 2001). Questa eterogeneità interna al patrimonio dell'edilizia pubblica postbellica è uno degli ostacoli principali alla sua valorizzazione complessiva: a differenza dei monumenti storici, per i quali esiste una tradizione consolidata di studi e strumenti di tutela, il patrimonio ERP non dispone di categorie interpretative e di protezione condivise che permettano di distinguere e tutelare i casi più significativi senza paralizzare la gestione dell'enorme massa di edifici ordinari.

A questa difficoltà classificatoria si aggiunge un problema di conoscenza documentale (Capomolla & Vittorini, 2003). Una quota rilevante degli edifici realizzati nell'ambito dei programmi INA-Casa, UNRRA-Casas, ISES e Gescal non dispone di documentazione tecnica aggiornata e accessibile. I disegni originali di progetto sono spesso conservati in archivi frammentati, tra fondi di progettisti, archivi degli enti gestori e depositi comunali, non sempre catalogati e talvolta in condizioni di deterioramento che ne mettono a rischio la leggibilità. I successivi decenni di occupazione e di trasformazioni non autorizzate hanno prodotto uno scarto crescente tra lo stato di fatto e la documentazione esistente, rendendo i disegni originali del tutto inadeguati a supportare operazioni di manutenzione straordinaria, adeguamento sismico o riqualificazione energetica (Maddaluno, 2007; Pontrandolfi, 2020). La questione della conoscenza degli edifici ERP non è dunque separabile dalla questione della loro gestione: senza una base documentale affidabile e aggiornata, le decisioni tecniche degli enti proprietari, oggi perlopiù gli ARCA e i loro equivalenti regionali eredi degli IACP, si fondano su informazioni incomplete, con ricadute negative sulla programmazione degli interventi e

sull'efficienza della spesa pubblica. È in questa situazione di deficit conoscitivo reiterato che si inserisce la necessità di sviluppare metodologie innovative per la documentazione del patrimonio ERP, capaci di coniugare la ricerca archivistica con le tecnologie di rilievo digitale e di restituire modelli informativi utili, nel lungo periodo, tanto alla conoscenza storica quanto alla gestione tecnica degli edifici.

Un riepilogo dei piani abitativi discussi in questo paragrafo è riportato nella tabella sottostante:

Periodo	Piano/Ente	Quadro normativo o fonte di finanziamento	Caratteristiche e obiettivi
1947 – 1962	UNRRA-Casas (Amministrazione delle Nazioni Unite per l'assistenza e la riabilitazione)	Piano Marshall (1947–1951) e il Programma per la ripresa europea (ERP) degli Stati Uniti	Interventi prioritari nelle aree rurali del Centro e Sud Italia. Costruzione di insediamenti su piccola scala, borghi rurali e schiere di case a catena per famiglie di agricoltori.
1949 – 1963	Piano INA-Casa (Gestione INA-Casa)	Legge n. 43 del 28 febbraio 1949 (nota come "Piano Fanfani")	Strutturato in due settennati (1949–1956 e 1956–1963). Finanziato attraverso trattenute salariali, contributi dei datori di lavoro e fondi statali. Obiettivo: incrementare l'occupazione della classe operaia e fare fronte all'emergenza abitativa del dopoguerra
1960s	ISES (Istituto per lo Sviluppo dell'Edilizia Sociale)	Prosecuzione istituzionale dell'UNRRA-Casas e del Piano INA-Casa	Interventi complementari alla Gestione INA-Casa nei contesti urbani a maggiore pressione demografica. Soluzioni abitative più intensive e verticali rispetto ai primi insediamenti INA-Casa
1963 – 1973	Gescal (Gestione Case per i Lavoratori)	Legge "Sullo" del 1962.	Nata dalla trasformazione della Gestione INA-Casa per estenderne il programma. Operò durante il "boom economico", rispondendo a una domanda abitativa ormai spostatasi verso le aree metropolitane del triangolo industriale

Dal 1973 in avanti	IACP (Istituto Autonomo Case Popolari)	(Ha sostituito la Gescal al termine della sua attività).	Enti regionali e provinciali che hanno ereditato la gestione del patrimonio immobiliare esistente e i problemi accumulati nei decenni precedenti. Hanno operato in un contesto di frammentazione istituzionale.
Oggi	ARCA (Agenzia Regionale per la Casa e l'Abitare)	(Successori diretti degli IACP)	Attuali enti proprietari responsabili delle decisioni tecniche e della gestione degli edifici ERP (Edilizia Residenziale Pubblica), spesso ostacolati da una carenza strutturale di conoscenza e da documentazione originale di progetto mancante o frammentata.

2.2 Esperienze architettoniche italiane e progettisti del settore

Il Piano INA-Casa non produsse un'architettura uniforme, né si propose di farlo. Le sue regole erano di processo (i manuali tipologici, le procedure concorsuali, il coinvolgimento capillare dei professionisti sull'intero territorio nazionale) e non di stile; fu proprio questa struttura normativa aperta a generare, in modo non programmato, quella pluralità di esiti che la storiografia ha successivamente ricondotto a categorie interpretative comuni (Di Biagi, 2001). Il termine "neorealismo architettonico"⁵, spesso impiegato come etichetta sintetica per l'intera stagione INA-Casa è emblematico, viene adottato dalla critica a partire dalla metà degli anni Cinquanta per descrivere una tendenza già matura, non corrisponde a nessun manifesto collettivo né a nessuna dichiarazione programmatica formulata durante la progettazione. Nessuno degli

⁵ Il neorealismo architettonico è stata una tendenza del secondo dopoguerra italiano volta al recupero di forme vernacolari, materiali tradizionali e spazi comunitari, in parziale reazione al Razionalismo. Come evidenziato, si trattò di una definizione critica coniata *a posteriori* per descrivere prassi costruttive già in atto (come i quartieri INA-Casa), priva di un intento programmatico o di un manifesto fondativo.

architetti dei quartieri poi definiti "neorealisti" li aveva mai chiamati tali mentre li progettava; la designazione fu il prodotto di una ricezione critica successiva, e il neorealismo in architettura era originariamente, più che un programma, una *raison d'être* (Escudero, 2023). Si trattava piuttosto di un orientamento condiviso ovvero il rifiuto del razionalismo di regime percepito come compromesso con il fascismo, l'influenza delle esperienze organiciste europee filtrate attraverso il dibattito delle riviste specializzate, e la volontà di fondare un linguaggio capace di radicarsi nei contesti locali senza ricorrere all'astrazione modernista o al localismo vernacolare. La formula che meglio restituisce il carattere di quegli anni è quella dell'"invenzione della realtà": una reinterpretazione attiva attraverso strumenti formali capaci di tenere insieme modernità e memoria (Casciato, in Di Biagi, 2001).

Questa tensione culturale trovò un sostegno istituzionale decisivo nei manuali elaborati dalla Gestione INA-Casa. I manuali indirizzavano la produzione verso obiettivi qualitativi precisi: la differenziazione dei tipi edilizi, l'articolazione degli spazi di pertinenza, il raccordo funzionale tra manufatto e contesto urbano, senza imporre soluzioni formali predefinite (Gabellini, in Di Biagi, 2001). Furono questi stessi strumenti a costituire, per la classe professionale italiana, un efficace dispositivo di formazione, ossia un sistema di riferimenti capace di tradurre istanze culturali complesse in indicazioni operative accessibili a migliaia di professionisti distribuiti sull'intero territorio. Il Piano rappresentò prima di tutto un'occasione per il rilancio di una professione che cercava nuova legittimazione dopo le ambiguità del ventennio, orientando la figura dell'architetto verso l'interpretazione delle necessità collettive e verso quella costruzione della "città pubblica" che la storiografia del Piano ha analizzato in modo sistematico (Nicoloso, in Di Biagi, 2001; Di Biagi, 2001). Fu al tempo stesso programma edilizio e strumento di trasformazione dei modelli dell'abitare per larghe fasce della popolazione italiana, in un processo che la letteratura ha definito una vera "alfabetizzazione alla modernità" (Bottini, in Di Biagi, 2001).

Sotto il profilo tecnico-costruttivo, la relativa coerenza del patrimonio INA-Casa riflette le condizioni reali del cantiere italiano del dopoguerra più che l'imposizione di uno stile centralizzato. La combinazione di muratura portante e cemento armato, realizzata interamente in opera con tecniche tradizionali, era semplicemente il modo di costruire disponibile in Italia in quegli anni; l'esclusione della prefabbricazione rispondeva a ragioni politiche ed economiche prima ancora che estetiche, poiché il Piano mirava a massimizzare l'assorbimento di manodopera locale che la produzione industrializzata avrebbe ridotto drasticamente (Poretti, in Di Biagi, 2001). Il risultato architettonico, con facciate articolate da logge, cordoli e intelaiature a vista, produsse quello che in letteratura è registrato come "stile INA-Casa", l'esito riconoscibile di un sistema costruttivo comune che, nelle mani di progettisti attenti, generava soluzioni formalmente coerenti pur nella varietà dei contesti regionali (Poretti, in Di Biagi, 2001). Murature portanti per gli edifici bassi, ossatura a scheletro per quelli alti, solai misti laterocementizi: questa era la grammatica costruttiva del Piano, condivisa per necessità tecnica e operativa prima che per prescrizione normativa.

Il Piano coinvolse migliaia di professionisti, ma la storiografia ha naturalmente privilegiato i casi di maggiore rilevanza critica: il Quartiere Tiburtino a Roma (Ridolfi, Quaroni)

(Fig. 2), la Falchera a Torino (Astengo), il quartiere Cesate a Milano (BBPR, Albini, Gardella), il San Marco a Mestre. Nel Mezzogiorno, episodi altrettanto significativi hanno ricevuto attenzione storiografica più discontinua. Il quartiere La Martella a Matera (Quaroni, De Carlo, Gorio e altri, 1951–54) (Fig. 3) e le Spine Bianche, sempre a Matera (Gorio, Lugli, Valori, De Carlo, 1954), rappresentano due tentativi di fondare un linguaggio residenziale radicato nella cultura costruttiva del Sud, con un'attenzione al paesaggio e ai materiali locali che anticipa le stesse preoccupazioni dei cantieri pugliesi. Nel contesto foggiano, il quartiere INA-Casa sul Tratturo dei Preti (Aymonino)

costituisce un ulteriore episodio di quella stagione che ha ridisegnato la periferia della città negli anni Cinquanta e Sessanta. Questi casi non devono tuttavia oscurare la massa degli interventi ordinari, che costituisce la parte numericamente più consistente del patrimonio ERP prodotto dal Piano. Uno dei compiti della ricerca storiografica sull'INA-Casa è proprio quello di sottrarre i progetti all'esclusiva logica dell'autore per occuparsi di una produzione più ampia e diffusa, che ha dato forma alla crescita delle città italiane in maniera forse più decisiva degli episodi più noti⁶ (Di Biagi, 2001). Il Piano aveva del resto creato le condizioni strutturali per una qualità diffusa: la libertà tipologica, il coinvolgimento dei professionisti locali e l'orientamento verso i contesti regionali erano dispositivi che consentivano all'orientamento neorealista di manifestarsi in maniera eterogenea e adattiva, senza mai imporsi come dogma (Escudero, 2023).

⁶ Questo approccio riflette un mutamento metodologico della storiografia italiana che, a partire dagli anni Novanta, ha iniziato a guardare alla "città pubblica" non più come una collezione di oggetti isolati, ma come un unico grande palinsesto infrastrutturale e sociale. In questa prospettiva, la qualità dell'edilizia residenziale pubblica viene misurata non sulla base dell'eccezionalità del singolo edificio, ma sulla capacità del sistema normativo (nel caso specifico, il Piano INA-Casa) di elevare lo standard medio della costruzione nazionale, trasformando l'edilizia "ordinaria" in un vero e proprio bene culturale diffuso.

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico:
un approccio Archive+Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata (Italia) e Aragna (Spagna)

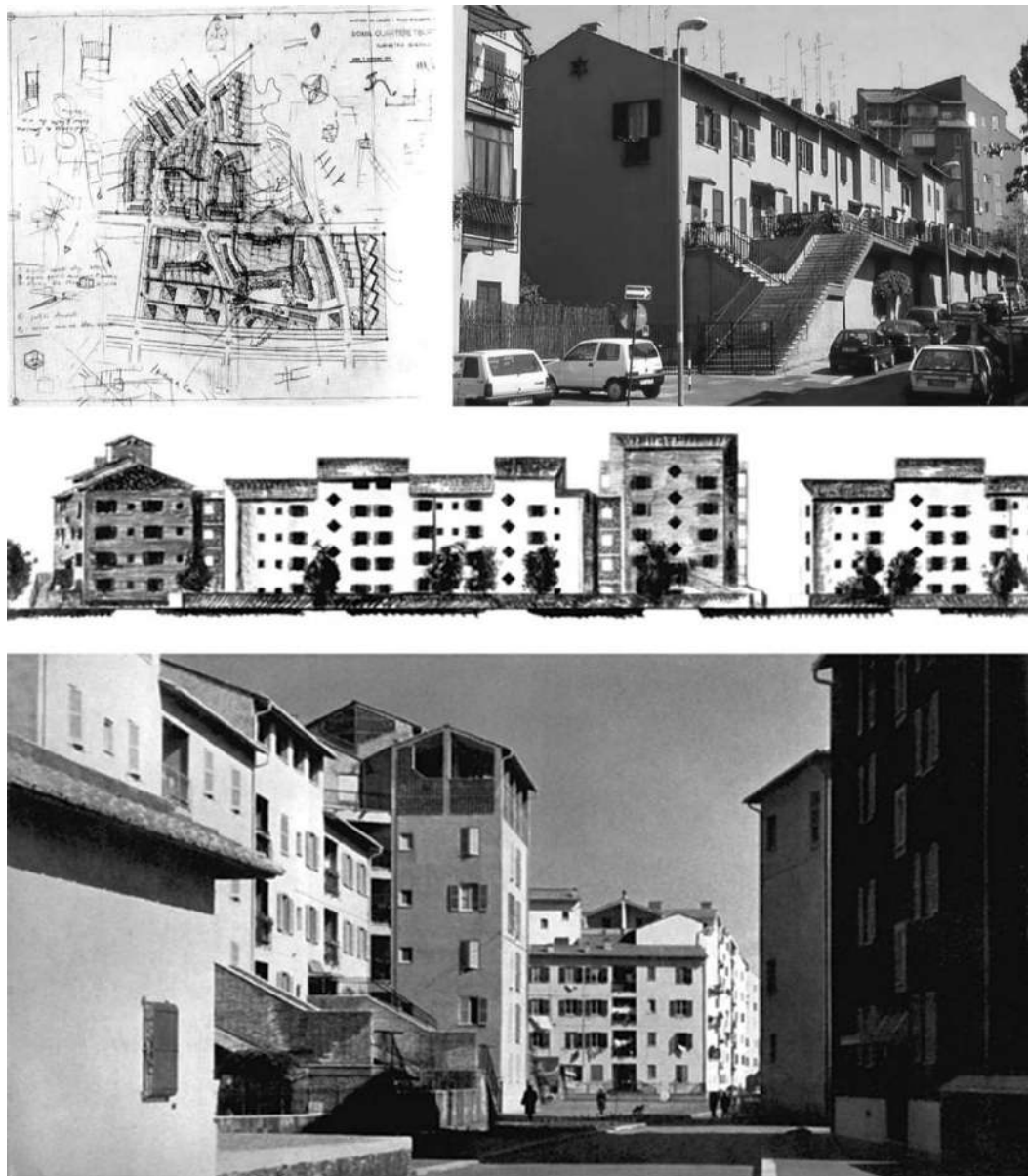


Fig. 2 - Il quartiere Tiburtino a Roma. (DiAC, Censimento delle architetture italiane dal 1945 ad oggi)

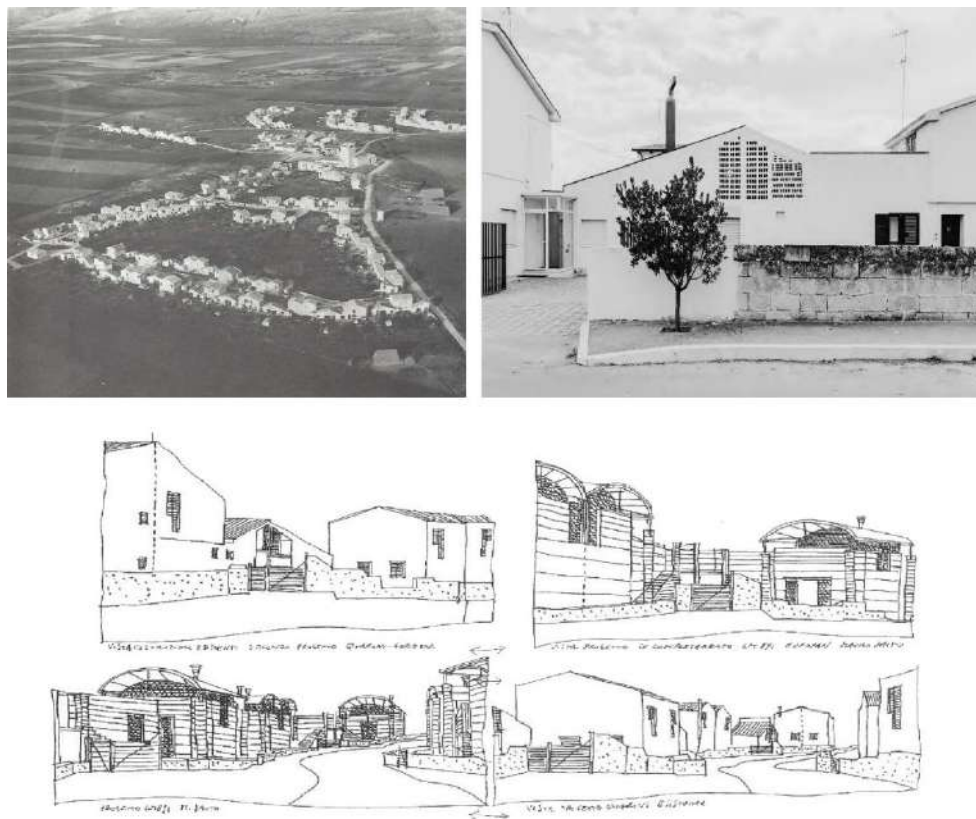


Fig. 3 - Il quartiere La Martella a Matera. (DoCoMoMo Italia, ph. P. Laterza, M. Saito)

Gli interventi pugliesi di Mario Ridolfi e Wolfgang Frankl occupano una posizione peculiare in questo panorama, per la coerenza con cui i due progettisti tradussero la specificità del contesto meridionale in sistema costruttivo. La collaborazione era fondata su una doppia radice culturale: Ridolfi aveva maturato la sua formazione nella cultura romana di matrice classica, educandosi alla disciplina tecnica nello studio di un ingegnere prima di frequentare i corsi di Giovannoni e Piacentini alla Scuola di Architettura di Roma; Frankl proveniva dalla Scuola di Stoccarda, sviluppando una sensibilità tecnica centrata sul rapporto tra materiale, struttura e forma (Faccitondo & Panzini, 2023; Cellini & D'Amato, 2005). Giunto a Roma nel 1933, Frankl portò con sé

il patrimonio della Deutsche Baukultur, innescando nel lavoro dello studio un cambio di orientamento, a partire dal 1935 la ricerca dei due architetti si indirizzò verso una sintesi tra la tradizione muraria italiana e la modernità tecnica di derivazione germanica, tenendo insieme struttura portante e qualità formale in un unico gesto compositivo (Faccitondo & Panzini, 2023; Cellini & D'Amato, 2005). La stagione delle palazzine romane aveva costituito per entrambi un laboratorio essenziale, uno spazio in cui il controllo totale del processo edilizio permetteva di affinare un metodo fondato sulla coincidenza tra struttura e forma e sulla cura artigianale del dettaglio costruttivo. Fu questo stesso metodo a trovare traduzione su scala ampliata nelle commesse di edilizia pubblica del dopoguerra (Cellini & D'Amato, 2005).

Il quartiere INA-Casa di Cerignola, progettato nel 1950 e realizzato tra il 1950 e il 1951, traduce le risorse costruttive disponibili in un sistema compositivo coerente con il territorio. Le case alte sono costruite in blocchi squadrati di tufo delle cave di Canosa, con murature che si assottigliano con il salire dell'edificio, rinforzate da un'intelaiatura in cemento armato ritmata da fasce orizzontali e lesene verticali che contornano le bucare e presidiano gli spigoli. Il risultato è un sistema ibrido, definito "muratura ingabbiata o graticciata", in cui il reticolo cementizio migliora il comportamento elastico dell'impianto murario aumentandone la resistenza alle torsioni e agli spostamenti: una risposta diretta al rischio sismico di questa zona della Puglia, segnata dal terremoto del 1731 che aveva quasi distrutto la città vecchia di Cerignola. La scelta dei materiali segue una logica di radicamento regionale precisa. Al piede delle case alte corrono lastre di pietra calcarea delle cave di Trani, identificativa dei borghi pugliesi; in elevato, i toni cangianti del tufo di Canosa, dal paglierino al brunastro, lavorato a mano con malta abbondante secondo la tradizione costruttiva locale; in sommità, una fascia di coronamento in mattoni di laterizio delle fornaci della vicina Lucera. Nelle case a schiera, la muratura di tufo è rivestita al piede dagli stessi mattoni, e l'accesso agli alloggi del piano primo avviene tramite scalinate protese oltre il corpo di fabbrica, le tipiche scale "a profferlo" pugliesi, che separano la casa dalla strada garantendo riservatezza e igiene. Questo palinsesto di materiali rispondeva all'obiettivo dichiarato

da Ridolfi di "conseguire un insieme architettonico intonato ai caratteri tipici della regione pugliese", senza cedere al citazionismo vernacolare (Ridolfi, 1952; Faccitondo & Panzini, 2023).

Quasi vent'anni dopo, il complesso ISES di Foggia, con esecutivi già pronti nel 1965 e realizzato tra il 1964 e il 1969, documenta l'evoluzione della ricerca costruttiva dei due progettisti verso una maggiore espressività strutturale, maturata attraverso le esperienze delle torri INA-Assicurazioni di viale Etiopia a Roma (Fig. 4) e delle case Franconi a Terni. Le sei torri, su impianto quadrato, sono disposte a ventaglio attorno a uno spiazzo ellittico in due gruppi di tre, con una leggera rotazione reciproca che moltiplica gli scorci e conferisce all'insieme una tensione dinamica estranea alla semplice serialità. La giacitura rispetto a via Smaldone e la configurazione ellittica dello spazio collettivo condizionano la percezione delle torri in movimento: si offrono di spigolo, cambiano aspetto al variare del punto di vista, e la combinazione tra sistema pilastrato e scatola muraria è determinante per questa plasticità controllata. Sul piano costruttivo, il salto rispetto a Cerignola è qualitativo. La scatola muraria è costituita da un doppio paramento di mattoni, pieni all'esterno e forati all'interno, con intercapedine che garantisce isolamento termico e acustico. Su questa trama si innesta una cortina di pilastri di diversa sezione, disposti con cadenza ascendente dagli angoli verso il centro della facciata e rastremati con il salire, parzialmente inglobati nella muratura. All'angolo, un pilastro tozzo ruotato di 45 gradi è affiancato da due pilastri snelli; nella zona centrale, una coppia di robusti pilastri estroflessi si scalettano verso l'alto fino a essere assorbiti dalla muratura, alleggerendo progressivamente il profilo verso il cielo. È per questo sistema, in cui i pilastri perimetrali fungono da contrafforti sia della scatola muraria che della copertura a padiglione, che la letteratura ha proposto la denominazione di "intelaiatura murata o inscatolata" ovvero un organismo unitario che trae dalla tensione tra i due elementi la sua peculiare intensità espressiva (Faccitondo & Panzini, 2023).



Fig. 4 – Sulla sinistra le Torri INA-Assicurazioni di Via Etiopia a Roma (DiAC, Censimento delle architetture italiane dal 1945 ad oggi), sulla destra gli Alloggi ISES di Via Smaldone a Foggia.

2.3 Condizione attuale dell’edilizia residenziale pubblica in Italia

L’espansione dell’edilizia residenziale pubblica italiana ha avuto termine con la soppressione della GESCAL (il fondo alimentato da trattenute sulle retribuzioni dei lavoratori dipendenti, abolito nel 1973)⁷ e con la progressiva dismissione del patrimonio

⁷ La sua soppressione rientra nel più ampio quadro di decentramento amministrativo dei primi anni ‘70 (in particolare con la L. 865/1971 e il successivo D.P.R. 1036/1972), che trasferì le competenze abitative alle Regioni. La successiva stagione delle privatizzazioni e delle alienazioni del patrimonio ERP prese ufficialmente il via con la Legge 560/1993, segnando il passaggio da una politica di espansione a una di contrazione dello stock abitativo pubblico.

avviata negli anni Novanta. A partire da quel momento, il parco edilizio pubblico ha cessato di crescere in modo costante, mentre le condizioni fisiche degli edifici e il contesto sociale delle loro popolazioni residenti si deterioravano con ritmi crescenti. Il risultato è un patrimonio di proporzioni considerevoli che oggi versa in una condizione di obsolescenza diffusa, non risolta da interventi organici di manutenzione programmata, e che non riesce ad affrancarsi da una percezione pubblica prevalentemente negativa. Nel dibattito corrente questi insediamenti sono identificati come luoghi di disagio estetico, fisico e sociale, senza che questa rappresentazione venga corretta da un'analisi razionale delle risorse che essi costituiscono per la città contemporanea (Paris & Bianchi, 2015).

Sul piano tecnico, gli edifici realizzati tra gli anni Cinquanta e Settanta, concepiti secondo criteri di massima economia costruttiva, presentano oggi problematiche strutturali e impiantistiche accumulate per decenni di manutenzione ordinaria insufficiente (Paris & Bianchi, 2015). Sul piano funzionale e tipologico, l'alloggio del dopoguerra era stato dimensionato per la famiglia operaia standard, con composizione e ciclo di vita prevedibili; risulta invece inadeguato rispetto alla domanda attuale, segnata dall'invecchiamento della popolazione, dalla riduzione della dimensione media dei nuclei familiari e dall'emergere di nuove forme di fragilità sociale che quell'edilizia non era stata concepita per accogliere. La rigidità tipologica degli edifici rende particolarmente difficile qualsiasi adattamento alle esigenze contemporanee dei residenti, anche laddove la volontà politica di intervenire sussiste (Paris & Bianchi, 2015).

A complicare ulteriormente il quadro interviene una marcata disomogeneità gestionale derivante dal trasferimento delle competenze dallo Stato alle Regioni, che ha comportato la trasformazione degli Istituti Autonomi Case Popolari in Agenzie Regionali (denominate A.R.C.A., ATER, ALER a seconda del territorio)⁸. Il patrimonio ERP è stato

⁸ La transizione dagli IACP alle attuali Agenzie regionali è il risultato diretto del trasferimento di funzioni amministrative dallo Stato agli enti locali (D.Lgs. 31 marzo 1998, n. 112) e della definitiva regionalizzazione delle politiche abitative sancita dalla Legge Costituzionale 3/2001 (Riforma del Titolo V). In questo nuovo assetto, le singole Regioni hanno

così segmentato in sistemi locali con capacità tecniche e finanziarie disomogenee, soggetti a vincoli di bilancio sempre più stringenti e privi di una regia unitaria in grado di pianificare interventi a scala sistemica (Puccini & Tomassi, 2019). Il risultato è una gestione prevalentemente reattiva, centrata sulla risposta alle emergenze puntuali piuttosto che sulla programmazione a lungo termine. I canoni di locazione estremamente ridotti limitano la capacità degli enti di autofinanziarsi, determinando una spirale nella quale la scarsità di risorse per la manutenzione accelera il deterioramento, e il deterioramento accumulato rende gli interventi sempre più costosi e urgenti. A questi processi si è sovrapposta la progressiva dismissione avviata dalla Legge 560/1993⁹, che ha consentito la vendita degli alloggi agli inquilini assegnatari, producendo una quota crescente di complessi a proprietà mista nei quali la gestione unitaria dell'ente risulta frammentata dalla presenza di condomini privati, con effetti destabilizzanti sulla manutenzione programmata e sulla coerenza degli interventi di riqualificazione. A ciò si aggiunge un problema di natura informativa ovvero la dimensione effettiva del patrimonio ERP è spesso inconoscibile con precisione, poichè i dati sono distribuiti tra banche dati non comunicanti, soggetti a discontinuità di aggiornamento e non di rado incorretti anche nelle pubblicazioni ufficiali (Puccini & Tomassi, 2019).

A questo profilo di difficoltà gestionale si sovrappone una questione che distingue il patrimonio ERP da ogni altra categoria di patrimonio architettonico, vale a dire la permanenza degli inquilini negli alloggi. Trattandosi di un patrimonio abitato, e spesso abitato da popolazioni in condizioni di fragilità economica e sociale, le ricadute riguardano tanto la conservazione fisica degli edifici quanto la possibilità di conoscerli

disciplinato autonomamente la trasformazione degli ex Istituti in Enti Pubblici Economici o Enti Strumentali (denominati di volta in volta ATER, ALER, ATC, ARCA, ecc.). Tale autonomia legislativa e organizzativa ha tuttavia prodotto l'attuale eterogeneità di risorse e capacità operative sul territorio nazionale.

⁹ La L. 24 dicembre 1993, n. 560 ha disciplinato i piani di alienazione del patrimonio di Edilizia Residenziale Pubblica. La norma ha permesso agli assegnatari di acquistare l'alloggio in cui risiedevano a prezzi agevolati, innescando un vasto processo di privatizzazione che ha drasticamente ridotto lo stock abitativo pubblico disponibile a livello nazionale.

e documentarli. Il degrado tende ad accelerarsi nelle situazioni di sovraffollamento e di utilizzo intenso degli spazi comuni; al tempo stesso, la tutela della privacy degli inquilini e l'inviolabilità del domicilio rendono strutturalmente impossibile effettuare sopralluoghi completi, rilievi e verifiche dello stato di fatto all'interno delle singole unità abitative (Annese et al., 2024).

La combinazione di questi fattori produce una condizione di incertezza informativa che si riverbera direttamente sull'efficacia delle politiche di riqualificazione. Non è possibile programmare interventi manutentivi affidabili in assenza di una base documentale aggiornata sullo stato di fatto degli edifici; e questa base documentale, nel caso dell'ERP italiana, è sistematicamente lacunosa, distribuita tra archivi di diversa provenienza e qualità, spesso non digitalizzata e non accessibile in modo integrato (Puccini & Tomassi, 2019). Le direttive europee sull'efficienza energetica degli edifici (EPBD) e i target di decarbonizzazione al 2050 impongono una stagione di interventi strutturali sul patrimonio costruito¹⁰, individuando nel parco pubblico la leva prioritaria d'intervento. Intervenire su edifici di cui non si conosce lo stato costruttivo reale espone al rischio di progettare interventi inefficaci sul piano energetico o incongrui su quello conservativo, e la carenza documentale finisce così per interferire con l'attuazione concreta delle politiche climatiche nazionali oltre con l'ordinaria gestione.

Il contesto descritto assume caratteri di particolare criticità nella città di Foggia e nella provincia di Capitanata, territori sui quali si concentrano i casi studio della presente ricerca. Foggia è classificata come "comune ad alta tensione abitativa"¹¹ ai sensi della Delibera CIPE n. 87 del 13 novembre 2003, una designazione che segnala una

¹⁰ Si rimanda al quadro normativo definito dal pacchetto europeo "Pronti per il 55%" (*Fit for 55*) e alla più recente Direttiva EPBD (UE 2024/1275). Tali disposizioni impongono agli Stati membri di accelerare il tasso di riqualificazione profonda degli edifici, individuando nel patrimonio pubblico il settore prioritario d'intervento per abbattere le emissioni e raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione totale fissati per il 2050 dall'Accordo di Parigi e dal Green Deal europeo.

¹¹ La qualifica di "Comune ad alta tensione abitativa" identifica quei centri urbani dove il divario tra domanda e offerta di alloggi è talmente critico da richiedere provvedimenti speciali, come la sospensione delle procedure di sfratto o l'accesso a canali di finanziamento agevolati per l'edilizia sovvenzionata e convenzionata.

sproporzione strutturale tra la domanda di alloggi a basso costo e la disponibilità effettiva di soluzioni abitative adeguate. Nonostante la contrazione demografica registrata nell'ultimo ventennio, la città presenta una pressione abitativa tra le più elevate a livello regionale, il calo della popolazione residente non corrisponde a una riduzione della domanda di alloggi, poiché parallelamente si è registrato un aumento del numero di nuclei familiari e una riduzione della loro dimensione media, con la conseguente crescita delle unità abitative necessarie a fronte di un parco edilizio pubblico sostanzialmente invariato. Le spese per l'abitazione pesano in misura crescente sui bilanci familiari, con un impatto particolarmente gravoso sui nuclei monocomponente (Annese et al., 2024).

Il patrimonio ERP della città è gestito da A.R.C.A. Capitanata, con una concentrazione prevalente in due macroaree periferiche: i quartieri Candelaro, Biccari e Borgo Croci nel settore nord-occidentale, e il quartiere CEP nel settore sud-orientale (Fig. 5) (Annese et al., 2024). La grande maggioranza degli edifici è riconducibile ai periodi costruttivi corrispondenti ai due settenni INA-Casa, con una quota marginale relativa agli anni più recenti (Chiarantoni, 2022). Questo profilo temporale ha implicazioni dirette sulla qualità fisica del patrimonio (Fig. 6), buona parte degli alloggi presenta infatti livelli prestazionali tecnici, energetici e impiantistici largamente inadeguati agli standard normativi vigenti. Il peso complessivo del patrimonio ERP rispetto alla struttura abitativa cittadina è rilevante, con una quota di alloggi pubblici superiore a quella registrata nel capoluogo regionale, il che conferma come il ricorso all'alloggio pubblico non sia a Foggia un'eccezione ma una condizione strutturale per una parte significativa della popolazione (Chiarantoni, 2022).



Fig. 5 – Foggia, indicazione planimetrica delle due aree ad alta concentrazione di ERP. Adattato da (Anaclerio, Ariola, Gabrieli, et al., 2023)

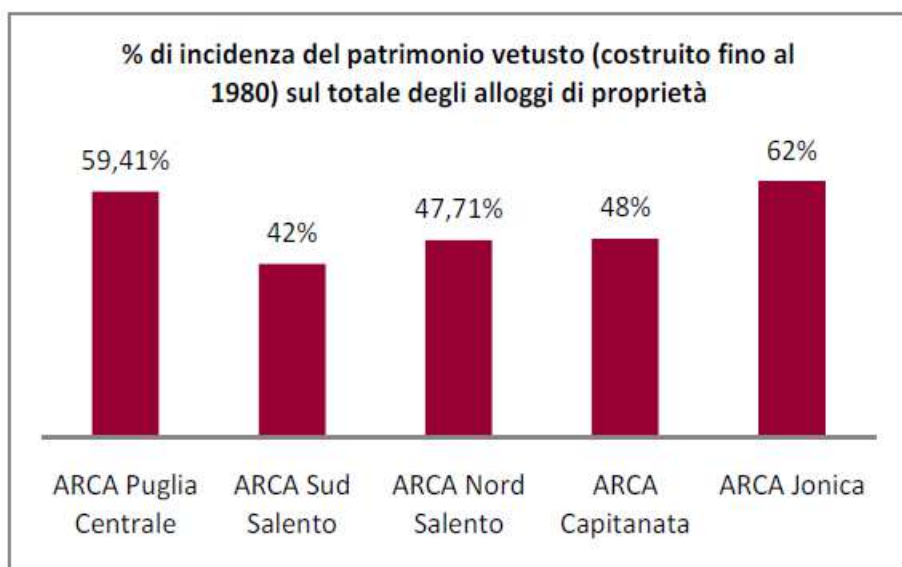


Fig. 6 - Dati ISTAT rappresentanti la percentuale di "vetustità" del patrimonio immobiliare di ERP nelle varie sezioni provinciali dell'ente A.R.C.A. Puglia.

Le periferie nord-occidentali e sud-orientali della città presentano fenomeni di emergenza abitativa acuta che si sovrappongono e si alimentano reciprocamente. Alle condizioni di sovraffollamento si aggiungono fenomeni documentati di occupazione abusiva di edifici pubblici e privati, insediamenti informali e strutture abitative precarie, nonché un trend crescente di morosità e sfratti in entrambi i settori (Annese et al., 2024). In questi ambiti si concentrano situazioni di degrado fisico avanzato, con edifici a rischio strutturale e spazi pubblici in stato di abbandono, che contribuiscono a una condizione di marginalizzazione difficile da invertire senza una conoscenza aggiornata del patrimonio.

Di fronte a questa condizione, la risposta delle istituzioni si è articolata negli ultimi vent'anni in una lunga sequenza di programmi di rigenerazione urbana che si sono succeduti senza una reale discontinuità, proponendo spesso le stesse soluzioni negli stessi quartieri senza che gli interventi venissero portati a compimento (Annese et al., 2024). L'unico intervento giunto a termine è la costruzione di 45 nuove unità abitative

nell'ambito del Piano Nazionale di Edilizia Abitativa. Questa reiterazione senza esito indica un limite strutturale del piano, dunque, l'assenza di una conoscenza aggiornata del patrimonio rende difficile definire strategie di intervento genuinamente calibrate sulle condizioni specifiche degli edifici e dei loro abitanti.

Il caso del quartiere Biccari illustra concretamente questa difficoltà. Composto da edifici in linea realizzati prevalentemente tra gli anni Sessanta e Novanta, con struttura a telaio in cemento armato, il quartiere presenta un utilizzo del patrimonio ARCA pari a circa la metà della capacità residenziale potenziale: la grande maggioranza dei nuclei familiari è composta da uno a tre componenti con un'età media elevata, a fronte di alloggi dimensionati per famiglie numerose (Chiarantoni, 2022). Il disallineamento tra il tipo edilizio originario e la composizione demografica attuale è emblematico di un problema più generale, ovvero l'assenza di strumenti di monitoraggio continuo che consentano agli enti gestori di aggiornare la propria conoscenza del patrimonio in modo tempestivo e strutturato.

Questo limite si accentua nei casi in cui il patrimonio interessato possiede anche una qualità architettonica riconoscibile, poiché la carenza documentale mette a rischio la programmazione degli interventi e anche la conservazione di caratteri originari che hanno un preciso valore storico e tipologico. I complessi residenziali oggetto dei casi studio della ricerca rientrano in questa condizione, dove, la difficoltà di accedere agli spazi interni, determinata dalla presenza degli inquilini, impedisce ai tecnici di costruire quel quadro conoscitivo affidabile che è presupposto necessario per qualsiasi intervento efficace.

La carenza documentale è del resto trasversale all'intero patrimonio gestito da A.R.C.A. Capitanata, infatti, la documentazione tecnica esistente è dispersa e prevalentemente cartacea, poiché gli archivi degli ex IACP riflettono decenni di gestione routinaria in cui la raccolta sistematica dei dati non era una priorità amministrativa. Strategie efficaci di rigenerazione richiedono un aggiornamento continuo delle conoscenze e una visione

che tenga conto delle specificità di ogni contesto, ma si tratta di operazioni per le quali le amministrazioni pubbliche si trovano spesso tecnicamente impreparate (Annese et al., 2024).

2.4 Storia e normativa dell'edilizia residenziale pubblica in Spagna: il caso di Saragozza

La ricostruzione del quadro normativo e istituzionale che ha prodotto il patrimonio di edilizia residenziale pubblica spagnola oggetto della presente ricerca non può prescindere da un dato di contesto che la distingue dalla vicenda italiana, ovvero, il fatto che in Spagna il problema abitativo del secondo dopoguerra si innesta su una dittatura che ha appena vinto una guerra civile e che fa dell'edilizia popolare uno strumento di controllo sociale e di legittimazione politica. Questa premessa è tuttavia indispensabile per comprendere le ragioni che hanno orientato le scelte normative, tipologiche e gestionali del periodo, e le loro conseguenze sul patrimonio costruito che oggi si trova al centro dell'attenzione della ricerca.

Il punto di partenza è la Guerra Civile spagnola (1936-1939), più che la Seconda guerra mondiale in senso stretto, e i suoi sviluppi. Le conseguenze di quel conflitto, distruzione parziale del tessuto urbano, spostamenti di popolazione, blocco dell'attività edilizia privata, e un isolamento internazionale che preclude alla Spagna l'accesso al Piano Marshall¹², determinano una crisi abitativa prodotta dalla guerra, dall'autarchia economica imposta dalle circostanze e dalla rapida urbanizzazione che accompagna la

¹² La Spagna fu esclusa dal Piano Marshall a causa dell'isolamento diplomatico imposto al regime franchista dalle potenze vincitrici e dall'ONU (1946), che lo consideravano un residuo dei totalitarismi dell'Asse. Tale esclusione privò il Paese dei capitali internazionali per la ricostruzione, costringendolo a una rigida autarchia economica che esasperò la crisi abitativa post-bellica.

prima industrializzazione forzata del regime. la questione della casa assume una valenza diversa rispetto al caso italiano, meno orientata alla solidarietà tra lavoratori e più direttamente funzionale alla stabilizzazione e al controllo del proletariato urbano.

A Saragozza, la situazione urbanistica della fine degli anni Trenta (Fig. 7) rispecchia questa condizione generale dove la città non subisce distruzioni belliche significative, ma accumula da anni un deficit abitativo acuto, aggravato dal forte movimento migratorio proveniente dalle campagne, che satura il tessuto urbano e provoca una crescita incontrollata della periferia (Cervero Sánchez, 2017).

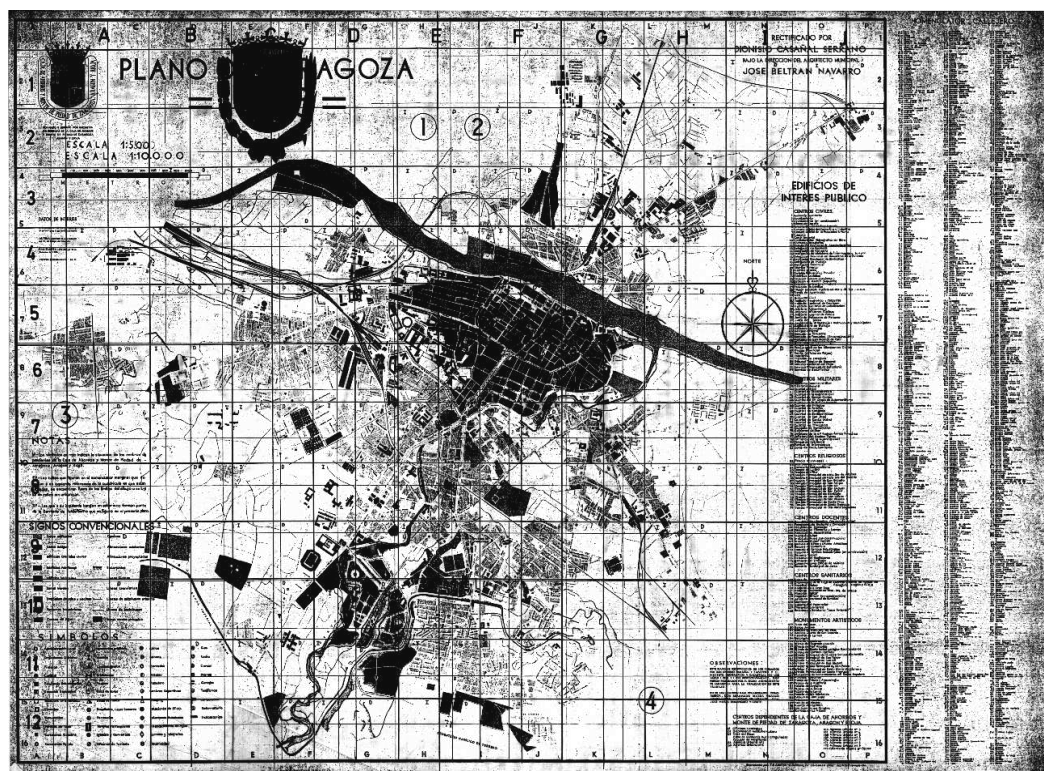


Fig. 1 - Saragozza "Plano parcelario". Scala 1:10000. Instituto Geografico y Catastral, 1935.

Le esperienze pre-franchiste avevano già introdotto i primi strumenti di intervento pubblico nel settore. Le leggi sulle *Casas Baratas* del 1911 e del 1921¹³ avevano promosso la realizzazione di quartieri a bassa densità ispirati al modello della città-giardino anglosassone, con un'impronta fortemente igienista, e avevano per la prima volta attribuito ai municipi la responsabilità di programmare e gestire l'edilizia popolare. La modifica del 1921 aveva rafforzato il ruolo dei comuni e introdotto strumenti di esproprio per pubblica utilità, e il suo Regolamento estendeva per la prima volta la nozione di abitabilità oltre la singola unità, prescrivendo equipaggiamenti, spazi liberi e zone ricreative nei gruppi di edilizia economica (Cervero Sánchez, 2017). A Saragozza, queste normative produssero realizzazioni di dimensioni contenute e qualità disomogenea, come il progetto di Ciudad Jardín del 1934, promosso dall'amministrazione comunale su progetto di Miguel Ángel Navarro e sviluppato in una successiva variante nel 1936 (Yeste Navarro, 1999), mentre le Casas Baratas realizzate poco prima e durante la Guerra Civile documentano una fase pionieristica in cui la domanda di alloggi popolari eccedeva la capacità di risposta delle istituzioni, e in cui le assegnazioni finivano spesso per avvantaggiare i ceti meno bisognosi a scapito delle classi più disagiate (Martí Nasarre, 1994).

Con la vittoria franchista del 1939, la politica della casa cambia scala, obiettivi e significato. In quello stesso anno viene istituito l'*Instituto Nacional de la Vivienda* (INV), organismo centralizzato con il compito di progettare, pianificare e controllare le realizzazioni ufficiali; nel 1942 viene affiancato dall'*Obra Sindical del Hogar* (OSH), braccio operativo del sindacato verticale di Stato, incaricato di promuovere e costruire concretamente gli alloggi per i lavoratori (Sambricio, 2020, cit. in Cervero Sánchez,

¹³ La prima *Ley de Casas Baratas* (1911) rappresentò il primo intervento normativo dello Stato spagnolo per affrontare l'emergenza degli alloggi operai. La successiva riforma del 1921 ampliò notevolmente il raggio d'azione, introducendo prestiti agevolati, sussidi statali ed esenzioni fiscali per incentivare cooperative e amministrazioni locali a costruire nuovi quartieri periferici (*Ciudades Jardín*) lontani dal sovraffollamento dei centri storici.

2022). La *Ley de 19 de abril de 1939*¹⁴ costituisce il primo strumento normativo organico del nuovo apparato e introduce un sistema di categorie abitative per fasce di reddito, definisce standard dimensionali e di costo, e fissa meccanismi di sussidi e agevolazioni fiscali che si affiancano a restrizioni sui prezzi di costruzione e di assegnazione. La retorica ufficiale sostituisce progressivamente il termine tecnico *vivienda* con quello di *hogar*, intendendo l'alloggio come nucleo della famiglia tradizionale e baluardo contro la disgregazione morale e sociale (Sambricio, 2020, cit. in Cervero Sánchez, 2022). Questa ideologia si traduce in scelte tipologiche orientate, nella prima fase, al rifiuto del grande condominio anonimo in favore di soluzioni che richiamassero valori rurali e regionali, con risultati non dissimili da certe prime realizzazioni INA-Casa in Italia, pur in un contesto istituzionale diverso.

La fase autarchica che si estende dal 1939 alla metà degli anni Quaranta è caratterizzata da scarsità di risorse, difficoltà di accesso ai materiali da costruzione e scarsa partecipazione dell'iniziativa privata, scoraggiata dalla rigidità normativa e dalla mancanza di redditività. A Saragozza, l'OSH realizza in questi anni i primi *conjuntos* residenziali della periferia, tra cui il grupo Francisco Caballero (1940-1946) e il grupo Agustín Gericó (1943-1948), entrambi progettati da José de Yarza García e Alejandro Allanegui, caratterizzati da blocchi lineari di moderata altezza, con un linguaggio architettonico che mescola razionalismo semplificato e citazioni vernacolari (Cervero Sánchez, 2017); l'analisi planimetrica di questi due complessi conferma l'adozione dello schema a doppio corpo di fabbrica con corridoio centrale, già sperimentato nella produzione zaragozana del primo Novecento (Yeste Navarro, 2008). L'impiego di materiali tradizionali (laterizio portante, solai voltati, intonaci locali) risponde in primo luogo a una necessità imposta dall'isolamento internazionale del paese, che rendeva difficilmente reperibili materiali industriali come il cemento armato e l'acciaio (Cervero Sánchez, 2017).

¹⁴ Conosciuta come la legge fondativa dell'INV (*Instituto Nacional de la Vivienda*), rappresentò la base del corporativismo franchista in ambito edilizio. Sostituendo la legislazione precedente, accentrò nello Stato il controllo assoluto sulla programmazione e sul finanziamento delle neonate *Viviendas Protegidas*.

Per incentivare la partecipazione privata, che stentava a decollare, il regime varò nel novembre 1944 la *Ley de Viviendas Bonificadas*¹⁵, che introduceva sgravi fiscali significativi e prestiti agevolati per i costruttori privati impegnati a realizzare alloggi a prezzi calmierati, allargando la platea dei beneficiari anche alla classe media impiegatizia. A completamento di questo scenario, una legge del luglio 1946 stabiliva l'obbligo per le imprese con più di cinquanta dipendenti di fornire alloggio ad almeno il venti per cento della propria forza lavoro, creando un legame diretto tra industrializzazione e produzione edilizia (Cervero Sánchez, 2017). A Saragozza, questo meccanismo favorì la nascita di quartieri promossi direttamente da grandi aziende per i propri lavoratori, segnando un passaggio verso la diversificazione degli attori della produzione residenziale. Dal punto di vista tipologico, la necessità di ottimizzare i costi di urbanizzazione spingeva gradualmente verso il blocco aperto pluripiano, abbandonando la bassa densità dei primi insediamenti e anticipando le logiche quantitative dei decenni successivi (Martí Nasarre, 1994).

Una svolta significativa nel quadro normativo si produce nel 1954 con la *Ley de Viviendas de Renta Limitada*¹⁶ (BOE, n. 197, 15 luglio 1954), che rappresenta il tentativo più articolato di razionalizzare e classificare l'intera produzione di edilizia agevolata. La legge suddivide gli alloggi in gruppi e categorie in base a parametri dimensionali e di costo: il Primo Gruppo, esente da aiuti diretti ma beneficiario di agevolazioni fiscali; il Secondo Gruppo, destinatario di sovvenzioni statali, articolato in tre categorie con superfici utili rispettivamente fino a 150, 100 e 80 metri quadri. A margine di questo schema, il decreto di applicazione del 1954 regolamentava le *viviendas de tipo social*, destinate alle fasce più deboli e caratterizzate da superfici minime, assenza di riscaldamento centralizzato e finiture ridotte all'essenziale. La legge

¹⁵ La norma introdusse forti esenzioni fiscali e l'accesso prioritario alle materie prime (allora razionate) per i costruttori privati. L'obiettivo era sopperire all'insufficiente produzione dello Stato (INV), delegando parte dell'attività edilizia sociale al mercato privato nel difficile contesto autarchico del dopoguerra.

¹⁶ La legge unificò le varie tipologie di edilizia sociale in un sistema organico basato su categorie di reddito e sussidi. Fu il pilastro normativo che permise di passare dalla costruzione artigianale alla produzione di massa, preparando il terreno per il primo Piano Nazionale della Casa (1955) e segnando il definitivo superamento della fase autarchica.

si ispirava esplicitamente al Piano Fanfani italiano e alla legge federale tedesca del 1949, entrambe già operative da cinque anni, e con il suo Reglamento del 1955 introduceva criteri tecnici vincolanti per l'implantazione, la composizione e la normalizzazione degli elementi costruttivi (Cervero Sánchez, 2017). Nello stesso anno entrava in vigore il secondo Piano Nazionale della Casa, concentrato sulle aree di maggiore crescita demografica, tra cui Saragozza. L'impatto nel contesto zaragozano è documentato dall'intensa attività dell'OSH in questo periodo: tra il 1954 e il 1957 vengono costruiti nove *conjuntos* per un totale di circa 3.450 alloggi, affidati principalmente agli architetti della Delegación de Sindicatos della provincia, Alejandro Allanegui e Fausto García Marco, che elaborano un metodo di lavoro unificato capace di standardizzare le tipologie, la configurazione dei blocchi e il sistema costruttivo (Cervero Sánchez, 2017).

La svolta istituzionale del 1957 ridisegna il quadro. La creazione del *Ministerio de la Vivienda* (Decreto-Ley, 26 febbraio 1957, BOE n. 57), primo ministero spagnolo dedicato esclusivamente alla questione abitativa, concentra in un unico organismo le competenze precedentemente disperse. La svolta coincide con l'arrivo al governo dei tecnocrati dell'Opus Dei e con l'abbandono dell'autarchia in favore di una politica di sviluppo economico accelerato, il cosiddetto *desarrollismo*¹⁷. Il *Plan de Urgencia Social*, approvato inizialmente per Madrid e poi esteso all'intero paese con il Decreto del 24 gennaio 1958, introduce la categoria delle *viviendas subvencionadas* e trasforma l'edilizia popolare in un settore economicamente strategico per il capitale privato, innescando un meccanismo di produzione di massa che condiziona l'intera stagione successiva (Cervero Sánchez, 2017). Il *Plan de Estabilización* del 1959 consolida questa apertura economica, e il terzo Piano Nazionale della Casa del 1961 porterà il settore a emanciparsi progressivamente dalla dipendenza dagli aiuti pubblici.

¹⁷ Termine che identifica il periodo di accelerata crescita economica e industriale della Spagna tra il 1959 e il 1975. In ambito urbanistico, si tradusse in una massiccia espansione delle città e in una produzione edilizia intensiva, volta a rispondere rapidamente all'esodo rurale attraverso l'adozione di logiche razionaliste e criteri di pianificazione tecnocratica.

Il quindicennio che va dalla fine degli anni Cinquanta alla seconda metà degli anni Settanta produce la massa più consistente del patrimonio ERP spagnolo, nella stagione dei grandi *polígonos*¹⁸ residenziali. I flussi migratori interni dalle campagne verso le città industriali aumentano la domanda di alloggi urbani e impongono risposte di scala inedita. A Saragozza, la crescita demografica accelerata degli anni Cinquanta-Sessanta, alimentata dall'immigrazione interna, genera una pressione abitativa che i soli meccanismi di mercato non riescono a soddisfare. Gli interventi di edilizia pubblica del periodo si concentrano nelle zone di espansione periferica, con tipologie che vanno dai blocchi lineali alle torri residenziali, in dialogo con i principali riferimenti europei del razionalismo tardo-moderno. Sul piano costruttivo si generalizza il telaio di calcestruzzo armato, che libera la facciata dall'obbligo portante e consente una maggiore flessibilità distributiva delle piante, mentre compaiono i primi elementi prefabbricati e i serramenti industrializzati (Cervero Sánchez, 2022).

Il Conjunto Balsas de Ebro Viejo, realizzato nella zona di El Picarral sulla sponda nord del fiume Ebro tra il 1964 e il 1975 su progetto di Alejandro Allanegui, Fausto García Marco, Jesús Guindeo, José Luis de la Figuera e Lorenzo Monclús, costituisce l'intervento di edilizia pubblica di maggiore volume e complessità mai realizzato a Saragozza, e rappresenta uno dei casi studio della presente ricerca. Il Piano Parziale del complesso, approvato nel 1961 dalla Cooperativa Sindical de la Vivienda su terreni espropriati dall'INV, prevedeva originariamente 1.650 alloggi, ridotti a 1.534 nel progetto riformato del 1967 e a 1.520 unità effettivamente costruite; il sistema insediativo comprende alloggi di diverse categorie normative (a canone calmierato, di prima e seconda categoria, edilizia sovvenzionata di terza categoria e di tipo sociale), distribuiti in 44 blocchi lineali di cinque piani, 5 torri di dodici piani e un blocco lineare di dodici piani, organizzati attorno a un sistema di dotazioni scolastiche, commerciali, sportive e di culto che ne garantisce l'autonomia funzionale (Cervero Sánchez, 2022).

¹⁸ Grandi complessi residenziali periferici ad alta densità, caratterizzati da modelli edilizi ripetitivi e standardizzati. Furono lo strumento urbanistico principale per gestire l'urbanizzazione accelerata e l'esodo rurale, consentendo la costruzione rapida e massiva di migliaia di alloggi popolari.

Il complesso rappresenta la sintesi delle logiche normative del *desarrollismo* applicate alla scala del quartiere, ed è anche l'espressione più matura di una stagione progettuale che, come si approfondirà nel paragrafo successivo, seppe in alcuni casi raggiungere una qualità architettonica che trascende la semplice risposta quantitativa all'emergenza abitativa.

Un aspetto peculiare della normativa spagnola, che differisce sensibilmente dal modello italiano e ha importanti ripercussioni sulla gestione attuale del patrimonio, riguarda il regime di proprietà. Mentre in Italia il meccanismo INA-Casa prevedeva un percorso di riscatto dilazionato nel tempo, mantenendo la gestione pubblica per decenni, la politica franchista perseguì fin dagli anni Sessanta una proprietarizzazione rapida e sistematica degli alloggi assegnati, cedendoli agli occupanti a prezzi politicamente vantaggiosi con l'obiettivo esplicito di trasformare il proletariato in classe proprietaria e ridurre la combattività sociale (Cervero Sánchez, 2017). Il risultato è che molti quartieri nati come interventi unitari di promozione pubblica si sono frammentati in migliaia di micro-proprietà private, rendendo oggi estremamente difficile qualsiasi operazione di riqualificazione che richieda una gestione coordinata dell'intero edificio o del complesso. Gli enti pubblici residui, come la Società Municipale Zaragoza Vivienda, gestiscono spesso soltanto le quote di patrimonio non ancora alienato, trovandosi a negoziare ogni intervento con un numero elevato di proprietari in assemblee condominiali complesse e con risorse economiche limitate.

Come nel caso italiano, la stagione dei grandi programmi abitativi spagnoli si chiude lasciando un patrimonio costruito di qualità disomogenea, privo di una documentazione tecnica e sottoposto nel tempo a trasformazioni non coordinate. La transizione democratica e le riforme istituzionali degli anni Settanta e Ottanta (con il trasferimento delle competenze alle "Comunidades Autónomas") ridisegnano il quadro degli enti gestori senza risolvere il problema della conoscenza del patrimonio esistente. Questa eredità normativa, materialmente impressa nelle piante e nelle sezioni degli edifici costruiti, costituisce il secondo versante del deficit conoscitivo che la presente ricerca intende affrontare, e il punto di partenza necessario per comprendere le logiche

progettuali e le ambizioni architettoniche degli interventi aragonesi del periodo, ai quali il paragrafo successivo è dedicato.

Un riepilogo dei piani abitativi discussi in questo paragrafo è riportato nella tabella sottostante:

Periodo	Piano/Ente	Quadro normativo o fonte di finanziamento	Caratteristiche e obiettivi
1911-1936	Casas Baratas (Consigli municipali/patronati)	Leggi sulle <i>Casas Baratas</i> del 1911 e del 1921.	Prima legislazione sistematica sull'edilizia pubblica in Spagna. Promosse quartieri a bassa densità ispirati al modello della città-giardino, con un approccio igienista. Per la prima volta, ai Comuni fu assegnata la responsabilità della pianificazione e della gestione degli alloggi a prezzi accessibili. L'emendamento del 1921 rafforzò il ruolo delle amministrazioni locali, introdusse il potere di esproprio per pubblica utilità e ampliò gli standard di abitabilità per includere spazi aperti e servizi comuni.
1939-1954	INV-Instituto Nacional de la Vivienda	Legge del 19 aprile 1939 sulle Abitazioni Protette (<i>Viviendas Protegidas</i>)	Istituito dopo la Guerra Civile per fare fronte all'emergenza abitativa causata dal conflitto, dall'autarchia e dalla rapida urbanizzazione. Introdusse categorie di alloggi suddivise per fasce di reddito, standard dimensionali, sussidi e agevolazioni fiscali. La retorica ufficiale presentava la casa come il nucleo della famiglia tradizionale ("hogar"). Le prime tipologie edilizie privilegiarono forme a bassa densità capaci di evocare i valori rurali, a scapito dei grandi condomini anonimi.

1942-1977	OSH-Obra Sindical del Hogar	Fondato nel 1942 all'interno della struttura sindacale verticale franchista (Organización Sindical Española).	Braccio operativo dell'apparato sindacale dello Stato, responsabile della costruzione diretta di alloggi per i lavoratori. Collaborò con l'INV e, dal 1957, con il Ministero della Casa. Realizzò alcuni dei più grandi complessi residenziali pubblici del periodo, tra cui importanti quartieri (<i>conjuntos</i>) a Saragozza. Dopo la transizione democratica, la sua attività fu progressivamente assorbita nel più ampio sistema delle VPO (<i>Viviendas de Protección Oficial</i>).
1954-1957	Viviendas de Renta Limitada (INV / Ministero del lavoro)	Legge sulle Abitazioni a Canone Limitato (<i>Viviendas de Renta Limitada</i>) del 15 luglio 1954 (BOE n. 197); Regolamento di attuazione del 1955.	Il tentativo più articolato di razionalizzare la produzione di edilizia sovvenzionata. Suddivideva gli alloggi in gruppi in base alla superficie e al costo: Gruppo I (solo agevolazioni fiscali); Gruppo II (sussidio statale diretto, con tre sottocategorie fino a 150, 100 e 80 m ²). Una categoria a parte, definita "tipo sociale", si rivolgeva ai nuclei familiari più poveri con superfici minime e finiture essenziali. Esplicitamente ispirato al Piano Fanfani italiano e alla Legge federale sulla casa (<i>WoFGB</i>) tedesca del 1949.
1957-1960	Plan de Urgencia Social	Decreto-legge del 26 febbraio 1957 istitutivo del Ministero della Casa (BOE n. 57); Decreto del 24 gennaio 1958 di approvazione del Piano di Urgenza Sociale (<i>Plan de Urgencia Social</i>).	Creazione del primo ministero spagnolo dedicato esclusivamente alla casa. Coincise con l'arrivo dei tecnocrati dell'Opus Dei e con il passaggio dall'autarchia a uno sviluppo economico accelerato (<i>desarrollismo</i>). Introdusse le <i>viviendas subvencionadas</i> (abitazioni sovvenzionate) e trasformò l'edilizia pubblica in un settore economico strategico aperto al capitale privato, innescando un meccanismo di produzione di massa che avrebbe caratterizzato i decenni successivi.

1957-1970s	Ministerio de la Vivienda	Piani Nazionali della Casa: 2° (1961–1963) 3° (1964–1967) 4° (1968–1971) 5° (1972–1975).	Fase di intensa attività costruttiva legata al boom del <i>desarrollismo</i> e al massiccio esodo rurale verso le aree urbane. Grandi complessi residenziali periferici (<i>polígonos de vivienda</i>) vennero edificati su una scala senza precedenti. Le strutture a telaio in cemento armato divennero lo standard e, per la prima volta, fecero la loro comparsa elementi prefabbricati. Un tratto distintivo fu il rapido trasferimento della proprietà agli occupanti (<i>propietarización</i>), che frammentò complessi pubblici originariamente unitari in una miriade di micro-proprietà private, con conseguenze durature sulla possibilità di coordinare i futuri interventi di riqualificazione.
Dalla fine degli anni '70 in poi	Sistema delle VPO (Vivienda de Protección Oficial) / Comunità Autonome	Costituzione spagnola del 1978; trasferimento delle competenze in materia di edilizia residenziale ai governi regionali; regio decreto 3148/1978 sulle Abitazioni Protette Ufficiali.	La transizione democratica ha trasferito le competenze in materia di edilizia residenziale alle Comunità Autonome, sostituendo il modello centralizzato franchista. Il sistema delle VPO ha unificato le precedenti categorie di sussidi. Gli enti pubblici residui gestiscono ormai solo la quota di patrimonio non ancora privatizzata, negoziando gli interventi con un gran numero di singoli proprietari e disponendo di risorse limitate.

2.5 Esperienze architettoniche spagnole e progettisti del settore: Saragozza

La produzione di “vivienda protegida” (edilizia residenziale pubblica) a Saragozza tra il 1939 e il 1975 si sviluppa all’interno del quadro normativo e istituzionale

descritto precedentemente, ma trova la propria attuazione in una dinamica urbana specifica. A differenza di altri centri spagnoli, la città non subisce distruzioni significative del tessuto edilizio durante la guerra civile; tuttavia, la pressione demografica generata dai flussi migratori provenienti dalle campagne aragonesi produce dalla fine degli anni Trenta un processo di suburbanizzazione incontrollata, con cinture di parcellazioni informali ai margini del nucleo urbano che il piano fatica a governare (Cervero Sánchez, 2017). La *vivienda protegida* interviene in questo scenario come strumento di colonizzazione delle aree periferiche. I *conjuntos* residenziali costruiti nel dopoguerra ridefiniscono la morfologia di interi settori della città, ben oltre la semplice risposta al fabbisogno quantitativo, stabilendo presenze urbane che, pur soggette a trasformazioni successive, mantengono nel tempo un'identità riconoscibile (Cervero Sánchez, 2017).

Il contesto architettonico saragozzano degli anni Quaranta e Cinquanta è segnato da condizioni operative che limitano fortemente la libertà progettuale. Il limitato volume degli investimenti nella *vivienda protegida* durante il primo franchismo dipende in larga parte da scelte economiche autarchiche¹⁹ che privilegiarono la ricostruzione del settore agricolo e industriale, lasciando la questione abitativa in posizione subordinata rispetto ad altri obiettivi della politica economica (Sambricio, 2020). La scarsità di materiali da costruzione, la rigidità delle norme sulle superfici e sui costi massimi di esecuzione, la dipendenza dai circuiti di finanziamento dell'INV e dell'OSH rendono l'architettura di questo periodo un esercizio di ottimizzazione tipologica più che di sperimentazione formale. La produzione è affidata quasi interamente a professionisti locali che operano con continuità all'interno degli apparati pubblici, elaborando nel tempo un repertorio di soluzioni che si consolida attraverso la ripetizione. Tre figure caratterizzano la stagione costruttiva che interessa direttamente i casi studio della presente ricerca: José de Yarza García, Alejandro Allanegui e Fausto García Marco.

¹⁹ L'autarchia franchista (1939-1959) impose una drastica riduzione delle importazioni, causando una cronica carenza di acciaio e cemento. Questo isolamento economico costrinse gli architetti dell'INV (*Instituto Nacional de la Vivienda*) a recuperare tecniche costruttive tradizionali, come la muratura portante e le volte in laterizio, posticipando l'adozione su larga scala del telaio in cemento armato rispetto ad altri paesi europei.

Yarza García è il solo tra i protagonisti di questo periodo ad avere maturato una formazione in parte europea, con soggiorni di studio in Germania e nei paesi scandinavi negli anni Trenta, attraverso i quali entra in contatto con i principi del razionalismo abitativo, dell'orientamento eliotermico e della relazione tra edificio e spazio verde. Questa sensibilità si traduce, nelle realizzazioni saragozzane, in una cura per la qualità distributiva degli alloggi e per l'organizzazione degli spazi liberi dei *conjuntos* che non sempre caratterizza la produzione coeva. Le sue opere di *vivienda social*, tra cui il Grupo Francisco Caballero (1940-1946) (Fig. 8) e la prima fase del Grupo San Jorge-Severino Aznar (1946), entrambi realizzati con Allanegui, si segnalano per la volontà di superare l'allineamento rigido all'isolato chiuso e di creare cortili semiaperti che favoriscono l'identificazione degli abitanti con il quartiere (Cervero Sánchez, 2017; Yeste Navarro, 2008). In questo stesso contesto professionale matura la figura di Fausto García Marco, il cui percorso si intreccia fin dagli anni Quaranta con quello di Alejandro Allanegui.

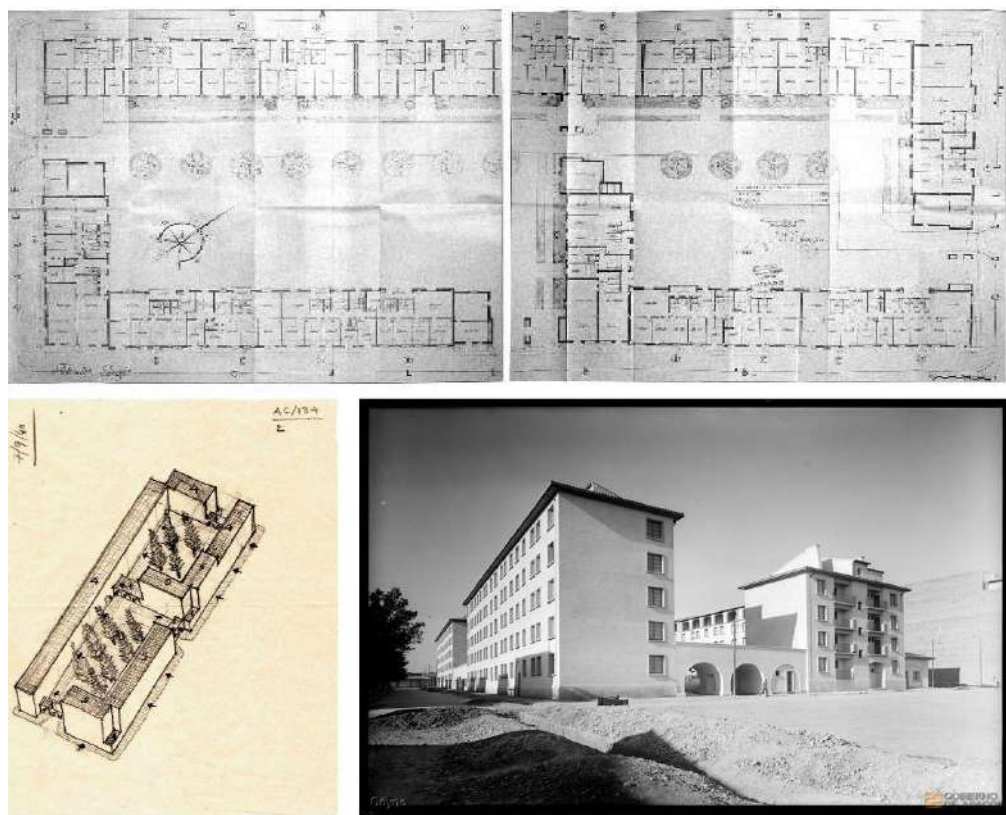


Fig. 8 - Il gruppo Francisco Caballero di Saragozza. (DARA Aragòn, archivosarquitectos.com)

Alejandro Allanegui rappresenta la figura del tecnico istituzionale dell'OSH per eccellenza. Architetto della Delegación Provincial de Sindicatos, partecipa in modo sistematico a quasi la totalità delle promozioni OSH saragozzane dagli anni Quaranta fino alla metà degli anni Sessanta. La sua collaborazione con García Marco si consolida progressivamente attraverso la grande serie di *conjuntos* realizzati tra il 1954 e il 1961 (Arzobispo Doménech, Gabriela Mistral, Andrea Casamayor, Casta Álvarez, Alférez Rojas), nei quali si fa sistema un metodo di lavoro che unifica criteri insediativi, configurazione dei blocchi, tipi di alloggio e sistema costruttivo (Cervero Sánchez, 2017). Si tratta di complessi di dimensione compresa tra 96 e 790 alloggi, formati da blocchi lineari di quattro e cinque piani integrati da volumi commerciali, capaci di

adattarsi sia a ordinamenti vincolati dalla maglia urbana preesistente (come nel caso di Andrea Casamayor) sia a configurazioni più libere rispetto alla topografia e all'orientamento, come in Alférez Rojas.

Fausto García Marco percorre una traiettoria professionale che, pur intrecciata con quella di Allanegui, evolve verso un'autonomia crescente. Compare nella documentazione saragozzana fin dai primi anni Quaranta: partecipa al progetto RENFE (1944-1948) insieme a Octavio Bans e Alfonso Fungairiño, e in seguito realizza la seconda fase del Grupo San Jorge-Severino Aznar (1952), adeguando ai vincoli economici del periodo il modello insediativo impostato nella prima fase (Cervero Sánchez, 2017). Dalla fine degli anni Cinquanta porta a termine in modo autonomo i *conjuntos* Teniente Polanco (1957-1961) (Fig. 9) e Ortiz de Zárate (1960-1961), quest'ultimo adiacente all'area che di lì a pochi anni accoglierà il Conjunto Balsas de Ebro Viejo.



Fig. 9 - Il conjunto Teniente Polanco a Saragozza.

Il Conjunto Teniente Polanco, 162 alloggi in quattro blocchi lineari di tre e cinque piani, struttura mista a muri e telaio di laterizio pieno, fondo di 7,20 metri, doppia campata e alloggi con doppio orientamento, sintetizza i caratteri tipologici dominanti della produzione OSH del periodo e anticipa le soluzioni che García Marco applicherà su scala ben più ampia nel progetto successivo (Cervero Sánchez, 2022).

Il Conjunto Balsas de Ebro Viejo (1964-1975) rappresenta il punto di arrivo di queste traiettorie professionali e l'intervento di *vivienda social* di maggiore dimensione realizzato nell'edilizia pubblica saragozzana del Novecento. La sua genesi coincide con un passaggio di scala comune a molti contesti europei. negli stessi anni in cui il polígono del Picarral viene pianificato, tutta l'Europa occidentale e orientale sperimenta la transizione dal gruppo residenziale di media dimensione al grande insediamento autonomo, accomunati dall'applicazione pedissequa dei principi urbani della Carta di Atene (separazione delle funzioni, liberazione del suolo, orientamento eliotermico dei blocchi) al problema della crescita accelerata delle città industriali (Monclús & Díez Medina, 2016). I *polígonos* spagnoli si inseriscono in questo quadro europeo condiviso, pur mantenendo specificità costruttive e normative proprie del contesto franchista. Il Piano Parziale del Poligono, approvato nel 1961 dalla Cooperativa Sindical de la Vivienda, riguarda un'area sulla riva sinistra dell'Ebro nel settore di El Picarral, espropriata dall'INV. I primi studi prevedono torri fino a sedici piani, ma la densità viene progressivamente ridotta: da 1.650 alloggi nella versione del 1964 a 1.534 nel progetto riformato del 1967, dei quali ne vengono infine costruiti 1.520 (Cervero Sánchez, 2022). Il gruppo di progettazione è composto da Alejandro Allanegui, Fausto García Marco, Jesús Guindeo, José Luis de la Figuera e Lorenzo Monclús; il promotore è la *Obra Sindical del Hogar*.

Dal punto di vista tipologico, il complesso si articola su due sistemi edilizi distinti: 44 edifici lineari di cinque piani e cinque torri di dodici piani, oltre a un blocco in linea di dodici piani contenente alloggi di prima categoria con locali e uffici ai piani terra e primo. I blocchi lineari, con profondità variabile tra gli 8,60 e gli 11,25 metri, presentano due alloggi per piano per ciascun vano scala; le cinque torri di dodici piani ospitano quattro

alloggi per piano (Cervero Sánchez, 2022). Il sistema costruttivo è a telaio di calcestruzzo armato in tutte le tipologie, in discontinuità con la struttura mista prevalente nei *conjuntos* precedenti di García Marco e Allanegui.

Le due tipologie presentano caratteri formali e distributivi distinti ma correlati. I blocchi lineali sono orientati prevalentemente a sud e a est, con apertura esterna tramite terrazze e gallerie. Le torri, di profondità 17,90 metri, presentano pianta a T con accesso a quattro alloggi per piano, terrazze rientrate e un grande sporto di gronda in copertura; questo elemento di ombreggiatura sui parapetti in laterizio è comune alle due tipologie e definisce un carattere plastico unitario dell'intero impianto (Cervero Sánchez, 2022). Sul piano distributivo, gli alloggi nei blocchi si organizzano attorno a un nucleo di servizi che genera due corridoi collegati dallo spazio giorno; nelle torri, la distribuzione simmetrica prevede un filtro di servizi che dà accesso a un modulo di camere con doppio orientamento, sempre con il soggiorno e la terrazza rivolti a sud. Le superfici utili degli alloggi variano indicativamente tra 55 e 114 m², in funzione della categoria normativa e del numero di vani (Cervero Sánchez, 2022).

L'ordinamento planivolumetrico del Conjunto si struttura su quattro fasce parallele disposte in direzione nord-sud, che alternano residenze di diverse categorie normative a dotazioni collettive. La fascia occidentale, delimitata dalle cinque torri e da blocchi lineari con alloggi a quattro vani, definisce il bordo del poligono; le fasce centrali accolgono le attrezzature educative, il centro parrocchiale e blocchi a configurazione variabile; la fascia orientale comprende il blocco in linea di prima categoria, dotazioni pubbliche e volumi commerciali, mentre il limite meridionale è definito da blocchi di tipo sociale (Cervero Sánchez, 2022). L'insieme è organizzato attorno a una serie di attrezzature (complesso scolastico, chiesa, impianti sportivi, centro anziani, spazi verdi) che conferiscono al complesso una relativa autonomia funzionale rispetto al contesto urbano circostante. Le trasformazioni subite dal Conjunto nel corso dei decenni successivi alla costruzione (invecchiamento della popolazione residente, progressiva rarefazione del commercio di prossimità, obsolescenza energetica degli involucri) hanno reso il poligono un caso di studio significativo per la riflessione sulla

rigenerazione dei grandi insediamenti pubblici del secondo Novecento (Monclús, Labarta & Díez Medina, 2015).

Al pari di quanto osservato per il contesto italiano, anche il patrimonio spagnolo e saragozzano del dopoguerra esprime un'intenzionalità progettuale che ne richiede una lettura che vada oltre la sola dimensione quantitativa. La cura nella definizione degli alloggi, il rapporto tra le diverse tipologie edilizie e l'attenzione agli spazi di transizione sono elementi essenziali per comprenderne lo stato attuale.

2.6 Condizione attuale dell'edilizia residenziale pubblica in Spagna: Saragozza

I *conjuntos* residenziali costruiti a Saragozza tra la fine degli anni Quaranta e la metà degli anni Settanta si trovano oggi in condizioni molto differenziate, accomunati tuttavia da una traiettoria evolutiva che ha progressivamente separato la qualità del progetto originario dalle condizioni materiali e sociali attuali. Questi insediamenti, nella loro fase di impianto collocati in posizione periferica rispetto al nucleo urbano consolidato, sono stati progressivamente inglobati dalla crescita della città, acquisendo la condizione di quelle che la letteratura specializzata definisce *periferias interiores*, ossia frammenti urbani generati durante il periodo di forte espansione degli anni Sessanta e Settanta, oggi fisicamente integrati nel tessuto compatto ma esposti a processi di obsolescenza relativa che richiedono strategie di rigenerazione organiche e di lungo periodo. Il cambiamento di posizione relativa (da periferia a periferia interna) è avvenuto senza un corrispondente miglioramento delle condizioni fisiche e sociali. L'invecchiamento del patrimonio costruito, la fragilità economica di molte comunità residenti e l'insufficiente manutenzione degli spazi collettivi hanno prodotto situazioni di degrado diffuso che rendono urgente un approccio sistematico alla conoscenza e alla gestione di questi quartieri (Monclús, Labarta & Díez Medina, 2015).

La condizione attuale di questi insediamenti non può essere letta come l'esito di un unico processo lineare di decadimento. Si possono distinguere due traiettorie principali, determinate dalla categoria normativa di appartenenza e dalla tipologia di promozione originaria. Da un lato, i complessi residenziali costruiti con categorie superiori e destinati a classi sociali con maggiore disponibilità economica hanno subito trasformazioni operate dai singoli proprietari in assenza di coordinamento, tra cui spicca la chiusura di logge, balconi e gallerie con serramenti eterogenei che ha alterato il carattere unitario delle facciate, compromettendo la leggibilità dei volumi originari e l'equilibrio compositivo che era uno degli elementi di qualità architettonica di questi complessi. Questo processo di trasformazione spontanea non è neutro ed elimina il carattere unitario dell'insieme e rende ogni futura operazione di riqualificazione dell'involucro più complessa, poiché richiede preliminarmente la gestione di una molteplicità di situazioni giuridiche e fisiche eterogenee. Dall'altro lato, i *conjuntos* costruiti con fini sociali più marcati, con standard di abitabilità più contenuti e destinati a categorie economicamente più vulnerabili, presentano segni di deterioramento fisico più accentuati e ospitano popolazioni con minori risorse per intervenire arrivando alla condizione attuale con una maggiore distanza dagli standard minimi di abitabilità contemporanei e con una popolazione più fragile (Cervero Sánchez, 2017).

Sullo sfondo di queste due traiettorie agiscono forme di obsolescenza che sono al tempo stesso fisiche, funzionali e sociali. L'*Atlas tipológico* di Cervero Sánchez osserva come le restrizioni economiche che hanno storicamente condizionato la produzione di edilizia residenziale pubblica abbiano generato una limitazione progettuale e costruttiva che, pur non impedendo soluzioni tipologiche di qualità discreta, ha prodotto schemi distributivi concepiti per un modello familiare gerarchico ormai superato, con superfici ridotte e compartimentazione rigida, difficilmente adattabili alle esigenze abitative contemporanee. La flessibilità tipologica, intesa come capacità dello schema planimetrico di rispondere a usi diversi e a composizioni familiari variabili nel tempo, è stata una risorsa che i residenti hanno messo a frutto spesso in modo non coordinato, attraverso modifiche interne che, sommate alle già citate trasformazioni delle facciate,

hanno ulteriormente complicato la lettura dei valori originari di questi edifici. A questo si aggiungono l'inefficienza energetica degli involucri (costruiti in un'epoca in cui le prestazioni termiche non erano oggetto di normativa specifica) e l'assenza di accessibilità fisica universale nei blocchi lineari, privi di ascensore, che trasformano gli alloggi dei piani superiori in spazi difficilmente praticabili per residenti anziani o con mobilità ridotta (Cervero Sánchez, 2017; Cervero Sánchez, 2022).

Il riconoscimento formale del valore patrimoniale di questi quartieri è intervenuto in modo organico dal 2001, quando i principali *conjuntos* del dopoguerra saragozzano sono stati inclusi nel Catálogo del Plan General de Ordenación Urbana di Saragozza (PGOUZ) come *Conjuntos Urbanos de Interés*, in applicazione della legislazione aragonese sulla protezione del patrimonio culturale. Il "Texto Refundido" del PGOUZ del 2007 motiva questo riconoscimento con le "especiales características de unidad y carácter de la edificación, morfología urbana, tipología edificada, ambientación" che rendono tali complessi oggetto di protezione orientata alla conservazione (Normas Urbanísticas, art. 3.2.2.4). È un riconoscimento significativo, che amplia il concetto tradizionale di patrimonio immobile (storicamente legato al valore artistico o monumentale) verso una dimensione urbana e collettiva. Questi *conjuntos*, infatti, vengono tutelati non per la qualità eccezionale di singoli elementi architettonici, ma per la coerenza morfologica complessiva e per la loro capacità di testimoniare un modo di produrre e abitare la città in un preciso momento storico. Il riconoscimento normativo ha stabilito un quadro di riferimento, ma non ha risolto i problemi strutturali di questi quartieri. Ha piuttosto reso più complessa qualsiasi operazione di trasformazione individuale, vincolando le comunità condominiali a procedure di autorizzazione più articolate e ponendo la questione della rigenerazione come sfida collettiva che eccede la sfera del singolo proprietario.

A partire da questo quadro normativo, nel 2004 la Sociedad Municipal Zaragoza Vivienda ha avviato uno studio della realtà fisica e sociale di questi quartieri, ponendo le basi per una strategia di rigenerazione urbana di lungo periodo attuata attraverso piani

speciali e interventi pilota di riabilitazione su blocchi campione. Queste operazioni miravano a sperimentare protocolli di aggiornamento funzionale e a incentivare l'iniziativa dei residenti. Si è trattato di operazioni di aggiornamento funzionale agli standard normativi vigenti che implicavano anche una rinnovazione formale, e che hanno rappresentato il primo vero tentativo, seppur ancora parziale, di affrontare l'obsolescenza di questi quartieri in modo coordinato tra soggetto pubblico e comunità condominiali. Il percorso intrapreso si inserisce nella transizione verso un modello di città compatta, che riduce gli effetti della segregazione sociale e della monofunzionalità tipici delle periferie costruite nei decenni del grande sviluppo urbano, e che tratta la rigenerazione dei *conjuntos* come strumento di integrazione funzionale e sociale nel tessuto cittadino (Cervero Sánchez, 2017; Monclús, Labarta & Díez Medina, 2015).

La specificità del Conjunto Balsas de Ebro Viejo si misura su una più ampia dimensione di complessità, sia per la scala dell'intervento originario sia per la molteplicità delle sfide che presenta oggi. Il complesso, per le sue dimensioni e la varietà delle tipologie adottate, rappresenta l'intervento di *vivienda social* di maggiore volume e complessità realizzato nella città di Saragozza. L'impianto planimetrico segue quattro bande parallele con orientamento prevalente a sud e a est, separate da zone di sosta intermedie, con dotazioni collettive distribuite a garantire una relativa autonomia funzionale del complesso rispetto alla città circostante. I blocchi lineari e le torri, con doppio orientamento e apertura mediante terrazze e gallerie verso sud e verso est, si organizzano attorno a questi equipaggiamenti secondo una logica insediativa che al momento della costruzione rappresentava il culmine della sperimentazione tipologica nell'edilizia pubblica saragozzana (Cervero Sánchez, 2022).

Nel corso del mezzo secolo successivo alla costruzione, il Conjunto Balsas de Ebro Viejo ha subito una trasformazione sostanziale della propria condizione relativa rispetto alla città. Da enclave periferica alla sponda sinistra dell'Ebro, su terreni all'epoca espropriati dall'Instituto Nacional de la Vivienda nel settore denominato El Picarral, il *conjunto* si trova oggi inserito in un tessuto urbano consolidato, configurandosi come

tipica periferia interna (Monclús, Labarta & Díez Medina, 2015). Questa nuova collocazione urbana avrebbe potuto costituire una risorsa, poichè la dotazione originaria di spazi aperti e attrezzature collettive, la diversificazione tipologica degli alloggi e la scala dell'intero insediamento rappresentano un potenziale non trascurabile nella prospettiva della rigenerazione urbana. Tuttavia, il recupero di questo potenziale è ostacolato da un insieme di criticità accumulate nel tempo che si rafforzano reciprocamente. Sul piano demografico, il progressivo invecchiamento della popolazione residente produce fenomeni di fragilità economica e sociale: nei blocchi lineali di cinque piani privi di ascensore, questo invecchiamento si traduce in condizioni di accessibilità compromessa per gli abitanti dei piani superiori (Cervero Sánchez, 2022; Monclús, Labarta & Díez Medina, 2015). Sul piano del tessuto commerciale e dei servizi, la progressiva rarefazione del commercio di prossimità ha indebolito la vitalità degli spazi pubblici e la qualità della vita quotidiana nel quartiere (Monclús, Labarta & Díez Medina, 2015). Gli *espacios libres* interstiziali, concepiti originariamente come struttura portante del sistema insediativo e dimensionati per ospitare percorsi pedonali, verde e spazi di aggregazione, hanno in molti casi perso la propria funzione, trasformandosi in aree di parcheggio o soggetti a degrado progressivo per mancanza di controllo e manutenzione (Cervero Sánchez, 2022). A queste criticità si aggiunge la problematica della titolarità²⁰ che trasferisce sulle comunità condominiali l'onere di interventi manutentivi spesso insostenibili per famiglie con redditi limitati.

Proprio per questa complessità, il Conjunto Balsas de Ebro Viejo è oggetto da anni di attenzione da parte della Sociedad Municipal Zaragoza Vivienda e dell'Università di Zaragoza, che nel 2015 hanno prodotto una riflessione progettuale organica sull'insediamento nel contesto del Máster Universitario en Arquitectura, assumendo il *conjunto* come caso studio emblematico delle *periferias interiores* saragozzane e come

²⁰ A differenza di gran parte del patrimonio ERP italiano, che è rimasto in larga quota di proprietà di enti pubblici (come le ARCA), in Spagna la politica di accesso alla proprietà avviata negli anni '60 ha trasformato la quasi totalità degli inquilini in proprietari. Questo rende la rigenerazione un processo di negoziazione complessa tra privati (*comunidades de propietarios*), dove il soggetto pubblico (Zaragoza Vivienda) agisce più come facilitatore e co-finanziatore che come decisore unico.

banco di prova per strategie differenziate di rigenerazione (Monclús, Labarta & Díez Medina, 2015). La pubblicazione che ne è scaturita inquadra la rigenerazione urbana come un'opportunità per questo complesso residenziale, sottolineando come i processi di obsolescenza relativa che lo caratterizzano (fisici, funzionali e sociali) siano al tempo stesso una sfida e un terreno fertile per la sperimentazione di approcci innovativi (Monclús, Labarta & Díez Medina, 2015). Questa lettura che rifiuta la riduzione del quartiere a problema irrisolvibile e ne valorizza il potenziale latente, corrisponde alla prospettiva adottata dalla presente ricerca, che non tratta il patrimonio di edilizia residenziale pubblica come una realtà da abbandonare ma come una risorsa da conoscere e gestire.

Il riconoscimento formale del valore patrimoniale dei *conjuntos* saragozzani, sancito nel PGOUZ e confermato dalla letteratura scientifica specializzata, non ha ancora trovato riscontro in una pratica di documentazione e gestione. La dimensione europea della questione risulta ben documentata, evidenziando come i grandi complessi di edilizia pubblica del secondo Novecento pongano in tutto il continente sfide analoghe, riconducibili all'obsolescenza tecnica, al mutamento demografico e all'urgenza di preservare valori spaziali e sociali altrimenti destinati alla dispersione (Monclús, Labarta & Díez Medina, 2015). La distanza tra la qualità progettuale originaria di questi complessi e la loro condizione attuale costituisce una sfida che richiede, prima di qualsiasi intervento fisico, un approfondimento conoscitivo adeguato. Oltre all'obsolescenza tecnica e sociale che accomuna l'esperienza italiana e quella spagnola, emerge con forza una lacuna documentale che ne preclude una gestione realmente consapevole. Questa carenza si manifesta nell'assenza di rilievi aggiornati, modelli dello stato di fatto o rappresentazioni capaci di indagare le componenti fisicamente inaccessibili dell'organismo edilizio. Questo deficit conoscitivo, configurandosi come una lacuna di rappresentazione, definisce l'ambito disciplinare della presente ricerca, orientandola verso la definizione di nuove strategie per la conoscenza e la valorizzazione del patrimonio architettonico contemporaneo.

3. IL PATRIMONIO ARCHITETTONICO CONTEMPORANEO: CONOSCENZA E VALORIZZAZIONE

3.1 Tipologie di edilizia popolare e loro valore architettonico

Il riconoscimento dell'edilizia residenziale pubblica del secondo Novecento come patrimonio architettonico degno di tutela e valorizzazione è un'acquisizione relativamente recente nel dibattito disciplinare. Per lungo tempo questo vasto insieme di manufatti è rimasto ai margini della storia dell'architettura consolidata perché è troppo recente per soddisfare i criteri temporali della tutela giuridica, i quali, nel quadro normativo italiano, subordinano la dichiarazione di interesse culturale al compimento dei settant'anni dalla costruzione e alla scomparsa dell'autore (Vittorini, 2022). Appare inoltre troppo diffuso e standardizzato per essere assimilato ai parametri dell'eccezionalità monumentale, e troppo gravato da associazioni negative (degrado fisico, disagio sociale, qualità abitativa percepita come scadente) per attrarre attenzione critica. La letteratura specializzata ha iniziato a occuparsene in modo organico solo a partire dagli anni Novanta, con un'accelerazione significativa nel primo ventennio del Duemila. Un contributo fondativo è stato offerto dalla ricerca sull'esperienza INA-Casa (Di Biagi, 2001), che ha restituito alle architetture della ricostruzione postbellica il loro spessore storico, culturale e urbano, aprendo un filone di indagine progressivamente esteso all'intera stagione dell'edilizia pubblica europea del dopoguerra. Sul versante della riflessione teorica, è stato messo a fuoco il paradosso costitutivo di quello che viene definito "architettura minore del XX secolo", un'etichetta che non implica inferiorità qualitativa, ma designa una condizione di diffusione e di appartenenza al tessuto connettivo della città moderna, sfuggita per decenni alle analisi critiche e alle politiche di tutela (Albani & Di Biase, 2013). Le condizioni di abbandono e di rischio che

colpiscono le architetture moderne sono state indagate con riferimento al contesto pugliese, insistendo sulla necessità di un riconoscimento che sia ampio, consapevole e condiviso come premessa necessaria per arrestare la deriva verso l'alterazione irreversibile o la demolizione (Pietropaolo, 2022). Parallelamente, la riflessione sulle pratiche di rigenerazione ha mostrato come questo patrimonio di edilizia residenziale pubblica, percepito dall'opinione pubblica come problematico, costituisca in realtà la risorsa urbana più consistente su cui innescare processi di trasformazione economicamente, socialmente e ambientalmente sostenibili (Paris & Bianchi, 2018). Nell'ambito della ricerca italiana più recente l'ERP del secondo dopoguerra è stato inquadrato come "patrimonio grigio", una categoria che rientra nella condizione di sospensione normativa e percettiva in cui si trovano questi manufatti, sospesi tra un valore storico non ancora pienamente riconosciuto e una fragilità materica già avanzata.

Il valore dell'edilizia residenziale pubblica del secondo Novecento non risiede tanto nell'eccezionalità di singoli manufatti, ma in una serie di caratteristiche strutturali che lo distinguono da qualsiasi altra categoria patrimoniale. Sul piano tipologico, i complessi ERP hanno rappresentato, nell'arco dei due decenni cruciali del dopoguerra, il terreno privilegiato di sperimentazione delle tipologie residenziali moderne: dalla palazzina al blocco lineare, dalla torre al complesso a corte aperta, le soluzioni elaborate in questo periodo hanno costruito un repertorio formale che ha strutturato la forma delle città europee contemporanee, spesso a opera di protagonisti di primo piano dell'architettura del Novecento. La ragione di questo investimento progettuale non era puramente tecnica, i programmi di edilizia pubblica, infatti, erano percepiti come un'occasione per dimostrare che l'architettura moderna poteva rispondere ai bisogni collettivi senza rinunciare alla qualità del progetto e alla cura del dettaglio costruttivo, in un momento storico in cui la professione cercava una nuova legittimazione sociale (Albani & Di Biase, 2013). Sul piano costruttivo, il valore di questi edifici risiede in un equilibrio spesso irripetibile tra standardizzazione e reinterpretazione locale delle tecniche e dei materiali, un equilibrio che configura una specificità al tempo stesso moderna e radicata nel territorio, e che costituisce un documento materiale della cultura

costruttiva di una stagione precisa della storia urbana europea. Sul piano urbano, infine, questi complessi sono stati concepiti come episodi relativamente autonomi, dotati di servizi propri e inseriti in una logica insediativa che, sebbene spesso degradata o irriconoscibile per le trasformazioni intervenute, testimonia una precisa volontà di costruire la città come progetto collettivo. Il tono di una città, si osservava già a metà del Novecento, non è dato soltanto dalla "poesia" dei monumenti ma dalla sua "letteratura architettonica"²¹, da quel tessuto diffuso di opere che racconta il modo in cui la società si è data una forma nello spazio (Di Biase, in Albani & Di Biase, 2013). I quartieri di edilizia pubblica sono capitoli fondamentali di questa letteratura, e la loro perdita è la perdita di una narrazione che non appartiene all'eccezionalità del capolavoro ma alla qualità diffusa di un'intera stagione civile.

Un aspetto determinante nella definizione del valore di questo patrimonio è la sua natura seriale. L'edilizia residenziale pubblica del Novecento rappresenta forse l'esempio più compiuto di un sistema di manufatti generato da condizioni storiche, politiche e tecnologiche specifiche e non ripetibili: le politiche di welfare, la disponibilità di finanziamenti pubblici su larga scala, la disponibilità di una classe professionale impegnata sul tema della casa come problema collettivo. Riconoscere il valore seriale di questi edifici significa spostare l'attenzione dall'eccezionalità del singolo al valore del sistema, ogni edificio quindi, anche il più modesto, è un elemento di un discorso più ampio sulla città democratica. Il riconoscimento di un patrimonio seriale implica che la perdita di un elemento non è solo la perdita di un edificio, ma l'interruzione di una sequenza storica che racconta l'evoluzione dell'abitare collettivo nel XX secolo. Questo approccio è fondamentale per le strategie di tutela poichè se si applicano i criteri del restauro monumentale, fondati sull'unicità e sull'irripetibilità dell'opera, a un patrimonio per definizione tendente alla standardizzazione, si rischia di non coglierne il valore; se

²¹ Questa metafora serve a spiegare che la storia di una città non è fatta solo di "capolavori" isolati (la *poesia*, come i grandi monumenti), ma anche dal modo comune di costruire le case per tutti (la *letteratura*). I quartieri popolari non sono "errori" da nascondere o demolire, ma sono capitoli fondamentali che raccontano come l'Italia è cambiata dopo la guerra e studiarli significa dare valore alla vita quotidiana e alla storia reale delle persone, non solo dei grandi architetti.

invece si adottano criteri adeguati alla specificità del patrimonio diffuso, diventa possibile apprezzare la qualità della variazione sul tema, della standardizzazione intelligente e della risposta coerente ai bisogni sociali (Albani & Di Biase, 2013). Il riconoscimento di questo tipo di valore non è automatico e richiede un lavoro di costruzione critica che la ricerca disciplinare ha avviato ma non ha ancora completato.

A differenza dei beni monumentali, l'ERP è un patrimonio vivo, abitato, soggetto alle trasformazioni quotidiane operate dai residenti e alle pressioni normative esterne. Questa condizione complica il riconoscimento formale come bene culturale in senso stretto, ma non ne riduce il valore storico, sociale e architettonico. La vitalità di questi quartieri e la loro funzione residenziale continuata, la presenza di comunità che li abitano, costituiscono al tempo stesso la principale fonte di vulnerabilità e la principale ragione di interesse. È un patrimonio che non può essere musealizzato, ma deve essere trasformato senza essere che si tradisca. La proposta di trattare il patrimonio di edilizia residenziale pubblica come "bene comune" piuttosto che come "bene culturale" in senso vincolistico riconosce questa specificità e ne fa una risorsa concettuale. Il valore del patrimonio grigio non è individuale ma collettivo, questi edifici appartengono alla memoria condivisa delle comunità che li abitano e delle città che li ospitano, e la loro gestione implica responsabilità distribuite tra residenti, enti gestori e istituzioni pubbliche che nessuno strumento puramente vincolistico è in grado di attivare. Attribuire a questi edifici una valenza simbolica analoga a quella del bene culturale serve a riportare il tema della casa pubblica al centro del dibattito sulla pianificazione urbana, e a produrre quella consapevolezza condivisa senza la quale nessuna politica di tutela può avere efficacia (Vittorini, 2022). Il riconoscimento è un atto culturale e politico, che rimette in discussione le gerarchie di valore sedimentate nella percezione comune e nelle pratiche istituzionali. Questa fragilità è oggi esasperata dalla pressione di normative cogenti legate all'efficienza energetica, alla sicurezza strutturale e

all'accessibilità, che impongono trasformazioni drastiche²² e spesso incompatibili con la conservazione dell'identità architettonica originaria (Vittorini, 2022). Il degrado fisico accumulato nei decenni, le trasformazioni operate in assenza di consapevolezza del valore architettonico (sostituzioni di infissi, tamponamenti di logge, modifiche dei rivestimenti di facciata), l'assenza di strumenti di tutela adeguati alle specificità normative e tipologiche dell'ERP, e la pressione dei processi di riqualificazione urbana che tendono alla sostituzione piuttosto che alla conservazione, concorrono a rendere vulnerabile questo patrimonio. Le architetture moderne in condizioni di abbandono, sottoutilizzo o trasformazione incauta sono esposte a profonde alterazioni, spesso con il consenso implicito delle comunità che le abitano, e in assenza di un riconoscimento preventivo non esiste alcuna base istituzionale su cui fondare azioni di conservazione (Pietropaolo, 2022). La potenziale perdita non è solo architettonica, è la perdita di una testimonianza materiale del modo in cui le società europee del dopoguerra hanno immaginato e costruito l'abitare collettivo, una testimonianza che appartiene al patrimonio diffuso della città e non può essere recuperata una volta compromessa.

Il riconoscimento del valore dell'ERP impone quindi un approccio che parte dalla conoscenza scrupolosa e aggiornata di questi manufatti come condizione preliminare di qualsiasi strategia di valorizzazione. Lo studio e l'approfondimento culturale di queste architetture costituiscono il primo atto di un più ampio processo di valorizzazione del patrimonio architettonico contemporaneo (Rossi et al., 2024). Questo principio vale in termini generali, ma assume un peso specifico nel caso dell'ERP, dove la mancanza di documentazione aggiornata, la dispersione delle fonti storiche e archivistiche, l'accessibilità limitata agli edifici occupati dai residenti e la complessità delle strutture proprietarie rendono la conoscenza un problema metodologicamente aperto.

²² Un caso emblematico di questo conflitto è l'inserimento di ascensori esterni in edifici in linea che non li prevedevano in origine. Sebbene necessari per garantire il diritto alla mobilità dei residenti anziani, tali volumi aggiunti spesso alterano irrimediabilmente la modularità delle facciate e il gioco di pieni e vuoti progettato dagli autori originali.

3.2 Casi studio di conoscenza, valorizzazione e conservazione

La premessa che il valore architettonico e sociale dell'ERP richieda conoscenza sistematica come condizione della valorizzazione trova riscontro nell'esame delle esperienze concrete prodotte dal dibattito europeo. I casi più significativi di valorizzazione del patrimonio residenziale moderno condividono la costante della fase analitica sul manufatto esistente quale premessa necessaria per orientare ogni decisione progettuale o conservativa. L'analisi di un insieme selezionato di esperienze, organizzate secondo due assi complementari (la rigenerazione fisica e la valorizzazione tramite strumenti digitali), permette di identificare le condizioni che rendono possibile questo processo e, specularmente, le mancanze che lo ostacolano.

Il primo asse riguarda gli interventi di rigenerazione fisica, dove la conoscenza del manufatto costituisce il presupposto esplicito dell'azione trasformativa. Il paradigma più influente in questo ambito è rappresentato dai progetti di Anne Lacaton, Jean-Philippe Vassal e Frédéric Druot per il patrimonio residenziale moderno francese²³. La trasformazione della Cité du Grand Parc a Bordeaux (Fig. 10), relativa a tre edifici residenziali degli anni Sessanta, si fonda sul principio del rifiuto della demolizione poiché le strutture moderniste possiedono capacità spaziali e costruttive intrinseche che, se opportunamente riconosciute, risultano superiori ai parametri dell'edilizia contemporanea (Paris & Bianchi, 2018). Prima di qualsiasi decisione progettuale, è stata condotta un'analisi approfondita della consistenza strutturale degli edifici, delle caratteristiche tipologiche degli alloggi e delle condizioni d'uso degli spazi, che ha permesso di indirizzare tutte le operazioni successive.

²³ Lo studio Lacaton & Vassal è celebre per il motto "mai demolire". Nel progetto del Grand Parc a Bordeaux, invece di abbattere i palazzi anni '60, hanno aggiunto delle strutture in acciaio esterne con giardini d'inverno. Questo ha permesso di aumentare lo spazio degli alloggi e la luce naturale senza mandare via gli inquilini durante i lavori, dimostrando che l'ERP può diventare "di lusso" con costi contenuti.



Fig. 10 - Il prima e dopo del complesso di Cité du Grand Parc a Bordeaux. (lacatonvassal.com)

Un altro esempio è il recupero del complesso brutalista di Park Hill a Sheffield, che documenta, attraverso le sue due fasi di intervento, un'evoluzione della sensibilità conservativa. La prima fase ha privilegiato l'impatto visivo attraverso sostituzioni materiali estese; la seconda ha adottato soluzioni puntuali di consolidamento e restauro materico, più rispettose dei caratteri costruttivi originali. Oggi è trasformato in un quartiere urbano a uso misto attraverso la rifunzionalizzazione degli alloggi e l'apertura di spazi commerciali e creativi. La qualità degli esiti dipende direttamente dalla profondità della conoscenza del manufatto, quindi, laddove questa è stata più accurata, le scelte progettuali sono risultate più coerenti con i valori dell'edificio; dove è stata semplificata, le soluzioni hanno prodotto alterazioni difficilmente reversibili.

Il secondo asse riguarda esperienze in cui la produzione di conoscenza strutturata si configura già di per sé come atto di valorizzazione, indipendentemente dall'intervento fisico sull'edificio. In questi casi, lo strumento digitale non è il mezzo dell'intervento ma il dispositivo attraverso cui la conoscenza viene organizzata, resa interrogabile e trasmessa nel tempo. Il caso della Cartiera Mecenat a Tivoli illustra le potenzialità di un approccio che combina rilievo digitale e ricostruzione da fonti d'archivio per la valorizzazione del patrimonio industriale (Russo et al., 2024). Il complesso presentava due problemi specifici: la perdita dei macchinari originali necessari alla comprensione del processo produttivo, e la demolizione della copertura metallica progettata nel 1938 dall'ingegnere Gino Covre. Il workflow elaborato ha integrato il rilievo fotogrammetrico

e laser scanner delle parti esistenti con una modellazione parametrica delle parti perdute, ricostruita a partire da documenti storici e fondi tecnici d'archivio; il modello così ottenuto ha costituito la base per un ambiente di realtà virtuale capace di rendere fruibile una realtà oggi parzialmente scomparsa. La qualità documentale della ricostruzione, più che la sofisticazione geometrica del modello, ne determina l'affidabilità ai fini della valorizzazione: elemento rilevante per i fini della presente ricerca, in quanto coinvolge la modellazione di parti fisicamente inaccessibili o non più esistenti. Un'analoga impostazione metodologica caratterizza la ricerca sulla Scuola di Matematica di Gio Ponti alla Sapienza di Roma (Fig. 11). Tra il 2019 e il 2021 è stato condotto uno studio approfondito dell'edificio nell'ambito del progetto "Keeping it Modern" della Getty Foundation, con l'obiettivo di elaborare un Conservation Management Plan (Cortesi, 2024).

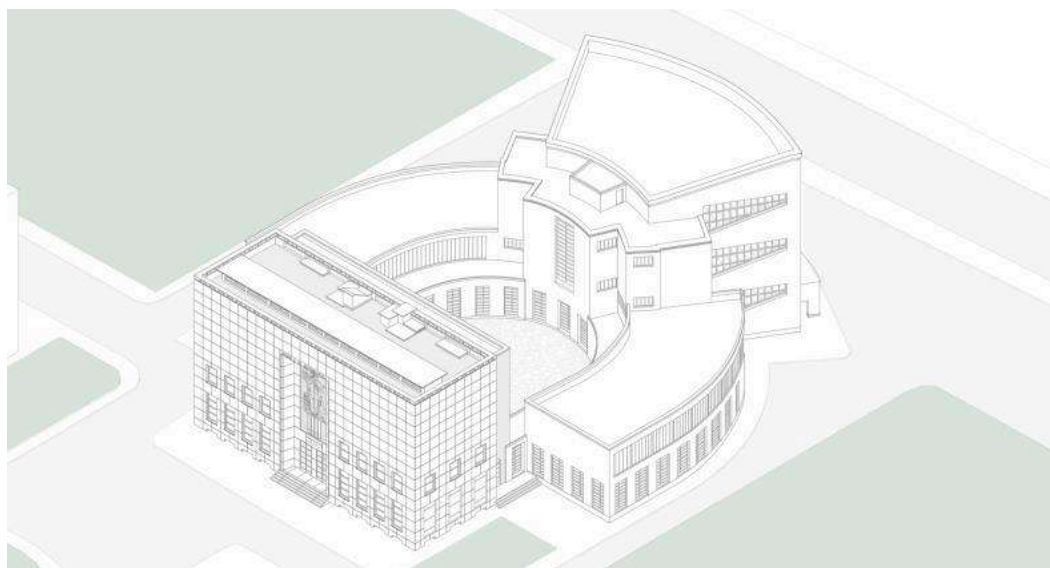


Fig. 11 - Visualizzazione del modello BIM della Scuola di Matematica a Roma. (Cortesi, 2024)

Al termine di questa fase, è stato sviluppato un modello HBIM in grado di raccogliere e rendere interrogabile l'eterogeneità dei dati prodotti dalla ricerca: catalogazione archivistica, indagini strutturali, analisi chimiche dei materiali, documentazione

fotografica e storica. Il modello ha organizzato le prescrizioni del piano per categorie d'urgenza, consentendo la visualizzazione e l'aggiornamento progressivo dello stato di conservazione di ciascun elemento costruttivo. La costruzione del modello ex-post rispetto alla ricerca ha generato incongruenze nel livello di dettaglio e la necessità di semplificazioni, confermando che l'integrazione tra indagine archivistica e modellazione digitale produce risultati affidabili solo se progettata come processo unitario fin dall'avvio.

Un terzo riferimento è offerto dalla ricerca sul patrimonio Olivetti a Ivrea²⁴, iscritto nella Lista del Patrimonio Mondiale UNESCO nel 2018 come città industriale ideale del XX secolo (Fig. 12). La complessità di questo insieme (architetture industriali, residenziali e sociali costruite tra gli anni Trenta e Sessanta) rendeva necessaria una strategia di valorizzazione capace di governare il sistema nel suo insieme, e non il singolo edificio come entità isolata (Conte, 2020). La ricerca ha sperimentato l'uso di modelli parametrici come sistemi di archiviazione documentale, a partire dal caso del Centro Studi ed Esperienze di Eduardo Vittoria: il modello ha operato come database tridimensionale capace di riunificare virtualmente documentazione dispersa in archivi diversi, consentendo una lettura integrata del processo progettuale e della sua realizzazione. Il patrimonio rimane in uso nel contesto urbano, mentre la produzione di conoscenza strutturata costituisce il principale dispositivo di tutela e trasmissione del valore: la valorizzazione, in questo caso, non coincide con la musealizzazione (Conte, 2020).

²⁴ Il caso di Ivrea è unico perché l'UNESCO non ha premiato un singolo monumento, ma l'idea di "città industriale sociale" di Adriano Olivetti. Qui le case popolari per i dipendenti hanno lo stesso valore delle fabbriche, confermando la tesi dell'autore secondo cui l'edilizia residenziale pubblica è un pezzo fondamentale della nostra storia civile.



Fig. 12 - Vista dall'alto del complesso industriale della città di Ivrea. (unesco.cultura.gov.it)

L'analisi di queste esperienze permette di individuare un principio metodologico comune, secondo il quale ogni processo di valorizzazione efficace deve essere necessariamente anticipato da una fase di approfondita conoscenza strutturata del manufatto. Le forme che questa conoscenza assume variano (studio storico e archivistico, analisi materica, rilievo digitale, modellazione informativa), ma condividono una caratteristica essenziale: sono organizzate, interrogabili, trasmissibili nel tempo e accessibili ad altri operatori.

La questione che emerge dalla lettura critica di questi casi non riguarda la validità delle metodologie adottate, ormai consolidata, ma le condizioni della loro applicabilità. I casi esaminati hanno potuto produrre conoscenza strutturata del manufatto perché il manufatto era accessibile, o perché le parti non più fisicamente esistenti potevano essere ricostruite a partire da fonti d'archivio disponibili e consultabili. L'accessibilità è

trattata, in questi contesti, come una variabile tecnica risolvibile con strumenti adeguati (il rilievo da drone per le parti in quota, la modellazione document-based per le parti perdute). Questa assunzione non è valida nell'edilizia residenziale pubblica occupata. Nell'ERP in uso, il problema dell'accessibilità limitata ha natura strutturale: riguarda il diritto alla riservatezza degli inquilini, la condizione giuridica degli immobili, la difficoltà organizzativa di coordinare l'accesso a unità abitative private. Nessuna delle esperienze esaminate ha affrontato tale vincolo, in quanto la rigenerazione fisica ha interessato quartieri parzialmente svuotati o interventi limitati alle sole parti comuni; i patrimoni documentati digitalmente erano edifici non residenziali o strutture dismesse. Nell'ERP occupata, le porzioni degli edifici non accessibili al rilevamento diretto non sono eccezioni da gestire caso per caso, ma la condizione strutturale di qualsiasi processo di conoscenza. Il deficit che interessa tale patrimonio assume un'ulteriore dimensione legata all'accessibilità rappresentativa, configurandosi come una criticità che gli approcci esaminati non risultano strutturati per risolvere.

3.3. Il censimento delle architetture contemporanee e il loro stato attuale

Se i casi di valorizzazione esaminati nel paragrafo precedente hanno mostrato che il successo degli interventi dipende in misura determinante dall'investimento preliminare in conoscenza strutturata del singolo manufatto, il problema si ripropone in termini ancora più urgenti alla scala del patrimonio complessivo: quante architetture contemporanee esistono sul territorio nazionale, in quale stato versano, quante rischiano di essere alterate o demolite senza che ne resti traccia documentale adeguata? La risposta a questa domanda è il censimento non come semplice elencazione amministrativa, ma come atto critico di riconoscimento culturale che precede e rende possibile qualunque politica di conservazione consapevole.

Il patrimonio architettonico del secondo Novecento si trova, in questo senso, in una posizione particolarmente esposta. Le architetture di quel periodo si trovano in una

condizione di fragilità peculiare dal momento che la prossimità temporale della loro realizzazione, la continuità d'uso ininterrotto e la larga diffusione di materiali poveri o facilmente deperibili, le rendono percepite come ordinarie e prive di interesse, sottovalutate tanto da chi le abita quanto da chi è chiamato a gestirle, in un processo di progressivo misconoscimento che tende a occultarne il valore e la singolarità (Vittorini, 2022). A tale vulnerabilità intrinseca si aggiunge un limite normativo legato al Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, il quale subordina la dichiarazione di interesse culturale al decorso di settant'anni dalla realizzazione e alla morte dell'autore, escludendo di fatto dalla tutela vincolistica l'intera produzione architettonica degli ultimi decenni del Novecento. A questo riguardo, il censimento assume un valore strategico e quindi non sostituisce il vincolo, ma costruisce le condizioni di consapevolezza condivisa che ne costituiscono il presupposto culturale e politico, trasformando la conoscenza in premessa per l'azione.

In Italia, la risposta istituzionale più organica a questa esigenza è rappresentata dal "Censimento delle architetture italiane dal 1945 ad oggi", progetto promosso dalla Direzione Generale Creatività Contemporanea (DGCC) del Ministero della Cultura (Fig. 13), avviato nel 2002 e progressivamente esteso fino a contare oggi circa cinquemila record consultabili attraverso una piattaforma web dedicata²⁵.

²⁵ Il Censimento delle Architetture italiane dal 1945 ad oggi è una mappatura dell'architettura contemporanea promossa dalla Direzione Generale Creatività Contemporanea (DGCC) del Ministero della Cultura. Avviato nel 2002 dall'allora DARC, il progetto seleziona e scheda edifici e aree urbane sulla base di criteri bibliografici e storico-critici, rendendo i risultati consultabili su una piattaforma web dedicata (censimentoarchitetturecontemporanee.cultura.gov.it). Al 2023 la piattaforma conta 4.948 schede su tutto il territorio nazionale, di cui 292 per la Puglia. La campagna di ricognizione pugliese è stata condotta dal Politecnico di Bari (Dipartimento ArCoD) in collaborazione con il CSSAr e il Segretariato regionale del MiC per la Puglia.



Il Progetto

Il Censimento delle architetture italiane dal 1945 ad oggi, promosso dalla Direzione Generale Creatività Contemporanea del Ministero della Cultura, è una mappatura dell'architettura contemporanea realizzata mediante attività di selezione e schedatura di edifici e di aree urbane significativi e di diffusione e valorizzazione dei risultati attraverso una piattaforma web dedicata.

Fig. 13 - Interfaccia web del DiARC - Censimento delle architetture italiane dal 1945 ad oggi. (censimentoarchitetturecontemporanee.cultura.gov.it)

I criteri di selezione adottati valutano il grado di riconoscimento critico già consolidato attorno all'opera, la sua presenza nelle principali riviste di architettura, la citazione in storie e guide del settore, i riconoscimenti ricevuti, affiancati da considerazioni relative al profilo dell'autore, alle innovazioni tipologiche e morfologiche introdotte e al rapporto dell'opera con il contesto urbano di riferimento (DGCC, 2024). La scheda tipo del Censimento restituisce per ciascuna opera una descrizione storico-critica, una valutazione del grado di conservazione basata prevalentemente su ricognizioni esterne e un apparato iconografico che confronta documentazione storica e stato attuale (Fig. 14).

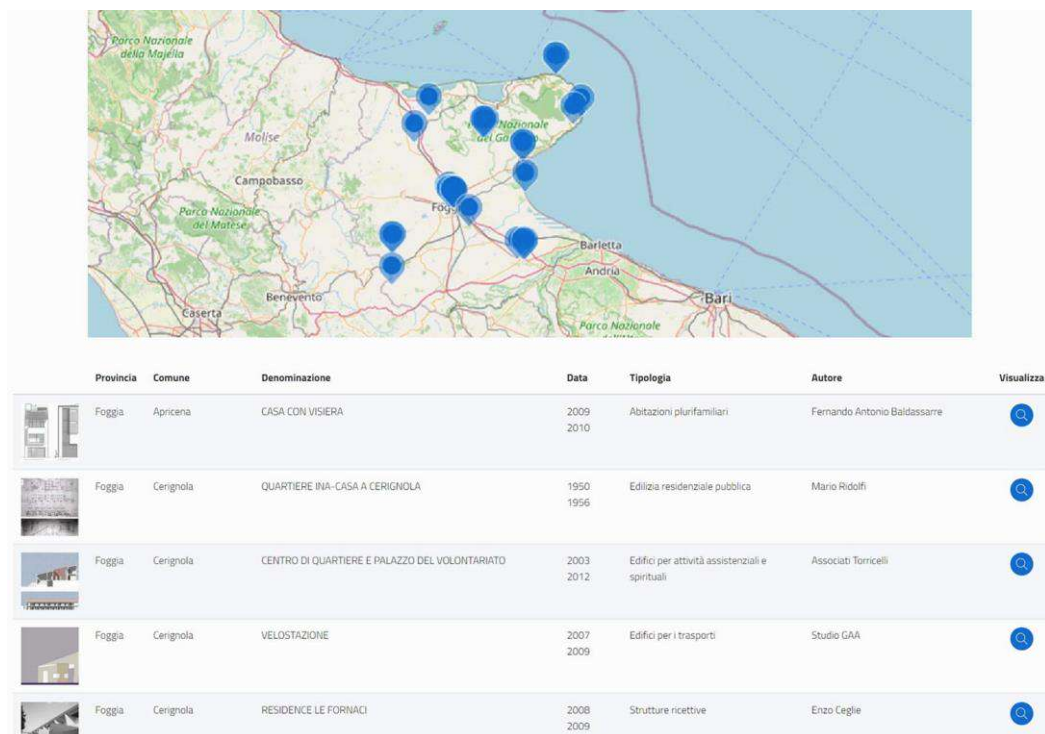


Fig. 14 - Ricerca delle architetture censite afferenti alla provincia di Foggia. (*censimentoarchitetture contemporanee.cultura.gov.it*)

L'Atlante Architettura Contemporanea²⁶, sviluppato nell'ambito della medesima iniziativa, ha ampliato ulteriormente la portata comunicativa del progetto, costruendo percorsi tematici e narrazioni visive capaci di avvicinare un pubblico non specialistico alla comprensione del patrimonio moderno. Nel contesto specifico dell'ERP, il Censimento ha svolto un ruolo significativo nell'attribuire legittimità disciplinare a un patrimonio spesso percepito come marginale, restituendo a quartieri INA-Casa,

²⁶ Se il Censimento risponde a un'esigenza di catalogazione tecnico-scientifica, l'Atlante Architettura Contemporanea (avviato nel 2018 dalla stessa DGCC) ne costituisce l'evoluzione narrativa e visiva. Attraverso campagne fotografiche d'autore e itinerari tematici, l'Atlante traduce il dato d'archivio in uno strumento di mediazione culturale, confermando come la rappresentazione (fotografica o, in prospettiva, digitale e tridimensionale) sia il presupposto ineludibile per il riscatto critico del patrimonio architettonico del secondo dopoguerra.

complessi ISES e sistemi insediativi del secondo dopoguerra la dignità di manufatti dotati di qualità e singolarità proprie, degni di essere studiati e conservati.

Su un piano parallelo e complementare opera DOCOMOMO Italia²⁷ (Fig. 15), sezione nazionale dell'organizzazione internazionale per la documentazione e conservazione degli edifici, dei siti e dei quartieri del Movimento Moderno, che mantiene un registro delle opere significative e collabora con le principali istituzioni culturali nazionali, tra cui il MAXXI, per definire strategie conservative, criteri di schedatura e percorsi di sensibilizzazione rivolti sia alla comunità scientifica che al pubblico generale (DOCOMOMO Italia, 2024). L'attività congiunta di questi soggetti ha contribuito a costruire nel tempo un quadro conoscitivo di riferimento per il patrimonio moderno italiano, definendo le basi culturali su cui qualunque politica di tutela deve necessariamente fondarsi.



²⁷ DOcumentation and COnservation of buildings, sites and neighborhoods of the MOdern MOvement) Italia, fondata nel 1993, agisce come articolazione nazionale della rete internazionale dedicata alla salvaguardia del patrimonio architettonico moderno. L'associazione gestisce un registro delle opere di eccellenza (consultabile su <https://www.docomomoitalia.it>) e opera in stretta sinergia con il Ministero della Cultura e il MAXXI Architettura per definire standard metodologici di schedatura e conservazione, promuovendo il riconoscimento del valore culturale dell'architettura del Novecento oltre i limiti cronologici della tutela ordinaria.

Fig. 15 - Interfaccia web del sito dell'associazione DoCoMoMo Italia. (docomomoitalia.it)

Accanto a queste iniziative di riconoscimento storico-critico, si collocano però le indagini conoscitive condotte dagli enti proprietari del patrimonio ERP (Regioni, IACP e le loro successive denominazioni come A.R.C.A.) che non mirano solo al riconoscimento del valore culturale dell'edificio ma alla costruzione di una base informativa sufficiente a supportarne la gestione ordinaria. È qui che le difficoltà si rendono visibili in tutta la loro concretezza. Le pubbliche amministrazioni che gestiscono patrimonio immobiliare pubblico si trovano spesso in una condizione di conoscenza parziale e frammentata nella quale i dati relativi ai singoli edifici sono distribuiti tra uffici diversi, le informazioni risultano ridondanti e non allineate, la documentazione non è aggiornata e gli strumenti di supporto sono spesso obsoleti. Le indagini censuarie condotte a livello nazionale dalla Commissione di Indagine sul Patrimonio Immobiliare Pubblico istituita nel 1985 al censimento dell'Agenzia del Demanio concluso nel 2007²⁸ hanno prodotto liste quantitative e valutazioni di valore economico, strumenti utili ai fini del risanamento delle finanze pubbliche ma strutturalmente inadeguati alla gestione tecnica del patrimonio costruito. La distanza tra i risultati di questi censimenti e le necessità di una gestione efficace del patrimonio scaturisce da un'impostazione di fondo che esclude le finalità legate alla valorizzazione tecnica del manufatto.

Le conseguenze concrete di questa distanza sono riscontrabili con particolare chiarezza nei contesti di maggiore fragilità. A Foggia, il patrimonio ERP gestito da A.R.C.A. Capitanata è concentrato nelle periferie nord-occidentali (quartieri Candelaro, Biccari, Borgo Croci) e sud-orientali (quartiere CEP), aree caratterizzate da sovraffollamento, costruzioni abusive, edifici a rischio di crollo e occupazioni illegali. Nonostante

²⁸ Questi strumenti, pur garantendo una mappatura quantitativa del patrimonio, sono stati orientati da logiche di tipo contabile e patrimoniale finalizzate alla stima del valore e alle procedure di alienazione (D.L. 351/2001). Tale approccio, prettamente amministrativo e alfanumerico, ha generato una conoscenza burocratica del bene priva dei dati geometrici, materici e prestazionali indispensabili per la gestione tecnica, il rilievo e la conservazione.

l'attivazione negli ultimi vent'anni di numerosi programmi di rigenerazione urbana finanziati da fondi regionali ed europei (PIRP, PIRU, SISUS, PINQuA) la maggior parte di questi interventi non è mai giunta a completamento, replicando ciclicamente le stesse proposte per gli stessi quartieri senza produrre trasformazioni stabili (**Annese et al., 2024**). Un profilo analogo di lacuna conoscitiva caratterizza il contesto spagnolo in quanto il patrimonio residenziale pubblico del secondo Novecento a Saragozza presenta criticità documentali che rendono difficile la valutazione analitica della consistenza tecnica e dello stato di trasformazione attuale.

Il limite strutturale del censimento convenzionale si accentua ulteriormente nel caso specifico dell'ERP, che per sua natura è occupata. L'azione degli strumenti finalizzati al riconoscimento del valore culturale e alla ricognizione patrimoniale è vincolata a un'osservazione esterna, in quanto la loro logica metodologica si limita al sopralluogo controllato, all'accesso alle sole parti comuni e all'analisi della documentazione archivistica indiretta. Producono schede accurate riguardo all'involucro edilizio, all'immagine urbana dell'edificio, alla sua attribuzione e alla sua storia, ma non possono penetrare negli interni degli alloggi occupati, dove risiede una parte determinante della conoscenza tecnica del manufatto. I censimenti convenzionali omettono spesso la mappatura della distribuzione planimetrica reale degli appartamenti, la registrazione delle alterazioni apportate dagli inquilini nel tempo, come la chiusura di logge, la sostituzione degli infissi, la modifica degli impianti o della suddivisione interna, e l'analisi dello stato di conservazione effettivo dei sistemi costruttivi.

Il quadro che emerge non è quello di strumenti fallimentari, ma di strumenti adeguati agli scopi per cui sono stati concepiti e inadeguati agli scopi per cui non lo sono stati. Il Censimento MiC compie bene ciò che si propone e identifica, attribuisce, descrive criticamente, costruisce consapevolezza condivisa sul valore del patrimonio moderno. I censimenti patrimoniali degli enti gestori assolvono altrettanto bene al loro compito originario, quello di stimare il valore economico del patrimonio, costruire elenchi catastali, identificare i beni alienabili. Il problema risiede nel fatto che nessuno di tali strumenti risulta concepito per affrontare la questione centrale posta dalla

valorizzazione tecnica dell'ERP occupata. Come si approfondisce la conoscenza di un manufatto caratterizzato da un'accessibilità interna limitata, da un apparato archivistico frammentario o incompleto e da decenni di alterazioni mai documentate che hanno allontanato la configurazione attuale da quella progettuale originaria? Questa esigenza supera i limiti della schedatura tradizionale, per quanto avanzata, e richiede un passaggio metodologico finalizzato allo sviluppo di sistemi informativi in grado di generare conoscenza strutturata, interrogabile e costantemente aggiornabile.

3.4 Digitalizzazione e strumenti innovativi per la gestione edilizia

La natura prevalentemente descrittiva e statica degli strumenti di censimento tradizionali non risulta sufficiente per una gestione tecnica efficace del patrimonio costruito. La scheda censuaria, pur nella sua forma più avanzata, restituisce una fotografia cristallizzata del manufatto in un determinato istante, senza tuttavia generare una base di conoscenza interrogabile o costantemente aggiornabile e senza stabilire connessioni semantiche tra i singoli elementi costruttivi e i dati ad essi associati. Il passaggio che la gestione del patrimonio edilizio pubblico richiede è di natura diversa. Non si tratta di raccogliere più dati, ma di organizzarli in forme che consentano di rispondere a domande operative concrete sulla geometria degli elementi, sui materiali impiegati, sullo stato di conservazione, sulle trasformazioni intercorse e sulle priorità di intervento. È il passaggio da una conoscenza elencativa a una conoscenza strutturata e relazionale, in cui l'informazione non è semplicemente archiviata ma connessa, gerarchizzata e resa disponibile per analisi successive. Una famiglia di strumenti digitali come il Building Information Modeling (BIM), i sistemi informativi geografici (GIS), le tecniche di intelligenza artificiale applicate al trattamento dei dati di rilievo, offrono oggi le condizioni per compiere questo passaggio. Il presente paragrafo ne introduce le potenzialità specifiche rispetto al problema della conoscenza del patrimonio di edilizia

residenziale pubblica, senza entrare nel dettaglio tecnico delle singole tecnologie, che sarà oggetto dei capitoli successivi.

Il Building Information Modeling è stato concepito come strumento di progettazione per le nuove costruzioni; un ambiente digitale in cui il modello tridimensionale dell'edificio funziona come database relazionale²⁹, dove ogni elemento costruttivo è portatore non solo di proprietà geometriche ma anche di dati materici, prestazionali, temporali e gestionali, tutti parametrici e interconnessi attraverso vincoli che ne garantiscono la coerenza formale e relazionale (Lo Turco, 2015). L'interesse per il patrimonio esistente emerge quando si riconosce che la fase gestionale e manutentiva di un edificio occupa la porzione più estesa del suo ciclo di vita, e che i costi associati a questa fase superano ampiamente quelli delle fasi di progettazione e costruzione. La gestione tradizionale dei patrimoni immobiliari pubblici ha storicamente sofferto di una diffusa frammentazione informativa, basata su documentazione cartacea o su elaborati CAD bidimensionali non strutturati, spesso disallineati rispetto allo stato di fatto e difficilmente accessibili agli operatori sul campo. Il modello BIM applicato al patrimonio esistente ribalta tale condizione, configurandosi non più come la prefigurazione di un'opera da costruire, bensì come una rappresentazione a posteriori che sintetizza la complessità della realtà materiale con l'astrazione necessaria alla gestione dei dati. La componente informativa, prevalentemente grafica in fase di progetto, si integra e si rinnova in formato prevalentemente alfanumerico, divenendo parte integrante dell'apparato gestionale e manutentivo del manufatto (Lo Turco, 2015).

Le esperienze di digitalizzazione dei patrimoni immobiliari pubblici condotte in ambito accademico e istituzionale confermano la percorribilità di questo approccio. Il progetto di gestione del patrimonio edilizio del Politecnico di Torino, documentato dallo stesso Lo Turco (Fig. 16), ha dimostrato la possibilità di costruire un modello di ateneo progressivamente implementabile, in cui ogni volume edilizio è associato a metadati

²⁹ Il database relazionale organizza informazioni eterogenee attraverso parametri univoci definiti "chiavi". Nel sistema BIM questa struttura garantisce l'interdipendenza tra componente grafica e alfanumerica, permettendo a ogni variazione geometrica di aggiornare automaticamente i dati prestazionali e quantitativi associati per assicurarne la coerenza costante.

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico:
un approccio Archive+Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata (Italia) e Aragna (Spagna)

alfanumerici e in cui i locali possono essere interrogati per superfici, funzioni e stato manutentivo attraverso tavole tematiche estratte dal database.

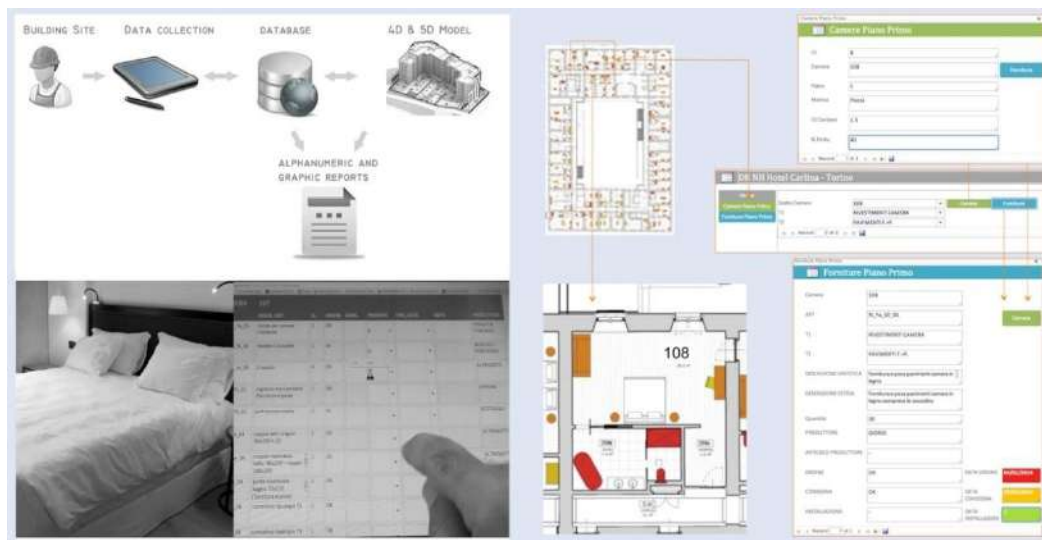


Fig. 16 - Visualizzazione del workflow operativo gestionale attraverso modelli informativi BIM. (Lo Turco, 2015)

In modo analogo, il protocollo sviluppato presso Sapienza Università di Roma ha affrontato il problema della gestione del patrimonio immobiliare universitario attraverso un approccio HBIM orientato non solo alla documentazione geometrica, ma alla costruzione di un sistema di conoscenza del manufatto nella sua dimensione storica, costruttiva e trasformativa (Attenni & Rossi, 2022). Esperienze recenti nel campo del Property Management hanno inoltre proposto la strutturazione del sistema informativo secondo una gerarchia che procede dal complesso edilizio all'unità ambientale fino al singolo elemento tecnico, dove ogni oggetto nel modello possiede un codice identificativo che funziona come chiave primaria per il collegamento con database esterni, schede tecniche e storico degli interventi. Il tratto comune di queste esperienze risiede nel superamento della separazione tra componente grafica e componente descrittiva dell'informazione, rendendo il modello BIM l'ambiente in cui dati geometrici, prestazionali e gestionali coesistono e si alimentano reciprocamente.

Se il BIM gestionale risponde al problema della dispersione informativa, l'applicazione al patrimonio di interesse culturale (comunemente indicata come Heritage Building Information Modeling - HBIM) pone questioni ulteriori che riguardano la natura stessa della conoscenza che il modello è chiamato a rappresentare. La modellazione parametrica, nata per gestire oggetti standardizzati e ripetibili, si confronta con l'irregolarità, le deformazioni e l'unicità del costruito storico e contemporaneo. Il nodo critico non è soltanto tecnico ma concettuale, e risiede nella necessità di definire la tipologia di modello più adatta per un oggetto che non è un progetto da realizzare, bensì un manufatto esistente da comprendere. La riflessione condotta in ambito HBIM ha evidenziato come un approccio puramente mimetico, finalizzato a riprodurre ogni singola deformazione rilevata, rischi di appesantire il modello senza incrementarne l'intelligenza dal punto di vista semantico. La strada alternativa è quella del riconoscimento del tipo architettonico, non la ricalcatura della geometria, ma la ricostruzione dell'intenzione progettuale e delle regole costruttive che sottendono il manufatto, su cui poi mappare le specificità e le deviazioni dello stato di fatto (Attenni & Rossi, 2022). Questo approccio risulta particolarmente pertinente per l'edilizia residenziale pubblica del secondo Novecento, dove la serialità del tipo edilizio, la modularità compositiva e la ripetizione degli elementi costruttivi rendono possibile la definizione di modelli-tipo adattabili alle specifiche condizioni rilevate.

Un aspetto determinante è la gestione dell'incertezza. A differenza della nuova costruzione, dove ogni materiale è noto da capitolato e ogni dimensione è definita da progetto, nel patrimonio esistente molte informazioni sono ipotetiche o comunque dedotte da fonti d'archivio, da analisi comparative con edifici della stessa tipologia, da indagini non distruttive che restituiscono dati parziali. Il modello deve essere quindi in grado di gestire questa eterogeneità, distinguendo ciò che è rilevato direttamente da ciò che è ricostruito su base documentale o analogica (Attenni & Rossi, 2022). Questa condizione è la norma nel patrimonio esistente, e diventa ancora più marcata nel caso dell'edilizia residenziale pubblica occupata, dove l'inaccessibilità fisica di gran parte degli alloggi impedisce un rilievo completo e impone il ricorso a fonti indirette. Anche

nell'ambito delle infrastrutture civili di interesse patrimoniale, la centralizzazione del dato in un modello BIM consente di strutturare il processo conoscitivo in fasi sequenziali: dalla raccolta documentale alla diagnosi dello stato di conservazione, dall'identificazione e mappatura tridimensionale dei danni alla definizione delle priorità di intervento, favorendo il passaggio da una conservazione curativa a una conservazione preventiva, con riduzioni significative dei costi di manutenzione nel ciclo di vita dell'opera (Moreno Bazán et al., 2021).

La gestione di un patrimonio immobiliare pubblico non riguarda tuttavia un singolo edificio ma un insieme di manufatti distribuiti sul territorio. Un ente gestore come A.R.C.A. Capitanata amministra centinaia di unità immobiliari sparse su scala provinciale, rendendo la capacità di interrogare contemporaneamente la scala dell'alloggio, del quartiere e della città una vera e propria esigenza operativa concreta. L'integrazione tra modelli BIM e sistemi informativi geografici³⁰ (Fig. 17) rende possibile questa continuità scalare, inserendo i modelli informativi dei singoli edifici come nodi ad alta densità informativa all'interno di un contenitore territoriale che consente analisi spaziali complesse dall'incrocio dei dati tecnici con le informazioni sul rischio sismico e idrogeologico alla pianificazione degli interventi su scala vasta (Vacca et al., 2018; Matrone et al., 2019). Il passaggio dalla scala del manufatto a quella del territorio è condizione necessaria per una gestione sistemica del patrimonio pubblico, ma richiede

³⁰ L'integrazione tra BIM e GIS permette la continuità informativa tra la scala del singolo manufatto e quella del sistema territoriale. Mentre il modello informativo gestisce la complessità del dettaglio costruttivo interno, il sistema geografico inquadra l'edificio all'interno di un contesto spaziale e normativo stratificato consentendo l'interrogazione simultanea dei dati locali e delle variabili ambientali o infrastrutturali su vasta scala.

protocolli operativi specifici per il trasferimento dei dati tra i due domini senza perdita informativa.

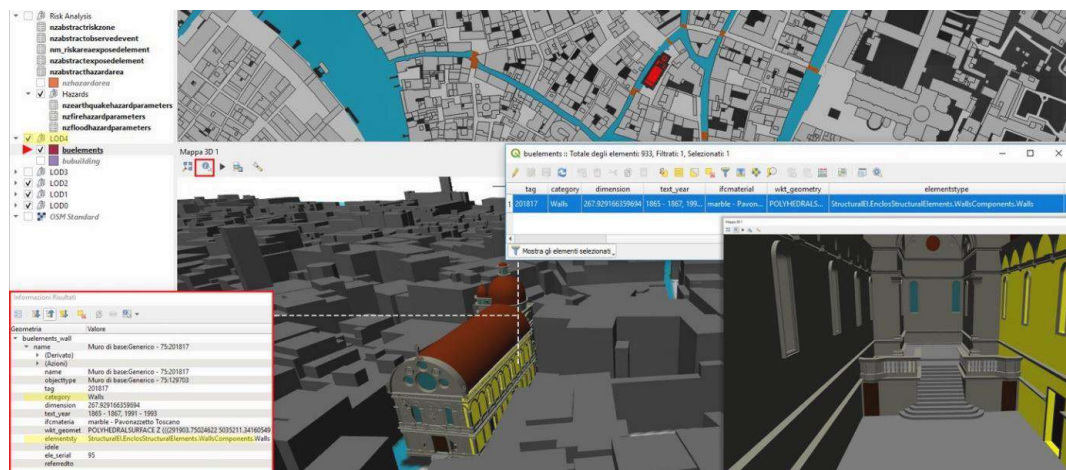


Fig. 17 - Visualizzazione dell'integrazione tra modelli bim e sistemi informativi geografici. (Matrone, 2019)

La digitalizzazione del patrimonio produce infine una mole di dati che pone il problema dell'automazione di alcune fasi del processo. L'intelligenza artificiale, nelle sue declinazioni di apprendimento automatico supervisionato e non supervisionato, offre strumenti per accelerare la segmentazione semantica (Fig. 18) delle nuvole di punti (il riconoscimento automatico degli elementi architettonici all'interno del dato grezzo di rilievi) riducendo i tempi della modellazione manuale e contenendo il margine di soggettività delle scelte dell'operatore (Croce et al., 2023).

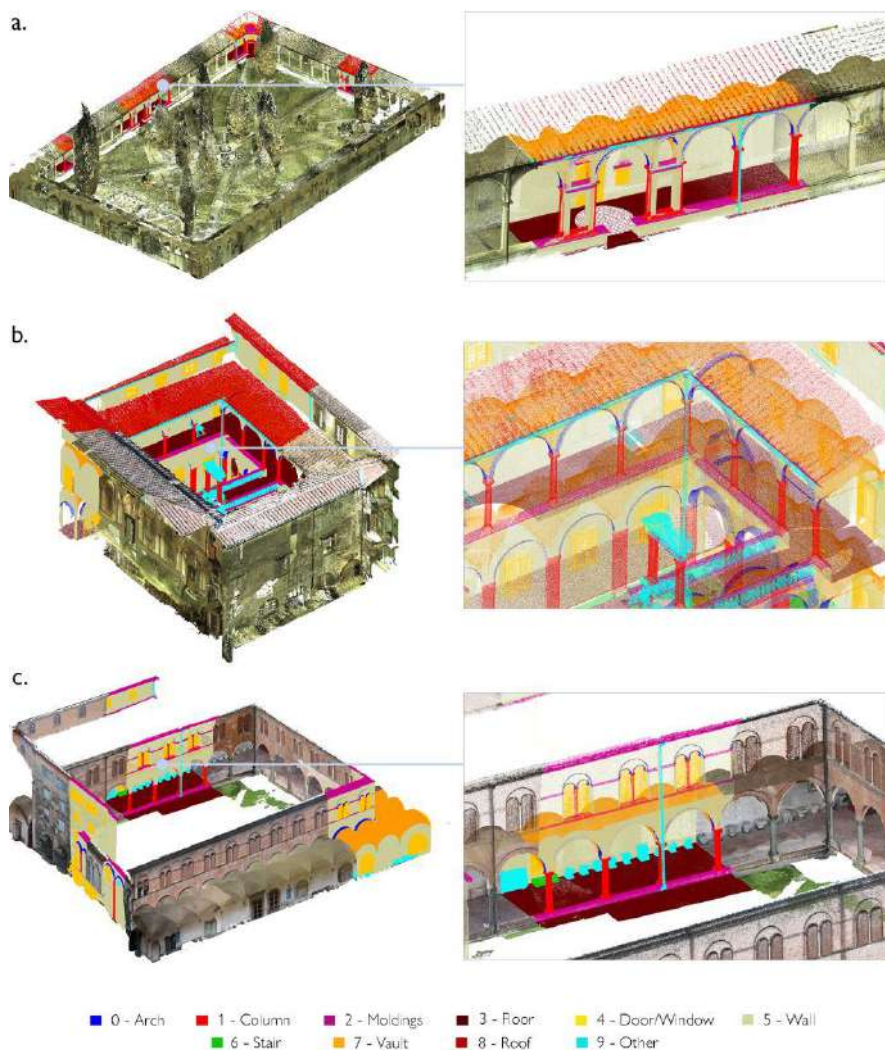


Fig. 18 - Visualizzazione del processo di segmentazione semantica applicato ad una nuvola di punti. (Croce, 2023)

In modo complementare, tecniche di clustering non supervisionato sono state impiegate per l'estrazione automatica di planimetrie e sezioni da nuvole di punti complesse, con risultati particolarmente promettenti nella gestione di geometrie irregolari e non standardizzabili tipiche del patrimonio storico (Escudero et al., 2024). Questi strumenti non sostituiscono il giudizio disciplinare dell'operatore, la scelta delle

classi, la validazione dei risultati, l'interpretazione critica del dato restano operazioni irriducibilmente umane, però ne accelerano significativamente la fase preparatoria, rendendo economicamente sostenibile la digitalizzazione su scala più ampia.

Gli strumenti brevemente analizzati (BIM, HBIM, GIS, AI) delineano un ecosistema digitale in grado di superare le rigidità e i limiti dei censimenti tradizionali. L'inadeguatezza degli approcci puramente descrittivi di fronte alla complessità gestionale del patrimonio residenziale pubblico rende infatti essenziale un radicale cambio di prospettiva. È quindi fondamentale approfondire queste tematiche metodologiche e tecnologiche per comprendere come governare l'incertezza dei dati e trasformare tali innovazioni in prassi operative efficaci per la documentazione e la valorizzazione del costruito esistente.

4. BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) E HBIM

4.1 Stato dell'arte sul BIM e HBIM

Il Building Information Modeling rappresenta una delle trasformazioni più profonde che abbiano investito il settore delle costruzioni negli ultimi decenni, spostando il centro di gravità della produzione edilizia da una logica puramente grafica e bidimensionale verso un paradigma integrato nel quale la geometria tridimensionale costituisce soltanto il livello più superficiale di un sistema informativo molto più articolato. Il BIM non è semplicemente un software più avanzato del CAD, bensì un metodo di lavoro, un protocollo condiviso e, in senso lato, una filosofia gestionale che ridefinisce le relazioni tra tutti gli attori coinvolti nel ciclo di vita di un edificio. Nella sua accezione più consolidata, il Building Information Modeling viene descritto come un processo per la creazione e la gestione di dati relativi a un edificio durante l'intero arco della sua vita utile, nel quale un modello tridimensionale intelligente e parametrico costituisce il contenitore primario delle informazioni (Eastman et al., 2011). Il carattere parametrico degli oggetti che lo compongono implica che ogni elemento architettonico, come una parete, una finestra o un solaio, esista come oggetto dotato di specifici attributi fisici e logici, intrattenendo relazioni strutturate con le altre parti del sistema e rispondendo a comportamenti predefiniti. Modificando un singolo parametro si ottiene l'aggiornamento automatico e coerente del modello in tutte le sue viste e rappresentazioni derivate. Questa automazione elimina di fatto le incongruenze che tipicamente si accumulano tra piante, prospetti, sezioni e computi metrici nei processi di progettazione tradizionali.

L'evoluzione che ha condotto alla diffusione del Building Information Modeling rappresenta l'esito di un processo graduale caratterizzato da profonde trasformazioni negli strumenti digitali per la progettazione (Fig. 19).

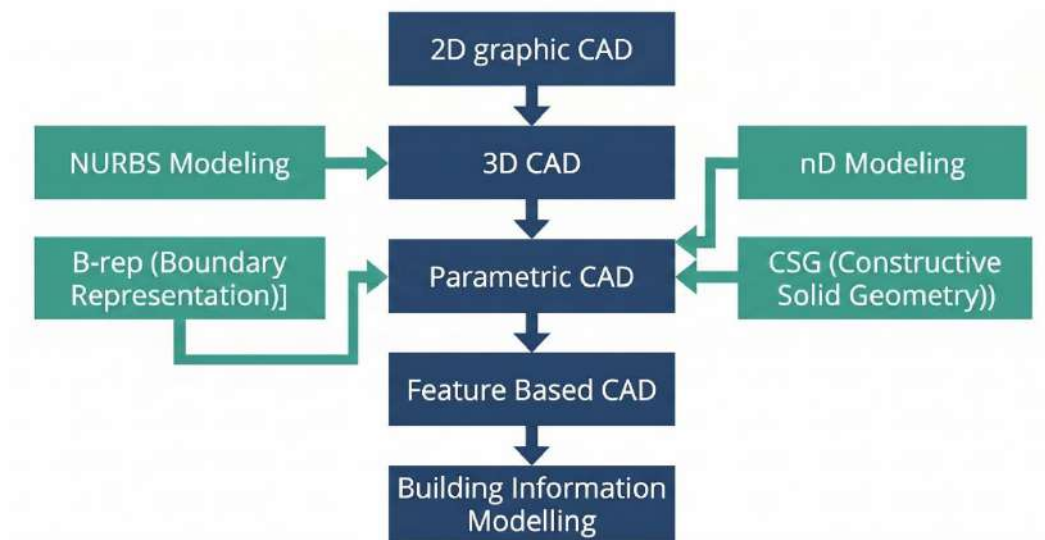


Fig. 19 - Illustrazione del percorso di passaggio dal CAD bidimensionale al BIM.

Analizzando questo percorso storico emergono tre fasi principali, la prima delle quali ha visto l'introduzione dei sistemi di Computer-Aided Design bidimensionali. Questa tecnologia iniziale ha consentito la digitalizzazione del disegno tecnico trasferendo l'operatività dal tavolo da disegno allo schermo del computer, mantenendo tuttavia inalterata la logica rappresentativa tradizionale. La seconda stagione ha introdotto la modellazione tridimensionale, dapprima attraverso superfici e poi attraverso solidi, avvicinandosi progressivamente a una rappresentazione volumetrica dell'edificio. La terza stagione, quella del BIM propriamente detto, ha aggiunto al modello tridimensionale la dimensione semantica: gli oggetti non descrivono solo la forma, ma anche il materiale, le proprietà fisico-tecniche, il costo, il fornitore, lo stato di manutenzione. L'espressione *nD modelling*, documentata nella letteratura specialistica fin dagli anni 2000, sintetizza questa progressione verso sistemi informativi sempre più multidimensionali: alle tre dimensioni spaziali si affiancano la gestione del tempo (4D),

dei costi (5D), della sostenibilità energetica (6D) e della manutenzione nel corso dell'intera vita utile dell'edificio (7D), disegnando un sistema orientato al ciclo di vita e non soltanto alla fase di progettazione o di costruzione (Eastman et al., 2011; Volk et al., 2014).

L'interoperabilità costituisce un nodo critico nell'architettura del Building Information Modeling, poiché la frammentazione derivante dalla molteplicità di piattaforme software sul mercato renderebbe vano ogni sforzo di condivisione delle informazioni in assenza di un formato di scambio neutro e standardizzato. Questo formato è rappresentato dagli Industry Foundation Classes (IFC), sviluppati dall'organizzazione internazionale buildingSMART e codificati nella norma ISO 16739³¹. Gli IFC definiscono uno schema aperto per la descrizione degli elementi edilizi e delle loro relazioni, consentendo il trasferimento del modello tra applicazioni diverse senza perdita sostanziale di informazioni, e la loro adozione è diventata condizione necessaria per qualsiasi processo collaborativo in ambiente BIM (Eastman et al., 2011). La progressiva diffusione di questo standard ha orientato il settore verso quello che viene denominato openBIM, un approccio basato su formati aperti e interoperabili, opposto all'utilizzo di formati proprietari, e che consente ai dati del modello di sopravvivere ai cambiamenti degli strumenti software nel corso del ciclo di vita del manufatto.

La dimensione normativa del BIM merita una trattazione specifica, poiché ha contribuito in modo determinante alla sua diffusione nel contesto italiano ed europeo. La Direttiva 2014/24/UE³² sugli appalti pubblici ha aperto la strada alla possibilità, per le stazioni appaltanti, di richiedere l'utilizzo di strumenti elettronici di progettazione per la

³¹ buildingSMART International, già International Alliance for Interoperability (IAI), è l'organizzazione internazionale che sviluppa e mantiene gli standard aperti per il settore delle costruzioni, tra cui il formato IFC. Fondata nel 1995, ha pubblicato la prima versione dell'IFC nel 1996. La versione attualmente più diffusa è IFC 4.3 (ISO 16739-1:2024), che ha esteso lo schema semantico anche al dominio infrastrutturale.

³² La Direttiva 2014/24/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio incoraggia gli Stati membri a modernizzare le procedure di appalto attraverso l'uso di mezzi di comunicazione elettronica e modelli informativi. L'obiettivo normativo primario consiste nel garantire una maggiore trasparenza procedurale e ottimizzare il bilancio costi e benefici lungo tutto il ciclo di vita delle opere pubbliche.

modellazione degli edifici, riconoscendo implicitamente il BIM come uno degli strumenti abilitanti per la trasparenza e l'efficienza dei processi di committenza pubblica. In Italia, l'attuazione di questi indirizzi è avvenuta con il Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 560 del 1° dicembre 2017³³, comunemente indicato come Decreto BIM, che ha stabilito un calendario di obbligatorietà progressiva del BIM nelle gare d'appalto pubbliche, partendo dai lavori di importo superiore a cento milioni di euro e scendendo per soglie successive fino a coprire progressivamente l'intero mercato pubblico. Il successivo Codice dei Contratti Pubblici, introdotto con il D.Lgs. n. 36 del 31 marzo 2023, ha ulteriormente consolidato questo orientamento, prevedendo l'obbligo generalizzato a partire dal 1° gennaio 2025. Al quadro normativo si affianca il sistema di norme tecniche della serie EN ISO 19650³⁴, che regola l'organizzazione e la gestione delle informazioni durante il ciclo di vita delle opere costruite, introducendo concetti operativi come il BIM Execution Plan (il documento contrattuale che definisce ruoli, responsabilità, formati e procedure di scambio informativo) e i livelli di sviluppo degli oggetti (LOD). La norma UNI EN 17412-1:2021³⁵ ha inoltre introdotto il concetto di Level of Information Need, specificando come le

³³ Il Decreto Ministeriale 560 del 2017 ha recepito le indicazioni comunitarie definendo le tempistiche per l'introduzione progressiva della modellazione elettronica in Italia. Il legislatore ha tracciato una roadmap graduale per permettere alle stazioni appaltanti e ai professionisti del settore di adeguare le proprie strutture tecnologiche e organizzative prima dell'entrata in vigore dell'obbligo generalizzato.

³⁴ La serie di norme EN ISO 19650 *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM)* costituisce il riferimento internazionale per la gestione delle informazioni nei processi BIM lungo l'intero ciclo di vita dell'opera costruita. Sviluppata dall'ISO e recepita come norma europea (EN), la serie si articola in più parti, ciascuna dedicata a una fase o a un ambito specifico del processo informativo.

³⁵ La serie di norme UNI EN 17412 *Building Information Modelling - Level of Information Need* definisce il metodo per la determinazione del fabbisogno informativo nei processi BIM, sviluppato dal CEN come evoluzione concettuale dei sistemi di classificazione per livelli di sviluppo predefiniti (LOD). La Parte 1 (UNI EN 17412-1:2021, *Concepts and principles*) introduce il concetto di Level of Information Need (LOIN) come criterio per la dichiarazione dell'informazione necessaria in relazione allo scopo specifico della commessa, articolandola in tre componenti (requisiti geometrici, requisiti informativi e requisiti documentali) definite per ciascuna fase del processo e per ciascun soggetto coinvolto. La norma EN 17412-1 è stata pubblicata dal CEN nel 2020 e recepita in Italia dall'UNI nel 2021.

informazioni debbano essere definite rispetto alle effettive esigenze di ciascun caso applicativo, non in base alla sola geometria (EN ISO 19650).

Proprio la questione dei livelli di sviluppo rappresenta uno degli assi di riflessione più produttivi nella ricerca disciplinare. Il Level of Development di un oggetto parametrico non riguarda soltanto la sua completezza geometrica, ma anche la quantità e la qualità delle informazioni non grafiche associate: un oggetto a basso livello di sviluppo può rappresentare fedelmente la forma di una parete senza contenere alcuna informazione sul materiale o sulle proprietà termiche, mentre un oggetto a livello elevato è un contenitore semantico capace di supportare analisi energetiche, simulazioni strutturali, calcoli di costo e pianificazione della manutenzione. La scomposizione semantica degli elementi architettonici definisce la struttura logica con cui le informazioni vengono attribuite e organizzate all'interno del modello digitale. Questo tema è stato oggetto di un'approfondita analisi critica nella letteratura disciplinare, con un'attenzione particolare rivolta al caso del patrimonio esistente. In tale contesto la complessità costruttiva, la stratificazione storica e l'eterogeneità dei materiali tradizionali generano sfide specifiche, spesso difficili da gestire in modo adeguato attraverso i soli strumenti concepiti per le nuove costruzioni (Potestà, 2020).

È in questo contesto che si è sviluppata la riflessione sull'Heritage Building Information Modelling, comunemente abbreviato in HBIM, un'elaborazione metodologica che muove dal riconoscimento dei limiti degli strumenti BIM standard quando applicati al patrimonio costruito. Il concetto è stato formulato per la prima volta in modo approfondito da Murphy, McGovern e Pavia in una serie di contributi pubblicati a partire dal 2009. L'HBIM (Fig. 20) viene definito come un sistema prototipale di oggetti parametrici fondati sulla documentazione storica dell'architettura (dai trattati di Vitruvio ai *pattern books* del XVIII secolo) mappati su dati di rilievo acquisiti tramite laser scanner o fotogrammetria digitale (Murphy et al., 2013). La conoscenza storica e costruttiva dell'edificio, ricavata da fonti archivistiche, manoscritti, fotografie d'epoca, indagini materiche, costituisce un elemento imprescindibile per la definizione degli oggetti parametrici, che possono in questo modo contenere informazioni relative non

soltanto alla superficie visibile dell'elemento ma anche alla sua struttura interna e alla composizione materica (Fig. 21). Questa capacità di modellare dettagli che si trovano al di là della superficie scansionata, e che il rilievo strumentale non può catturare direttamente, rappresenta uno degli aspetti più originali e dibattuti della metodologia (Murphy et al., 2013; López et al., 2018).

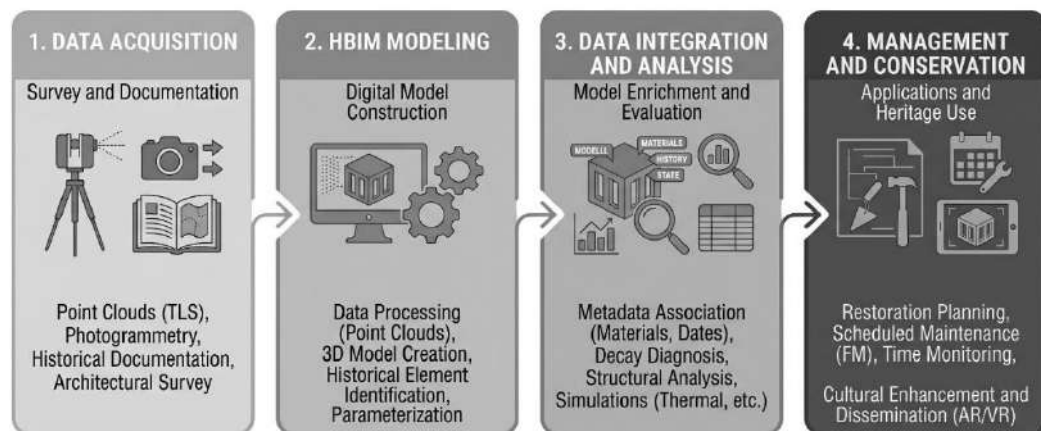


Fig. 20 - Illustrazione del processo consolidato HBIM.

La ricezione di questa proposta metodologica nella comunità scientifica internazionale è stata progressiva e sempre crescente. Il contributo del 2009 è rimasto per alcuni anni circoscritto alla cerchia degli specialisti di rilievo per la conservazione, ma a partire dal 2013 il numero di pubblicazioni sul tema ha registrato un'accelerazione significativa, con un'esplosione di interesse a partire dal 2019. Questo incremento quantitativo si accompagna a un significativo ampliamento delle tematiche affrontate. L'attenzione degli studiosi si è infatti progressivamente spostata dai problemi tecnici legati alla modellazione parametrica di elementi architettonici complessi verso questioni più ampie inerenti alla gestione informativa, all'interoperabilità, alle ontologie semantiche e all'integrazione con i sistemi GIS, delineando un panorama della ricerca decisamente più articolato rispetto agli esordi. Un'analisi bibliometrica condotta su 372 documenti estratti dal Web of Science ha confermato che i tre studi a più alta intensità citazionale

nel campo rimangono il contributo di Murphy et al. del 2013, la rassegna di Volk et al. del 2014 sull'applicazione del BIM agli edifici esistenti e il caso studio di Oreni et al. del 2014 sulla Basilica di Santa Maria di Collemaggio, a testimonianza della centralità della tensione tra definizione teorica e validazione empirica (Hu & Zou, 2022).

Una più recente analisi bibliometrica estesa al decennio 2015–2025, condotta su oltre 1400 pubblicazioni distribuite in sei domini tematici (conservazione e restauro, realtà estesa, archeologia dell'edificio, interoperabilità, modellazione avanzata basata su intelligenza artificiale e Digital Twin), documenta un'evoluzione del campo da strumento di modellazione geometrica a piattaforma informativa integrata, in cui l'interoperabilità resta il principale collo di bottiglia trasversale e in cui intelligenza artificiale e gemelli digitali stanno ridefinendo le traiettorie di ricerca in direzione di una conservazione predittiva (Banfi & Liu, 2026).

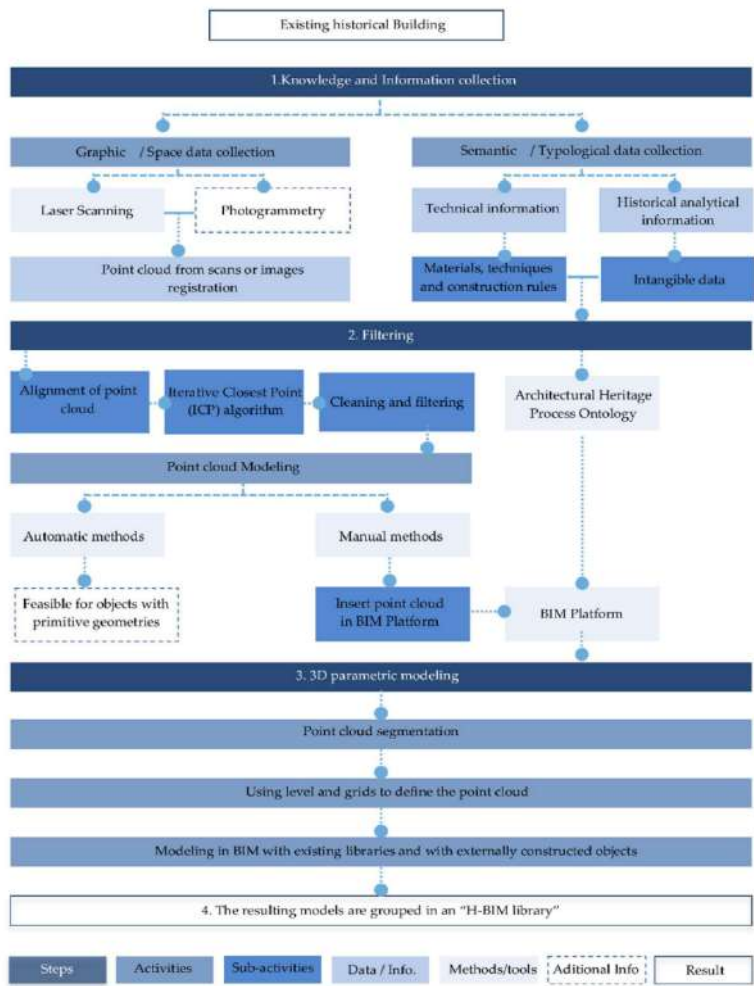


Fig. 21 - Diagramma illustrativo della metodologia HBIM. (Lopez, 2018)

La revisione approfondita della letteratura sull’HBIM proposta da López et al. (2018), che analizza oltre 131 pubblicazioni tra il 2007 e il 2018, ha offerto un primo quadro d’insieme capace di orientare la ricerca successiva. La combinazione di tecnologie di acquisizione dati (laser scanning e fotogrammetria) con piattaforme BIM si conferma come l’approccio metodologico prevalente nella grande maggioranza dei lavori esaminati. Tuttavia, soltanto una minoranza dei contributi analizzati affronta il problema dell’automazione del processo di trasformazione dalla nuvola di punti al modello

parametrico. Nonostante i progressi compiuti nello sviluppo di algoritmi di segmentazione e riconoscimento automatico degli oggetti, la procedura Scan-to-BIM resta prevalentemente manuale o al più semiautomatica, richiedendo l'intervento esperto dell'operatore in tutte le fasi critiche (López et al., 2018). Tale condizione comporta oneri significativi in termini di tempi e competenze necessarie per la produzione di modelli HBIM di qualità, rappresentando di fatto uno degli ostacoli principali alla diffusione sistematica di questa metodologia sull'intero patrimonio.

L'analisi di Volk, Stengel e Schultmann (2014) su oltre 180 pubblicazioni identifica tre categorie principali di sfide specifiche del BIM per l'esistente: l'elevato sforzo necessario per trasformare i dati di rilievo in oggetti BIM semanticamente ricchi, la difficoltà di aggiornare le informazioni nel modello nel corso del tempo, e la gestione di dati incerti o parziali che caratterizzano inevitabilmente la conoscenza degli edifici già costruiti. Questa triplice problematica, che la ricerca sull'HBIM ha successivamente tentato di affrontare con approcci diversi, costituisce ancora oggi il quadro di riferimento delle discussioni metodologiche più avanzate sul tema. Vale in particolare la segnalazione che, in Europa, oltre l'ottanta per cento degli edifici residenziali è stato costruito prima del 1990 e nella grande maggioranza dei casi non dispone di alcuna documentazione in formato BIM, il che rende il settore residenziale pubblico storico uno dei campi di applicazione più urgenti per lo sviluppo di metodologie HBIM adeguate (Volk et al., 2014).

La revisione proposta da López et al. (2018) classifica gli approcci esistenti in quattro categorie in funzione delle combinazioni di strumenti adottate: quella che utilizza esclusivamente piattaforme BIM commerciali; quella che le integra con strumenti ausiliari e software open source; quella che aggiunge sistemi GIS per la gestione spaziale delle informazioni; e quella che prescinde interamente dalle piattaforme BIM. Questa tassonomia evidenzia come non esista un percorso metodologico unico e universalmente condiviso, ma un insieme di approcci differenziati in funzione del tipo di manufatto, degli obiettivi del progetto e degli strumenti disponibili. La piattaforma Autodesk Revit® emerge come la più diffusa nei lavori esaminati, sia come strumento

principale che in combinazione con applicativi ausiliari come Rhinoceros e i suoi plugin NURBS, mentre Graphisoft ArchiCAD si distingue per la disponibilità del linguaggio di scripting GDL³⁶, che consente la creazione di oggetti parametrici altamente personalizzabili (López et al., 2018). I segmenti della nuvola di punti vengono interrogati per definire livelli, sezioni e piani di riferimento che guidano la posizione degli oggetti parametrici nel modello; le superfici regolari vengono modellate con le famiglie di sistema native, mentre gli elementi di forma complessa richiedono il ricorso a superfici NURBS³⁷, operazioni booleane o oggetti personalizzati.

Un altro tema ricorrente nella letteratura sull'HBIM riguarda la gestione dell'incertezza e dell'affidabilità delle informazioni contenute nel modello. A differenza di un modello BIM per la nuova costruzione, nel quale le informazioni sono determinate dal progetto e quindi certe per definizione, un modello HBIM che descrive un edificio esistente incorpora necessariamente un certo grado di approssimazione, derivante dall'imprecisione degli strumenti di misura, dalla lacunosità delle fonti documentarie e, in molti casi, dall'impossibilità di accedere fisicamente a tutte le parti del manufatto. Il concetto di Level of Reliability (Fig. 22), che integra e in parte supera la nozione di LOD tradizionale, consente di associare a ogni elemento del modello un livello di sviluppo geometrico e informativo, affiancandolo a una stima esplicita del grado di certezza con cui le informazioni sono note. In questo modo è possibile distinguere tra ciò che è stato misurato direttamente, ciò che è stato inferito da documenti d'archivio, ciò che è stato stimato per analogia tipologica e ciò che rimane non conoscibile senza indagini distruttive (Maiezza, 2019).

³⁶ Il *Geometric Description Language* (GDL) è il linguaggio di programmazione proprietario di ArchiCAD. Consente di creare oggetti parametrici "intelligenti" (oggetti GDL) definiti tramite script, permettendo una flessibilità di modellazione e una leggerezza del file superiori rispetto alla modellazione per componenti standard.

³⁷ NURBS (*Non-Uniform Rational Basis-Splines*) sono modelli matematici utilizzati nella computer grafica per rappresentare accuratamente geometrie complesse e forme organiche. Nell'HBIM sono indispensabili per modellare elementi degradati, fuori piombo o con irregolarità morfologiche che gli oggetti parametrici standard dei software BIM commerciali non riescono a descrivere fedelmente.

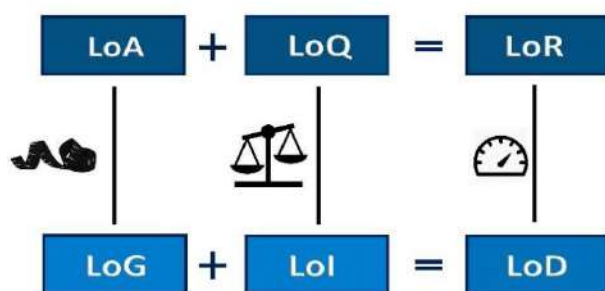


Fig. 22 - Schema concettuale dei Livelli di Definizione (LoD) e dei Livelli di Affidabilità (LoR). (Maiezza, 2019)

Questa stratificazione dell'affidabilità è stata applicata nel caso studio della Cattedrale di Parma, distinguendo con precisione le aree del modello fondate su dati di rilievo diretto da quelle ricostruite per inferenza storica, e si configura come strumento metodologico particolarmente prezioso nei contesti di accessibilità parziale o condizionata (Bruno & Roncella, 2018).

Il concetto di approccio orientato al modello, o “Model-Oriented workflow”, descrive una modalità di organizzazione del flusso informativo in ambiente BIM nella quale il modello supera la funzione di semplice prodotto finale del processo di documentazione, configurandosi come un contenitore attivo e dinamico che accompagna tutte le fasi operative, dalla raccolta dei dati preliminari fino alla condivisione dei risultati (Nonveiller, 2024). In questa prospettiva, il modello BIM viene aggiornato progressivamente con l'avanzare della conoscenza, mantenendo traccia delle fonti da cui provengono le diverse informazioni e della loro attendibilità, in modo coerente con la natura incrementale della conoscenza degli edifici esistenti. La mancanza di standard specifici per l'HBIM, segnalata da diverse rassegne recenti come uno dei limiti strutturali più gravi del campo, rende tanto più necessario il consolidamento di workflow documentati e trasferibili, capaci di orientare la pratica professionale in assenza di riferimenti normativi universalmente riconosciuti (Charlton et al., 2021; Lovell et al., 2023).

La trasposizione di questi principi all'edilizia residenziale pubblica introduce problematiche specifiche che la letteratura generale sull'HBIM ha affrontato in modo soltanto parziale. Le architetture del dopoguerra, prodotte in serialità, con tecniche

costruttive standardizzate e dettagli definiti dai manuali dei piani casa, presentano caratteristiche che le distinguono sia dall'architettura storica monumentale sia dall'edilizia di nuova costruzione. La standardizzazione tipologica, pur sembrando in grado di semplificare il processo di modellazione, viene ostacolata da una serie di fattori complicanti, quali le varianti introdotte in cantiere rispetto al progetto originale, le modifiche apportate nel corso dei decenni dagli inquilini, il degrado differenziale degli elementi costruttivi e la parziale corrispondenza tra la documentazione archivistica sopravvissuta e lo stato attuale del manufatto. A questi elementi si aggiunge il problema strutturale dell'accessibilità limitata, in quanto le unità abitative in esercizio non risultano normalmente accessibili per operazioni di rilievo senza il consenso esplicito dei residenti, ponendo una questione di rispetto della privacy che rappresenta un vincolo operativo ineludibile nella definizione del metodo di lavoro. Questa specificità del patrimonio residenziale pubblico costituisce uno dei presupposti fondamentali della presente ricerca. La definizione di un workflow strutturato che governi la relazione tra rilievo delle parti accessibili, integrazione dei dati d'archivio per le parti non accessibili e modellazione ibrida degli elementi di connessione tra le due sfere conoscitive trova il proprio fondamento teorico nel quadro qui delineato, e si configura come contributo specifico al campo dell'HBIM applicato al patrimonio architettonico contemporaneo.

4.2 Applicazioni del BIM per l'edilizia residenziale pubblica

L'edilizia residenziale pubblica presenta, rispetto al patrimonio storico-monumentale, condizioni operative diverse che, di conseguenza, impongono una riflessione applicativa distinta. Si tratta di architetture abitate, governate da logiche privatistiche all'interno di un quadro proprietario pubblico, gestite da enti con risorse spesso insufficienti rispetto alla dimensione degli stock patrimoniali da amministrare. Il modello BIM, in questo contesto, non è soltanto strumento di documentazione

geometrica, ma diventa infrastruttura informativa di supporto alla gestione ordinaria e straordinaria di patrimoni edilizi diffusi e numerosi, con tutte le implicazioni che ciò comporta in termini di scala, aggiornamento e interoperabilità con i sistemi gestionali preesistenti.

Tra le condizioni strutturali che caratterizzano questo settore applicativo spicca innanzitutto la dimensione quantitativa. Il patrimonio di edilizia residenziale pubblica gestito dagli enti preposti, ammontando spesso a decine di migliaia di unità abitative distribuite su numerosi edifici e quartieri, rende di fatto impraticabile una modellazione puntuale e ad alto dettaglio in assenza di protocolli standardizzati e risorse adeguate. A questa mole dimensionale si sovrappone una complessa condizione documentale, legata al fatto che la maggior parte degli edifici ERP è stata realizzata in un'epoca pre-digitale. In tale contesto la documentazione tecnica veniva prodotta su supporto cartaceo e solo raramente è confluita in archivi organizzati e aggiornate, generando una frammentazione informativa che costituisce oggi uno degli ostacoli principali alla costruzione di modelli BIM affidabili. Infine, emerge una terza criticità, ancora più specifica per questa categoria patrimoniale, riguardante l'accessibilità degli immobili. Gli edifici residenziali pubblici sono infatti occupati da inquilini che per ovvie ragioni di privacy e disponibilità non possono essere sempre coinvolti nelle campagne di rilievo, limitando significativamente le possibilità di documentazione degli spazi interni. La rilevanza di quest'ultimo fattore risulta cruciale, poiché è proprio la sua persistenza strutturale, per sua natura non risolvibile attraverso meri aggiustamenti logistici o tecnologici, a distinguere nettamente il contesto ERP da qualunque altra tipologia di patrimonio pubblico finora indagata dalla letteratura.

Il problema della scarsa adozione del BIM negli edifici esistenti non è esclusivo dell'edilizia residenziale pubblica, ma investe in modo trasversale tutto il patrimonio costruito. Nonostante la consolidata implementazione BIM nelle nuove costruzioni, la sua applicazione agli edifici esistenti rimane ancora sporadica, ostacolata da tre criticità principali: l'elevato sforzo di modellazione necessario per convertire i dati rilevati in oggetti BIM semanticamente strutturati, la difficoltà di aggiornamento continuo delle

informazioni nel modello, e la gestione dei dati incerti, parziali o contraddittori che caratterizzano inevitabilmente il costruito esistente (Volk et al., 2014). Va peraltro considerato che circa l'80% dei costi totali del ciclo di vita di un edificio si concentra nella fase di esercizio e gestione, rendendo la corretta implementazione del BIM in questa fase non un'opzione accessoria ma una condizione strategica per la sostenibilità economica del patrimonio pubblico (Volk et al., 2014). Queste criticità si presentano con intensità amplificata nel contesto ERP, dove alla difficoltà documentale e alla questione dell'accesso fisico si aggiunge la natura seriale dell'architettura, che impone scelte di standardizzazione non sempre compatibili con la variabilità costruttiva reale degli edifici.

La transizione dalla tradizionale rappresentazione bidimensionale a un sistema informativo parametrico integrato ha trovato una delle sue applicazioni più significative nella gestione dei patrimoni immobiliari pubblici, un dominio in cui la complessità organizzativa e la molteplicità degli attori coinvolti rendono indispensabile una struttura informativa condivisa e aggiornabile. Il Building Information Modeling, inteso non semplicemente come piattaforma di modellazione tridimensionale ma come sistema relazionale capace di integrare componenti geometriche, alfanumeriche e topologiche in un database unico, offre in questo senso un contributo rilevante alla ridefinizione delle pratiche di *Facility Management*³⁸ (Lo Turco, 2015). L'esperienza sviluppata dal gruppo di ricerca del Politecnico di Torino in collaborazione con il Servizio Edilizia e Logistica dell'Ateneo, con riferimento agli standard finlandesi di *Senate Properties*³⁹ rappresenta uno degli esempi più avanzati a livello internazionale di adozione BIM per la gestione di grandi patrimoni immobiliari pubblici e ha dimostrato come il processo

³⁸ Il Facility Management è la disciplina aziendale che coordina lo spazio fisico di lavoro con le persone e l'attività dell'organizzazione. Nel contesto dell'edilizia pubblica, si riferisce alla gestione integrata di tutti i servizi (manutenzione, energia, pulizia, sicurezza) necessari a mantenere il patrimonio abitativo efficiente e sicuro per l'intera durata della sua vita utile.

³⁹ Senate Properties è l'ente statale finlandese responsabile della gestione del patrimonio immobiliare pubblico. È stata una delle prime organizzazioni al mondo a imporre l'uso del BIM nei propri processi, sviluppando linee guida tecniche (BIM Requirements) che sono diventate uno standard di riferimento internazionale per la gestione digitale dei grandi patrimoni edilizi.

edilizio non si esaurisca nella consegna dell'opera, ma si estenda lungo tutto il ciclo di vita del manufatto, alimentando un sistema informativo dinamico capace di supportare decisioni manutentive, energetiche e gestionali. L'obiettivo centrale di tale approccio consiste nella definizione di una rappresentazione complessiva del manufatto durante l'intero ciclo di vita, specificando dati dimensionali, qualitativi e prestazionali all'interno del modello e dei suoi singoli elementi (Lo Turco, 2015).

Un aspetto cruciale evidenziato in questo contesto è la coesistenza, all'interno del database BIM applicato al patrimonio esistente, di dati "certi" (ottenuti da campagne di rilievo diretto) e dati "incerti", derivanti da documentazione storica lacunosa o da porzioni non accessibili degli edifici. La gestione di questa eterogeneità informativa richiede una ridefinizione degli standard di rappresentazione, necessariamente differenziati in funzione della natura del dato, e impone una riflessione rigorosa sulla qualità dell'informazione inserita nel modello (Lo Turco, 2015). La complementarità tra modelli BIM e applicativi di tipo *Computer Aided Facility Management* (CAFM) è un ulteriore elemento qualificante. I sistemi CAFM, capaci di gestire le operazioni di manutenzione, la pianificazione degli interventi e il monitoraggio delle prestazioni energetiche, trovano nel modello BIM una fonte di dati geometrici e alfanumerici coerenti, aggiornabili e interrogabili in modo interoperabile. La struttura informativa del modello diventa in questo senso non un prodotto finale, ma un sistema aperto, interrogabile da utenze con diversi livelli di competenza tecnica, dal gestore al tecnico manutentore.

Tra le esperienze italiane che hanno affrontato esplicitamente il tema del BIM applicato a edifici riconducibili alla stagione dell'edilizia pubblica del secondo Novecento, merita attenzione lo studio condotto dall'Università degli Studi di Cagliari sul complesso INA-Casa progettato da Enrico Mandolesi intorno al 1960 nel quartiere de La Palma, nella periferia orientale della città, che ospita circa 2500 abitanti. Un workflow BIM-GIS integrato è stato sviluppato per formalizzare la conoscenza e le informazioni necessarie alla gestione di questo significativo complesso residenziale, dimostrando come l'integrazione tra le due piattaforme possa rispondere alla necessità di strutturare dati

sia a scala di edificio che a scala urbana e territoriale (Vacca et al., 2018). Il punto di partenza della ricerca è precisamente la constatazione di una criticità documentale, ovvero, l'assenza di documentazione *as-built*⁴⁰ affidabile sulle componenti edilizie e impiantistiche, la difficoltà di rilevare lo stato d'uso e di conservazione aggiornato, e la mancanza di una storia manutentiva organizzata rendono estremamente complessa la pianificazione degli interventi necessari. In risposta a queste criticità, la metodologia proposta non prevede un trasferimento integrale dei dati BIM alla piattaforma GIS, ma una integrazione bidirezionale efficace tra i due sistemi informativi (Fig. 23), consentendo il passaggio fluido da uno all'altro in funzione della scala di analisi richiesta (Vacca et al., 2018). L'applicazione a un complesso INA-Casa rende questo studio particolarmente pertinente per la presente ricerca, poiché dimostra che le problematiche di conoscenza e gestione degli edifici ERP postbellici non sono specifiche di un contesto geografico, ma si ripresentano con caratteristiche strutturali analoghe in contesti diversi del territorio italiano.

⁴⁰ Il termine *as-built* (letteralmente "come costruito") si riferisce alla documentazione tecnica che descrive l'edificio così come è stato effettivamente realizzato, includendo le varianti apportate in corso d'opera rispetto al progetto originario. Nell'ERP, la discrepanza tra i disegni d'archivio e l'effettivo *as-built* è spesso marcata a causa di decenni di manutenzioni non documentate.

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico:
un approccio Archive+Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata (Italia) e Aragna (Spagna)

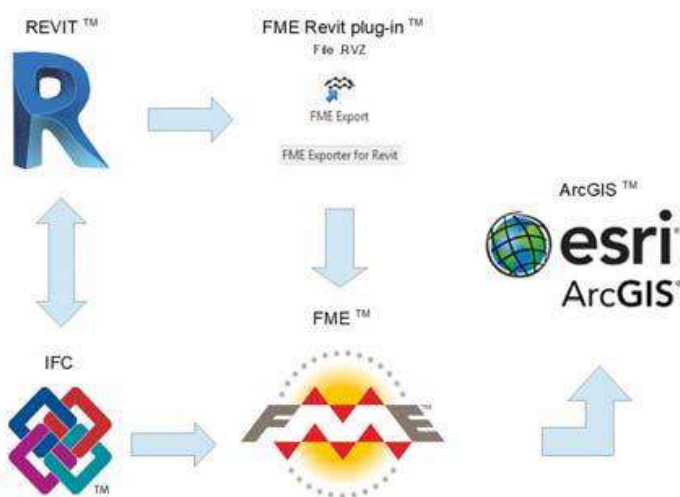


Fig. 23 – Esempio di workflow di integrazione tra metodologia BIM e sistemi GIS. (Vacca et al., 2018)

Un ulteriore contributo rilevante in chiave italiana è quello relativo al quartiere UNRRA-Casas de La Martella a Matera, progettato da un gruppo di architetti guidati da Ludovico Quaroni tra il 1952 e il 1954, che rappresenta uno degli esempi più significativi di sperimentazione neorealista nell'edilizia pubblica del dopoguerra. Una metodologia multiscala GIS-BIM è stata sviluppata per la conoscenza e la gestione di questo patrimonio moderno, strutturando e implementando un database informativo integrato che opera simultaneamente a scala di quartiere e a scala di edificio, con l'obiettivo di definire strategie di recupero per la protezione e la valorizzazione del complesso attraverso l'interoperabilità tra fonti d'archivio e dati ottenuti dalla campagna di rilievo (Pontrandolfi, 2020). L'aspetto metodologicamente più interessante di questa esperienza è la dimensione multiscala dell'approccio, all'interno del quale il modello informativo non si limita alla restituzione geometrica del singolo manufatto, ma struttura la conoscenza in modo gerarchico, dall'ambito urbano all'unità edilizia, consentendo interrogazioni e analisi differenziate in funzione degli obiettivi gestionali o progettuali di volta in volta perseguiti (Fig. 24). Questa impostazione risponde a una delle esigenze fondamentali della gestione del patrimonio ERP, che è quella di poter leggere il singolo

edificio nella sua relazione con il contesto urbano e con le strategie di rigenerazione dell'intero quartiere.

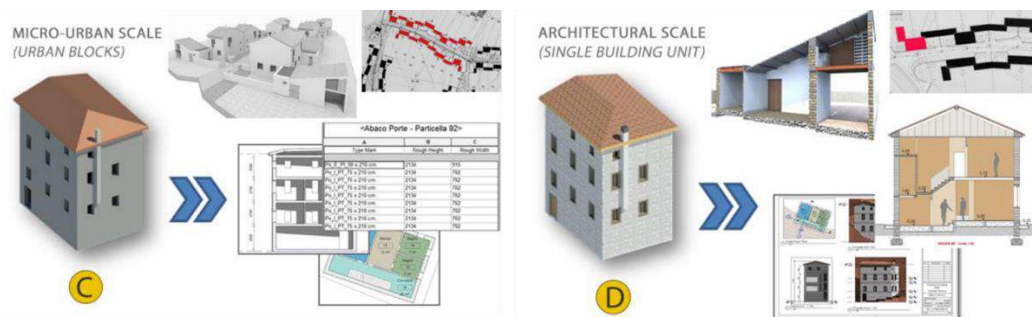


Fig. 24 - Esempio di "multi-scalarità" del modello BIM integrato a sistemi GIS. (Pontrandolfi, 2020)

A scala europea, l'esperienza più organicamente documentata di applicazione del BIM alla gestione del patrimonio ERP occupato è quella sviluppata in Spagna dall'Agenzia di Edilizia e Riabilitazione Andalusia (AVRA), ente pubblico che gestisce un patrimonio di oltre 73.000 alloggi distribuiti in numerosi complessi residenziali, principalmente di seconda metà del Novecento. Un workflow strutturato per la gestione del ciclo di vita di grandi patrimoni residenziali pubblici fondato sull'integrazione tra modello BIM e sistema *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) è stato proposto per rispondere alla complessità gestionale di tale ente, identificando in questa combinazione una risposta operativa sostenibile (Castellano-Román et al., 2022). Il primo problema affrontato è, significativamente, di natura documentale. Come anticipato, la gran parte degli edifici gestiti da AVRA è stata realizzata in epoca pre-digitale, con documentazione grafica su supporto cartaceo o, nei casi migliori, in formato CAD vettoriale non strutturato. Quattro scenari di partenza per la generazione del modello BIM sono stati identificati, dalla planimetria storica su carta alla documentazione digitale CAD, fino all'assenza totale di documentazione grafica, con strategie differenziate per ciascuno, commisurate alla tipologia di acquisizione metrica

e alle finalità del modello (Castellano-Román et al., 2022). È particolarmente rilevante per gli obiettivi della presente ricerca la scelta metodologica di non estendere il rilievo laser scanner agli interni degli alloggi. L'acquisizione dei dati di scansione, condotta con un laser scanner fisso per gli spazi comuni e con uno scanner portatile per alcune unità abitative campione, ha infatti deliberatamente escluso la totalità degli interni residenziali per ragioni di tempo e organizzazione logistica, dimostrando come la questione dell'accesso agli spazi privati rappresenti a tutti gli effetti un vincolo strutturale in grado di condizionare l'impostazione metodologica del workflow sin dalle prime fasi (Castellano-Román et al., 2022). La verifica della coerenza tra nuvola di punti e modello BIM ha evidenziato deformazioni planimetriche minori, legate all'esecuzione costruttiva sul sito, non tali da compromettere il modello di gestione ordinaria, suggerendo che per scopi manutentivi preventivi sia sufficiente un livello di accuratezza geometrica meno stringente di quello richiesto per interventi strutturali o di riqualificazione profonda. Il modello risultante, denominato BIM-AVRA, è stato concepito come modello "vivo", aggiornato nel tempo (Fig. 25), intenzionalmente semplificato nelle parti soggette a modifiche autonome da parte degli inquilini e connesso bidirezionalmente al software gestionale tramite script Dynamo programmati ad hoc per l'importazione ed esportazione dei parametri architettonici.

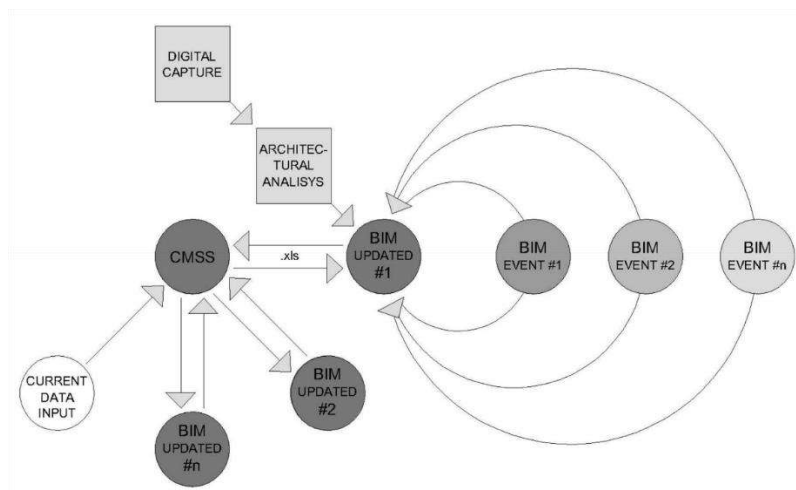


Fig. 25 - Diagramma che illustra il workflow del ciclo di vita e l'aggiornamento del modello BIM. (Castellano-Roman, 2022)

Affidabilità, verificabilità e automazione nell'aggiornamento dei dati sono stati identificati come i tre requisiti fondamentali di un sistema BIM orientato alla gestione di lungo termine (Castellano-Román et al., 2022). Il modello BIM-AVRA diventa così la base da cui derivare, all'occorrenza, modelli più dettagliati destinati a interventi specifici, senza che la complessità di questi ultimi comprometta l'aggiornabilità del modello di gestione ordinaria.

Un ulteriore contributo metodologicamente affine, pur riferito a una tipologia distante dall'edilizia residenziale, è quello del *Heritage Civil Information Modelling* (HCIM), approccio che estende la logica BIM alle infrastrutture pubbliche del patrimonio costruito con attenzione specifica alla conservazione preventiva. Una metodologia articolata in cinque fasi progressive (Documentazione, Diagnosi, Controllo, Prognosi, Terapia) applicata al Mercato Coperto di Algeciras, edificio razionalista progettato da Eduardo Torroja nel 1935, ha dimostrato come il modello tridimensionale possa diventare un sistema dinamico di registrazione e monitoraggio dello stato conservativo, in cui i dati di ispezione vengono trasferiti bidirezionalmente tra database e modello attraverso script Dynamo (Moreno Bazán et al., 2021). Il valore di questa esperienza per la presente ricerca risiede nello schema logico proposto, andando ben oltre la

specifica tipologia edilizia analizzata. La costruzione di una memoria storica degli interventi, concepita come condizione abilitante per la pianificazione razionale della manutenzione preventiva, rappresenta infatti un principio direttamente trasferibile al contesto ERP, indipendentemente dalle particolari caratteristiche costruttive dell'edificio.

L'analisi delle esperienze fin qui discusse permette di identificare alcune tensioni ricorrenti che attraversano questo campo applicativo e che orientano le scelte metodologiche più che le singole soluzioni tecniche. La prima questione riguarda il delicato rapporto tra accuratezza e aggiornabilità. I modelli orientati alla gestione di lungo termine convergono infatti verso una semplificazione intenzionale che privilegia la sostenibilità del processo di aggiornamento rispetto alla mera completezza geometrica, scardinando l'assunto implicito secondo cui un modello BIM risulta tanto più utile quanto più è dettagliato. La seconda questione riguarda il rapporto tra documentazione di partenza e finalità del modello. La qualità e la tipologia delle fonti grafiche disponibili, infatti, oltre a incidere sul costo del processo di modellazione, finiscono per orientare l'intera strategia metodologica, rendendo la gestione dell'eredità documentale predigitale uno dei nodi operativi più critici. La terza questione, di fondamentale importanza per questa ricerca, riguarda la scala dell'intervento. Nessuno degli approcci esaminati è stato infatti concepito o validato per contesti in cui l'accesso fisico agli spazi risulti strutturalmente limitato a causa di vincoli giuridici legati alla presenza degli abitanti, indipendentemente da eventuali ostacoli di natura tecnica o economica.

La quasi totalità delle esperienze documentate affronta il problema della documentazione in edifici che, per quanto complessi o parzialmente degradati, sono comunque accessibili al rilievo nella loro interezza. Il permesso di accesso è garantito, la disponibilità degli spazi può essere programmata, il rilievo può essere condotto con la completezza necessaria a costruire un modello coerente. Diversa è la situazione dell'edilizia residenziale pubblica occupata, dove la presenza stabile di inquilini introduce un vincolo strutturale che nessuna delle metodologie sopra descritte affronta

in modo sistematico. Il diritto alla riservatezza degli inquilini limita l'accesso agli spazi privati in modo tendenzialmente permanente, generando, in termini rappresentativi, porzioni del manufatto conoscibili esclusivamente attraverso fonti documentali indirette, quali disegni originali di progetto, relazioni tecniche d'archivio e fotografie storiche di cantiere (Rossi et al., 2024).

Una recente mappatura bibliometrica estesa a sei domini applicativi dell'HBIM sviluppatasi nel decennio 2015-2025 (Fig. 26) non individua alcun filone di ricerca specificamente dedicato al patrimonio residenziale pubblico occupato (Banfi & Liu, 2026).

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico:
un approccio Archive+Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata (Italia) e Aragna (Spagna)

No.	Thematic Domain	Guiding Questions	Analytical Objective	Methodological Aspects
1	HBIM in Restoration and Conservation	How are digital models used to support data-informed preservation strategies? What is the real impact of HBIM on the planning and execution of architectural or archaeological interventions?	Evaluate the contribution of HBIM to evidence-based conservation and improved decision-making processes.	3D modeling, information management, decision-support tools, and digital documentation.
2	HBIM in Extended Reality and Digital Engagement	How does the integration of HBIM with immersive technologies (VR, AR, MR) foster accessibility, inclusivity, and public participation in cultural heritage?	Analyze the role of immersive experiences in enhancing accessibility and engagement with heritage assets.	Augmented/Virtual/Mixed Reality, interactive interfaces, digital museology, citizen engagement.
3	HBIM for Building Archaeology	How can HBIM represent stratigraphy, material deterioration, and archival sources? How do such models support preventive conservation and historical interpretation?	Understand how HBIM integrates archaeological and historical data for stratified and scientific documentation.	Semantic modeling, material analysis, and integration of GIS and archival datasets.
4	Data Interoperability in HBIM	How can consistency, accessibility, and longevity of data be ensured across disciplines and platforms? What roles do open formats, semantic ontologies, and Common Data Environments (CDEs) play in shaping collaborative workflows?	Explore strategies to improve data exchange and collaboration throughout the HBIM lifecycle.	OpenBIM, IFC standards, semantic ontologies, linked data, interoperability frameworks.
5	Advanced HBIM Modeling	To what extent can Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) manage the geometric and semantic complexity of historic structures? How far can key modeling processes be automated without compromising accuracy?	Assess the potential of advanced computational techniques to optimize HBIM workflows for complex heritage assets.	AI, ML, geometry recognition, modeling, automation, and classification.
6	HBIM as a Foundation for Digital Twin and Lifecycle Management	How does HBIM integrate with DT for real-time monitoring and predictive diagnostics? What is the contribution of this convergence to proactive and intelligent heritage management?	Examine the emerging intersection between HBIM and DT for preventive maintenance and lifecycle optimization.	DT, IoT sensors, real-time analytics, predictive maintenance, innovative heritage management.

Fig. 26 - Domini tematici del HBIM (2015-2025). (Banfi, 2026)

I casi studio ricorrenti nei lavori più citati afferiscono al patrimonio monumentale, archeologico e religioso, mentre la problematica dell'accessibilità limitata come condizione strutturale della documentazione resta al di fuori del perimetro tematico consolidato. Questa assenza, verificabile bibliograficamente, conferma che la lacuna affrontata dalla presente ricerca non è circoscritta a un contesto nazionale, ma riflette una condizione generale del campo disciplinare. La mancanza di un approccio

consolidato per questa specifica categoria patrimoniale si traduce concretamente nell'impossibilità, per gli enti gestori come A.R.C.A. Capitanata, di costruire una conoscenza digitalizzata affidabile del proprio patrimonio attraverso gli strumenti metodologici attualmente disponibili. Le conseguenze sono operative ma anche culturali, poiché la mancanza di documentazione digitale strutturata alimenta quel circolo vizioso per cui il patrimonio ERP, poco conosciuto, rimane poco valorizzato.

4.3 L'integrazione del BIM nei processi di conoscenza e valorizzazione

Il modello informativo edilizio, nella sua accezione più ampia, non esaurisce la propria funzione nell'ottimizzazione dei processi costruttivi o nella pianificazione manutentiva. Quando applicato al patrimonio architettonico esistente, il BIM assume una valenza epistemica che va ben oltre la dimensione operativa: il modello non è una copia digitale dell'edificio, bensì il prodotto di un processo di conoscenza, un atto di lettura critica che interpreta la fabbrica secondo un sistema di relazioni geometriche, materiali e storiche (Attenni & Rossi, 2022). È questa la distinzione fondamentale che separa il Building Information Modeling applicato al patrimonio dall'uso convenzionale del BIM per le nuove costruzioni: nel primo caso, la costruzione del modello coincide con il processo stesso di comprensione dell'architettura, e ogni decisione di modellazione è prima di tutto una scelta interpretativa. Il modello si configura quindi come il luogo in cui la conoscenza dell'edificio viene strutturata, resa interrogabile e trasmessa, superando la funzione di mero contenitore di dati per agire come un dispositivo capace di organizzare, selezionare e mettere in relazione informazioni eterogenee secondo una logica disciplinare coerente. Questa prospettiva, maturata nell'ambito della ricerca italiana nel campo del Disegno e della Rappresentazione, fa dell'HBIM un metodo non solo tecnico ma culturale, capace di fondare e comunicare conoscenza in forme accessibili a una pluralità di utenti e istituzioni.

La questione dell'Heritage Building Information Modeling come strumento di conoscenza è strettamente connessa al concetto di tipo architettonico. Nel patrimonio residenziale pubblico del secondo Novecento, caratterizzato da elevati gradi di standardizzazione e da una logica compositiva fondata sulla ripetizione modulare degli elementi, il tipo costituisce la chiave di volta attorno alla quale si organizza la comprensione dell'edificio. La modellazione del tipo, intesa come definizione degli invarianti geometrici e compositivi che attraversano le singole istanze costruite, permette di descrivere un manufatto specifico giungendo a ricostruire la logica progettuale che lo ha generato (Attenni & Rossi, 2022). Il modello informativo diviene in questo senso uno strumento di analisi morfologica e tipologica, capace di evidenziare come le scelte architettoniche si siano tradotte in componenti costruttivi reali, e di mettere in relazione le invarianti progettuali con le variazioni che l'esecuzione e il tempo hanno introdotto nel manufatto. Nell'edilizia residenziale pubblica italiana, dove la progettazione dei piani INA-Casa e ISES si fondava sulla standardizzazione dell'alloggio e sulla replicabilità degli elementi tecnici, questo approccio acquista una rilevanza metodologica particolare: modellare il tipo significa ricostruire il pensiero progettuale che ha informato interi quartieri, restituendo coerenza conoscitiva a un patrimonio che si presenta fisicamente frammentato e spesso privo di documentazione tecnica aggiornata. La traduzione di questo approccio in un sistema operativo concreto richiede però la capacità di gestire simultaneamente scale di analisi diverse, dall'elemento costruttivo all'edificio, dall'edificio al quartiere, e di integrare fonti di natura eterogenea in un unico ambiente informativo. La sperimentazione condotta sul quartiere neorealista de "La Martella" a Matera⁴¹ ha dimostrato concretamente come l'integrazione di piattaforme digitali GIS-BIM possa strutturare una metodologia di conoscenza multiscale per l'ERP, costruendo un database informativo integrato che mette in relazione le fonti d'archivio con i dati del rilievo strumentale e definisce strategie di

⁴¹ Il borgo de La Martella è considerato il manifesto del Neorealismo architettonico italiano. Progettato per accogliere gli abitanti degli antichi Sassi di Matera, rappresenta il tentativo più alto di coniugare modernità urbanistica e tradizioni contadine locali. La sua digitalizzazione è dunque un caso studio fondamentale per testare come il BIM possa gestire architetture ad alto valore simbolico e sociale.

recupero orientate alla protezione e alla valorizzazione del patrimonio (Pontrandolfi, 2020). Questo caso costituisce un riferimento metodologico diretto per la ricerca sull'edilizia residenziale pubblica del secondo Novecento. La complessità tipologica e la stratificazione degli interventi che caratterizzano i quartieri INA-Casa e ISES richiedono infatti un approccio integrato, capace di leggere simultaneamente la scala dell'alloggio, quella dell'edificio e quella del quartiere attraverso un unico sistema informativo. In quest'ottica, il modello informativo del tipo architettonico integra e valorizza la complessità del caso singolo, fornendo la struttura concettuale entro cui le variazioni specifiche acquistano senso e possono essere sistematicamente documentate. L'integrazione con i sistemi GIS amplia ulteriormente tale capacità analitica, consentendo di contestualizzare il manufatto nella sua dimensione urbana e territoriale.

Una delle potenzialità più significative dell'approccio informativo al patrimonio è la capacità di aggregare, in un unico ambiente digitale, documentazione dispersa in archivi diversi. Nel campo dell'architettura moderna e contemporanea, la frammentazione dei fondi archivistici, come anticipato, rappresenta un ostacolo alla lettura integrata dell'opera. Il modello BIM, strutturato come database tridimensionale a cui ogni componente virtuale può essere collegato a diverse tipologie di documenti e informazioni, offre uno strumento per la riunificazione virtuale di questa documentazione dispersa (Conte & Rossi, 2019). La sperimentazione condotta sul patrimonio olivettiano di Ivrea ha mostrato come sia possibile costruire un sistema di archiviazione documentale (Fig. 27) in cui i singoli elementi del modello parametrico (pareti, solai, elementi strutturali, componenti di finitura) fungano da nodi di accesso a tutto il materiale d'archivio pertinente come disegni esecutivi, schizzi preparatori, fotografie storiche, carteggi tra committenti e progettisti (Conte & Rossi, 2019).



Fig. 27 - Esempificazione del sistema di archiviazione documentale e ispezione dei modelli parametrici. (Conte & Rossi, 2019)

In questo modo il modello supera la pura rappresentazione geometrica per configurarsi come un sistema informativo stratificato, dove la componente spaziale si integra direttamente con i dati documentali e storici. La possibilità di interrogare la struttura attraverso profili di utenza diversificati, quali storici dell'architettura, tecnici della manutenzione e progettisti, rende il database un reale strumento di conoscenza condivisa a supporto dei processi decisionali.

Questa visione di una metodologia integrata che dalla fase di acquisizione strumentale conduce alla documentazione, alla gestione e infine alla valorizzazione, trova una formulazione rigorosa nella letteratura scientifica sull'HBIM applicato ai Beni Culturali. L'approccio multidisciplinare che combina rilievo strumentale, normalizzazione e strutturazione dei dati, modellazione parametrica semantica e comunicazione pubblica risponde a due esigenze metodologiche complementari: da un lato, la necessità di una sintesi ragionata dei dati, che riduca la ridondanza informativa selezionando i contenuti più significativi per la conoscenza e la gestione del bene; dall'altro, la promozione di un'osmosi tra settori disciplinari diversi che tradizionalmente operano secondo logiche separate (Inzerillo et al., 2016). La realizzazione di modelli parametrici interconnessi attraverso vincoli e regole, all'interno di un unico sistema virtuale strutturato, diventa la condizione per una gestione integrata delle informazioni che supera la frammentazione

propria degli strumenti tradizionali di catalogazione. La rappresentazione geometrica tridimensionale, selettiva e simbolica, funziona da bacino entro cui le informazioni selezionate si interconnettono, restituendo all'organismo architettonico quella complessità di relazioni che i sistemi di catalogazione bidimensionali non riescono a rappresentare.

La modellazione semantica, intesa come associazione di classi informative strutturate agli oggetti geometrici del modello, permette di affiancare alla rappresentazione formale dell'edificio la definizione delle proprietà dei suoi elementi, comprendendo materiali, tecniche costruttive, stati conservativi e relazioni storiche tra le parti (Raco et al., 2022). La strutturazione dell'informazione secondo standard aperti come IFC, e la sua esposizione attraverso piattaforme collaborative (Fig. 28), trasforma il modello in una risorsa interrogabile da profili di utenza diversificati, ciascuno con proprie finalità e competenze. In questo contesto si colloca la nozione di eBIM (existing Building Information Modeling), sviluppata nell'ambito di un programma di ricerca industriale condotto presso il laboratorio DIAPReM dell'Università di Ferrara. A differenza dell'HBIM orientato al patrimonio storico-monumentale, l'eBIM estende le logiche di modellazione semantica parametrica all'intero patrimonio costruito esistente, a prescindere dal suo valore di tutela formalmente riconosciuto. Tale approccio assume come riferimento specifico le finalità operative del restauro, del recupero, della sicurezza e della manutenzione. Tale distinzione, superando il piano puramente terminologico, segna il passaggio da un approccio incentrato sulla conservazione del valore storico a uno orientato alla gestione dell'intervento.

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico:
un approccio Archive+Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata (Italia) e Aragna (Spagna)

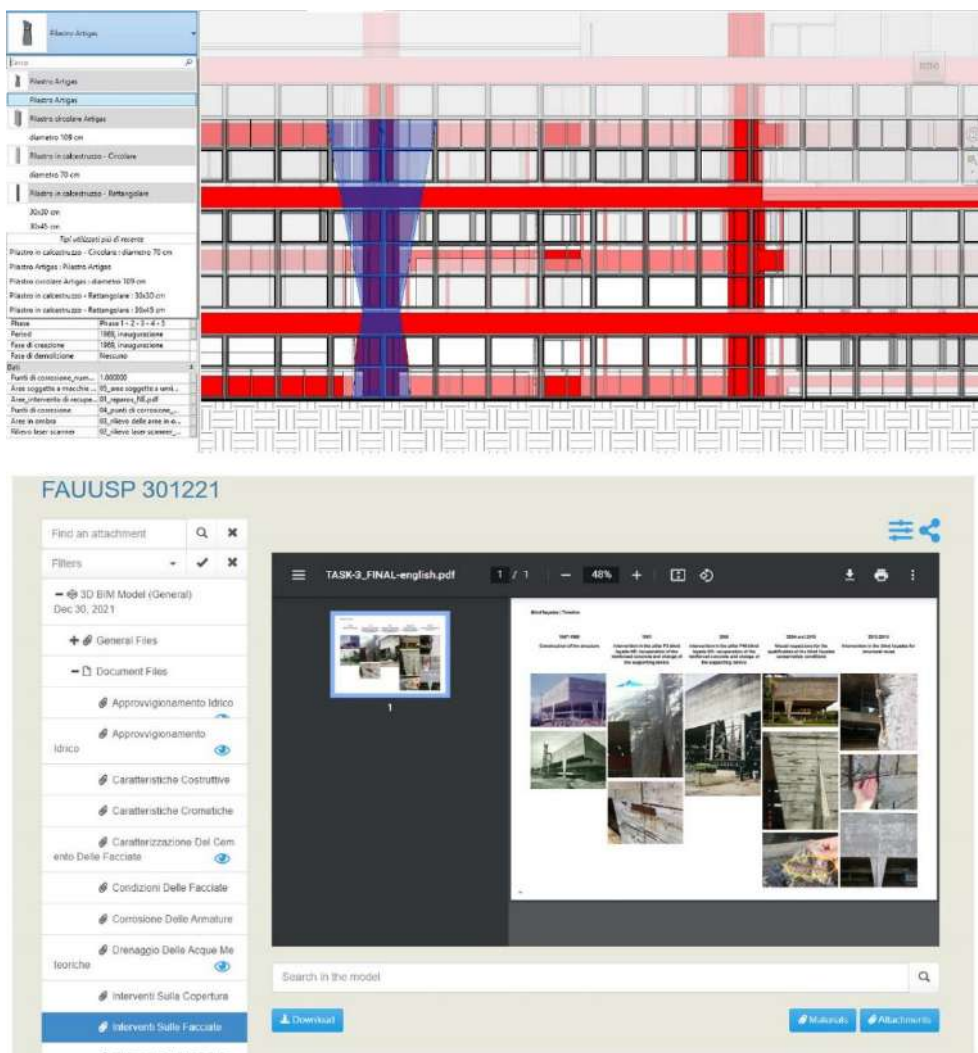


Fig. 28 - Esempio di piattaforma collaborativa HBIM con l'interrogazione dei contenuti. (Raco & Balzani, 2022)

Di conseguenza, si amplia notevolmente il raggio dei contesti in cui la modellazione semantica può supportare i processi di conoscenza e valorizzazione. In questa prospettiva, ogni componente del modello si configura come un oggetto "aumentato" (Raco et al., 2022). La base geometrica parametrica viene infatti integrata all'interno di un'entità digitale capace di includere le informazioni materiche, la consistenza costruttiva e i dati storico-culturali del manufatto rappresentato. In questo senso, la

modellazione semantica HBIM supera la semplice trascrizione di dati esistenti per generare nuova conoscenza attraverso la strutturazione e la messa in relazione di informazioni eterogenee. La definizione di ontologie specifiche per le geometrie, i materiali, le proprietà fisiche, le relazioni storiche, la documentazione allegata, costituisce una preconditione della modellazione stessa, che determina la qualità e la fruibilità futura del sistema informativo complessivo.

Sul piano operativo, e per rispondere alla domanda concreta su come questa stratificazione informativa venga effettivamente prodotta e integrata nel modello, i workflow di arricchimento semantico hanno conosciuto sviluppi significativi che ampliano considerevolmente le possibilità di documentazione e valorizzazione del patrimonio. L'approccio basato sull'annotazione semantica di panorami sferici, in cui le informazioni sulle caratteristiche costruttive, i materiali e gli stati di degrado vengono mappate su immagini calibrate e poi trasferite alla nuvola di punti del rilievo, permette di produrre modelli informativi arricchiti in modo semiautomatico, superando i limiti delle procedure manuali tradizionalmente associate al processo Scan-to-BIM (Angeloni et al., 2023). Questo tipo di workflow integra le fasi di acquisizione geometrica e di analisi qualitativa del manufatto in un processo unico, in cui il dato metrico e il dato semantico vengono prodotti e gestiti congiuntamente. Il risultato si configura come un sistema che, oltre ad arricchire il livello informativo del modello, consente di definire piani di intervento basati su evidenze documentate, monitorare nel tempo lo stato conservativo del manufatto e costruire una piattaforma condivisa tra i diversi attori coinvolti nella gestione del bene (Angeloni et al., 2023). In tale contesto, la garanzia dell'interoperabilità tramite lo standard IFC rappresenta una condizione indispensabile per svincolare le informazioni prodotte dagli ambienti proprietari, assicurandone la condivisione, l'aggiornamento e la valorizzazione nel lungo periodo.

Nel contesto specifico del patrimonio modernista, la funzione di aggregazione archivistica viene integrata da una diversa dimensione del BIM, orientata alla produzione di conoscenza critica attraverso il processo stesso di modellazione. Questo approccio supera la semplice organizzazione di materiali preesistenti per configurarsi come

un'attività di analisi attiva, capace di approfondire la logica costruttiva e progettuale del manufatto durante la sua ricostruzione virtuale. Il patrimonio architettonico del Novecento, con i suoi caratteri di innovazione tecnologica, sperimentazione costruttiva e frequente assenza di rilievi aggiornati, si rivela paradossalmente resistente agli strumenti convenzionali di catalogazione, proprio in ragione della complessità geometrica e della dipendenza da logiche compositive non sempre leggibili nell'edificio così com'è oggi (Balzani et al., 2016). Il cosiddetto "rilievo del progetto", ovvero, la ricostruzione del modello a partire dall'analisi approfondita delle fonti documentali, dei disegni originali e delle relazioni geometriche interne all'edificio, permette di recuperare la logica compositiva e strutturale di architetture per le quali la documentazione ufficiale non sempre è accessibile o completa. Il modello BIM diviene in questo caso non solo una restituzione dello stato di fatto ma uno strumento di analisi critica, in grado di evidenziare le scelte geometriche e proporzionali che hanno determinato la qualità spaziale dell'edificio, e di mettere in luce le trasformazioni che nel tempo hanno alterato l'immagine originaria (Balzani et al., 2016). La capacità del BIM di gestire elaborazioni tematiche, rappresentazioni dello stato di degrado, cronologie degli interventi, analisi comparate tra configurazioni successive, ne fa un mezzo privilegiato per la ricerca storico-critica sull'architettura contemporanea, aprendo la strada a nuove forme di valorizzazione che combinano rigore scientifico e accessibilità della comunicazione.

Una questione metodologica di rilevanza crescente riguarda la gestione dell'incertezza nei processi HBIM. La costruzione di un modello informativo presuppone in linea di principio la disponibilità di dati geometrici e documentali sufficientemente affidabili; tuttavia, molti edifici di interesse storico presentano condizioni di accessibilità limitata, documentazione lacunosa o dati di rilievo parziali che rendono il quadro conoscitivo necessariamente incompleto. La modellazione parametrica permette di costruire oggetti le cui dimensioni e relazioni geometriche rimangono aggiornabili nel momento in cui nuovi dati diventano disponibili, trasformando il modello da prodotto statico in strumento dinamico di integrazione progressiva della conoscenza e consente inoltre di ipotizzare e verificare le sequenze costruttive e le trasformazioni storiche dell'edificio,

attraverso la verifica delle compatibilità tra le fasi temporali assegnate ai singoli elementi (Mazzei et al., 2024). In questo senso, il processo di modellazione supera la pura restituzione dell'elaborato finale per configurarsi come un'attività conoscitiva continua. Il modello agisce pertanto come uno strumento di indagine in costante affinamento, capace di tracciare i dati acquisiti unitamente al relativo livello di affidabilità (Fig. 29). A questo proposito, la ricerca ha prodotto strumenti specifici per formalizzare e rendere comunicabile questa dimensione attraverso il concetto di *Level of Reliability* (LoR), introdotto come parametro globale che descrive la precisione geometrica e la corrispondenza semantica degli oggetti HBIM, e che offre un sistema strutturato per dichiarare, nell'ambito del modello stesso, il livello di attendibilità associato a ciascun elemento, distinguendo tra ciò che è stato direttamente misurato, ciò che è stato inferito da fonti documentali e ciò che rimane ipotetico (Maiezza, 2019). L'adozione di tale notazione rappresenta una scelta metodologica sostanziale che supera il piano puramente tecnico, configurando il modello HBIM come un sistema informativo esplicito. Questo approccio permette di documentare i processi e le condizioni di acquisizione del dato, definendo il modello uno strumento di analisi basato sull'evidenza. La capacità di esplicitare i livelli di attendibilità delle informazioni costituisce infatti un requisito fondamentale per l'impiego del BIM come supporto rigoroso alla ricerca scientifica e alla comunicazione dei beni culturali.

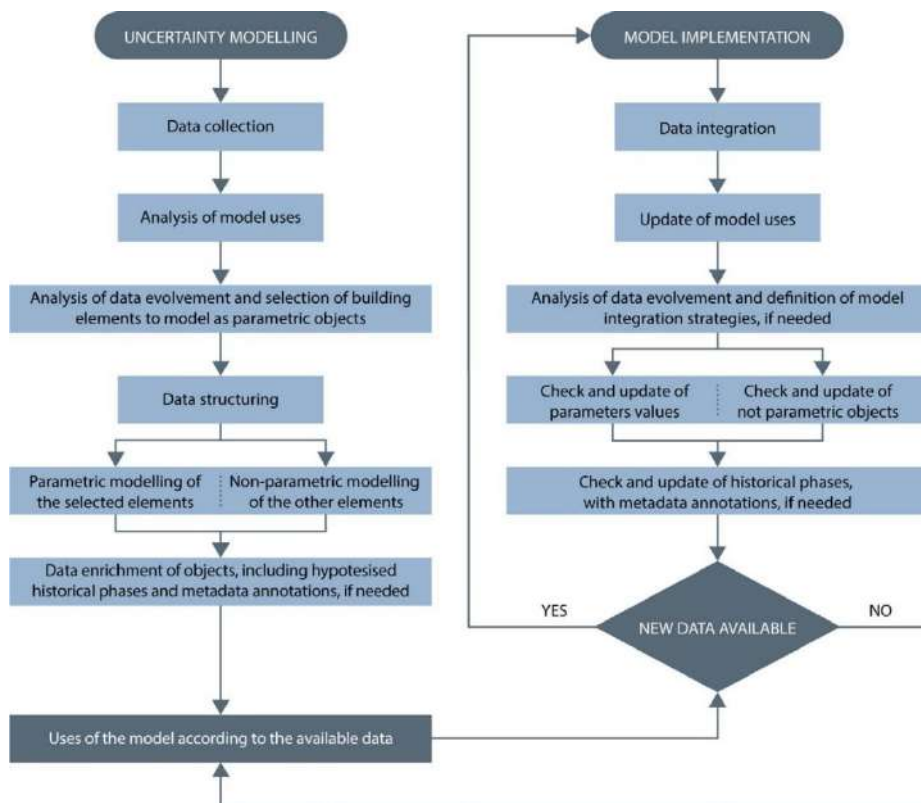


Fig. 29 - Rappresentazione schematica del workflow BIM a partire dalla definizione della sua affidabilità. (Mazzei, 2024)

La valorizzazione del patrimonio architettonico attraverso il BIM si estende oggi fino alla dimensione della fruizione pubblica e dell'esperienza immersiva. La combinazione di modelli HBIM ad alta definizione con tecnologie di Realtà Virtuale permette di ricostruire virtualmente porzioni di patrimonio perduto, di rendere accessibili spazi che non possono essere visitati fisicamente e di accompagnare l'utente in un'esperienza narrativa che integra la dimensione spaziale con i contenuti storici e documentali (Russo et al., 2024). In questo tipo di applicazione, sperimentata su casi di patrimonio

industriale e contemporaneo, la documentazione prodotta dal processo BIM diventa la base per nuove forme di comunicazione culturale, rivolte non solo agli specialisti ma a un pubblico ampio e diversificato. Il modello informativo costituisce la base metodologica per la correttezza geometrica e la precisione semantica dell'esperienza virtuale. In assenza di una struttura di dati affidabile, la realtà virtuale rimarrebbe confinata alla sola componente visiva. La modellazione informativa integra, infatti, la profondità documentale necessaria per trasformare la visualizzazione in un rigoroso strumento di ricerca e analisi scientifica (Russo et al., 2024). La distinzione tra accessibilità fisica e accessibilità culturale del patrimonio, tra il poter entrare in un edificio e il poterne comprendere la storia, le tecniche costruttive, il valore architettonico, è precisamente lo spazio entro cui il BIM può esercitare la propria funzione di mediazione culturale.

La capacità del BIM di produrre conoscenza e di supportare la valorizzazione del patrimonio architettonico contemporaneo dipende tuttavia in misura determinante dalla qualità dei dati su cui il modello è fondato. Un modello informativo costruito a partire da dati di rilievo imprecisi, lacunosi o non validati eredita inevitabilmente queste carenze, propagandole in tutte le analisi e le rappresentazioni che da esso derivano. La relazione tra l'accuratezza geometrica dell'acquisizione e l'affidabilità del modello informativo si configura pertanto come una condizione epistemica fondamentale. Il livello di conoscenza che il BIM può produrre e comunicare risulta infatti direttamente proporzionale alla qualità dei processi di acquisizione dei dati che ne costituiscono la base. La consapevolezza che il rilievo architettonico non è una semplice raccolta di misure ma un sistema di produzione di conoscenza a tutti gli effetti, con proprie scelte metodologiche, proprie condizioni di affidabilità e proprie implicazioni interpretative (Bianchini et al., 2021), orienta la ricerca verso una comprensione approfondita delle tecnologie di acquisizione laser scanner, fotogrammetria digitale, integrazione di fonti strumentali diverse e delle loro potenzialità ma anche dei loro limiti strutturali, come prerequisito indispensabile per qualsiasi applicazione HBIM volta alla conoscenza e alla valorizzazione del patrimonio costruito.

5. METODOLOGIE DI RILIEVO PER IL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

5.1 Metodologie di rilievo tradizionali e innovative

Il rilievo architettonico supera la mera misurazione dimensionale per configurarsi come un complesso atto conoscitivo, basato sulla selezione, l'interpretazione e la traduzione del manufatto in un sistema di rappresentazione. Questo presupposto teorico, consolidato nella tradizione disciplinare italiana del Disegno e della Rappresentazione, risulta fondamentale per inquadrare l'impatto dell'evoluzione strumentale. Le nuove tecnologie hanno infatti preservato la natura profonda della disciplina, trasformandone tuttavia radicalmente la struttura operativa e sollevando questioni inedite sul ruolo del rilevatore, sulla gestione dell'incertezza e sulle relative implicazioni metodologiche. Nella letteratura disciplinare italiana, il rilievo è definito come la "disciplina finalizzata alla conoscenza critica dell'architettura nei suoi aspetti morfologici, strutturali ed estetici", che si configura necessariamente come "sistema aperto di conoscenza, naturalmente implementabile nel tempo" e capace di avvalersi non solo delle tecniche mensurali ma anche delle conoscenze derivanti da fonti archivistiche e documentarie (Cundari, 2012). Questa definizione racchiude tre implicazioni fondamentali: la natura critica e non meccanica del processo; la sua apertura temporale, che rende ogni rilievo potenzialmente aggiornabile e integrabile nel tempo; e il suo carattere interdisciplinare, che legittima l'integrazione di fonti eterogenee come componente strutturale del metodo, non come ripiego in assenza di dati migliori. La qualità del modello informativo di un edificio esistente dipende, in misura determinante, dalla qualità e dall'affidabilità dei dati raccolti nella fase di acquisizione; ed è proprio su questa dipendenza che si costruisce la cornice concettuale entro cui le

diverse famiglie di metodologie vanno lette e valutate in rapporto tra loro (Docci et al., 2011).

La pratica del rilievo manuale, o diretto⁴², ha costituito per secoli l'unica modalità disponibile per la costruzione della conoscenza metrica dell'architettura. Dando per acquisite le nozioni disciplinari ampiamente consolidate in merito alle classificazioni tra metodologie dirette, indirette e strumentali, è utile evidenziare come tale metodo proceda per misurazioni incrementali. L'operatore acquisisce infatti distanze, angoli, quote altimetriche e campiture in modo puntuale, tramite l'ausilio di strumenti che richiedono il contatto fisico o la stretta prossimità con le superfici da documentare. Le limitazioni intrinseche della strumentazione tradizionale impongono infatti di individuare i punti significativi prima ancora di procedere alla misurazione. Questa operazione preliminare si configura a tutti gli effetti come un atto progettuale, richiedendo una preventiva lettura interpretativa del manufatto. Il rilievo esiste, in questo senso, nella mente del rilevatore prima ancora di essere trascritto sul supporto grafico (Bianchini, 2014). Nel quadro della tradizione italiana del disegno architettonico, il momento della preparazione, la definizione del cosiddetto "progetto di rilievo", precede sempre l'uscita sul campo, e la sua qualità determina in misura decisiva quella del prodotto finale (Docci & Maestri, 2001). Questo vincolo si configura a tutti gli effetti come un elemento "propulsivo" per la disciplina, poiché obbliga il rilevatore a impostare le operazioni con estremo rigore metodologico e a porre la comprensione critica dell'opera al centro del processo conoscitivo. Di conseguenza, la rappresentazione grafica risultante assume la forma di un modello selettivo e consapevole della realtà, in cui piante, sezioni, prospetti e dettagli costruttivi riflettono il livello di approfondimento e di sintesi raggiunto dall'operatore al momento dell'esecuzione. I limiti operativi di questo approccio emergono con chiarezza non appena l'oggetto presenta geometrie irregolari, superfici deformate nel tempo o, ad esempio, condizioni di accessibilità parziale. In questi casi la dipendenza dalla presenza fisica del rilevatore diventa un vincolo strutturale, e la

⁴² In questa sede si danno per acquisite le nozioni e le classificazioni ampiamente consolidate in letteratura riguardo ai metodi di rilievo e alle relative attrezzature, concentrando l'analisi sulle loro implicazioni conoscitive e metodologiche.

dichiarazione dell'incertezza, raramente formalizzata nei rilievi manuali tradizionali, rende difficile qualsiasi valutazione indipendente dell'affidabilità dei dati da parte di terzi (Bianchini, 2014). Questo aspetto riveste una duplice importanza, scientifica e operativa poiché un rilievo privo di un'accuratezza verificabile non può infatti costituire una base attendibile per gli interventi di consolidamento, né una fonte primaria per lo sviluppo di modelli informativi destinati alla gestione a lungo termine del patrimonio.

L'introduzione della topografia strumentale nella pratica del rilievo architettonico ha rappresentato una prima discontinuità significativa rispetto all'approccio puramente manuale. Stazioni totali, teodoliti e sistemi di posizionamento satellitare hanno consentito di acquisire coordinate tridimensionali con un livello di accuratezza metrica superiore, associandovi la dichiarazione esplicita dell'incertezza strumentale come parametro documentabile e condivisibile. Il contributo primario della topografia non risiede unicamente nella precisione metrica, quanto piuttosto nell'inquadramento metodologico del processo. La definizione di reti di punti di controllo georeferenziati permette infatti di ancorare tutte le acquisizioni a un sistema di riferimento assoluto. Questo approccio garantisce la coerenza geometrica globale dell'elaborato e assicura la possibilità di integrare dati rilevati in momenti distinti, mantenendo inalterata la coesione spaziale. Questo ha reso il rilievo strumentale indiretto una pratica consolidata per le scale di maggiore complessità (complessi edilizi estesi, tessuti urbani, campagne di documentazione territoriale) dove la coerenza del riferimento spaziale è una condizione irrinunciabile. La stazione totale misura, tuttavia, i punti che il rilevatore sceglie di misurare, quindi, la logica rimane selettiva e pre-acquisitiva, e il passaggio a un paradigma radicalmente diverso richiederà un salto di natura tecnologica oltre che metodologica.

La vera rottura con la logica della selezione preventiva si è verificata con la diffusione commerciale del laser scanner tridimensionale e, successivamente, con lo sviluppo degli algoritmi fotogrammetrici *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-View Stereo* (MVS). In entrambi i casi la logica operativa subisce un'inversione radicale, dal momento che l'acquisizione precede la selezione e sposta l'intervento del rilevatore

dalla scelta dei singoli punti alla definizione delle stazioni di scansione o delle prese fotografiche, delegando l'intera discretizzazione spaziale al sistema strumentale. Il risultato è una nuvola di punti densa, talvolta composta da centinaia di milioni di punti, che costituisce una registrazione capillare delle superfici rilevate, dalla quale la selezione e l'interpretazione avvengono in una fase successiva di post-processamento (Bianchini, 2014). Questo cambiamento ha ricadute che vanno oltre l'aspetto tecnico, poiché la nuvola di punti costituisce la materia grezza da cui ricavare il modello finale attraverso una lettura interpretativa consapevole. La capacità di isolare il "segnale" significativo dal "rumore" di milioni di misure non è automatizzabile in modo completo, perché rimane legata al concetto di modello come prodotto di una selezione soggettiva e intenzionale (Bianchini, 2014). Il rilevatore esperto non è diventato obsoleto, il suo ruolo si è solo spostato dalla fase di acquisizione a quella di interpretazione critica dei dati, in un processo che richiede tanta competenza tecnica quanto capacità di lettura architettonica che nessun algoritmo di segmentazione automatica può sostituire integralmente.

Nell'ambito della fotogrammetria digitale, lo sviluppo degli algoritmi SfM e MVS ha reso disponibile a costi accessibili una tecnologia capace di produrre nuvole di punti dense e modelli tridimensionali texturizzati a partire da sequenze fotografiche acquisite con fotocamere standard o dispositivi UAV. Il continuo sviluppo di sensori e metodologie di acquisizione multi-risoluzione ha contribuito in modo determinante alla documentazione digitale, alla conservazione e alla comunicazione del patrimonio costruito su scala internazionale (Remondino, 2011). La qualità metrica del prodotto fotogrammetrico dipende da molteplici variabili: le caratteristiche ottiche del sensore, il numero e la distribuzione delle immagini, il grado di sovrapposizione tra prese adiacenti e la presenza di punti di controllo noti per la georeferenziazione assoluta. È proprio per rispondere a queste criticità che il laser scanning terrestre, si afferma come tecnologia complementare, operando attraverso un principio attivo e indipendente dalla luce ambientale, garantisce una precisione metrica dichiarata e verificabile in condizioni operative in cui la fotogrammetria mostra i suoi limiti più evidenti.

Le caratteristiche operative delle metodologie descritte possono essere sintetizzate in una tabella comparativa che mette in relazione precisione metrica, tempi di acquisizione e post-processamento, e sostenibilità economica degli strumenti e dei software necessari:

Metodologia	Accuratezza metrica	Tempi (Acquisizione vs. Elaborazione)	Costi (Strumentazione e Software)
Rilievo diretto (Manuale)	Bassa/Variabile: Soggetta a errore umano; difficile da verificare; critica su geometrie irregolari.	Lunghi: Richiede misurazioni discrete e contatto fisico per ogni singolo punto di rilievo.	Molto bassi: Richiede solo strumenti di base (metro a nastro, distanziometro laser di base).
Topografia strumentale	Alta: Precisione millimetrica; garantisce coerenza globale e georeferenziazione.	Medi: Processo selettivo (l'operatore sceglie cosa misurare); più rapido per progetti su larga scala.	Medi: Costo di stazioni totali e sistemi professionali GPS/GNSS.
Laser Scanning	Molto alta: Rilievo capillare (nuvole di punti); preciso anche su superfici deformate o irregolari.	Rapidi (Acq.) / Medi (Post): Acquisizione massiva istantanea; richiede una fase critica di post-elaborazione.	Alti: Tecnologia costosa sia per l'hardware che per i software di gestione.
Fotogrammetria (SfM/MVS)	Medio-alta: Dipende dalla qualità del sensore, dalla distribuzione delle immagini e dal loro sormonto (<i>overlap</i>).	Molto rapidi (Acq.) / Lunghi (Post): Estremamente veloce sul campo (specialmente con UAV/droni); elaborazione computazionalmente intensiva.	Bassi/Medi: Accessibile (fotocamere standard); costi di licenza software variabili.

La tendenza più accreditata nella letteratura internazionale è pertanto quella di combinare le diverse tecniche in approcci multi-strumentali integrati, nei quali ciascun metodo contribuisce a colmare le mancanze degli altri. La topografia fornisce il riferimento assoluto e la struttura di controllo; il laser scanning garantisce la copertura geometrica densa delle superfici accessibili con accuratezza verificabile; la fotogrammetria UAV integra le parti non raggiungibili da terra e arricchisce il modello con informazioni radiometriche e texturali di elevata qualità. La documentazione così ottenuta non è un prodotto finale in sé, ma una base conoscitiva imprescindibile per qualsiasi processo di modellazione, gestione e valorizzazione del patrimonio costruito (Chiabrando e at., 2016). È nel passaggio da questa base di acquisizione al modello informativo che si inseriscono le sfide interpretative più rilevanti e che la competenza disciplinare del rilevatore torna a essere centrale, indipendentemente dalla tecnologia impiegata.

La questione dell'accessibilità introduce una dimensione che nel patrimonio residenziale pubblico occupato diventa il fattore determinante per orientare le scelte metodologiche. Se nel patrimonio storico-monumentale i limiti sono generalmente di natura fisica e superabili con strumentazioni specifiche, negli edifici ERP abitati gli ostacoli assumono una connotazione diversa. In questi contesti la normativa sulla privacy si intreccia infatti con le complesse dinamiche sociali di quartieri spesso caratterizzati fenomeni di marginalità. Questo clima fa sì che un intero complesso possa essere documentato nella sua geometria esterna con grande precisione, mentre i singoli appartamenti restano fisicamente inaccessibili al rilevatore a prescindere dalla tecnologia disponibile. Questa condizione genera una discontinuità conoscitiva in cui le parti comuni (androni, vani scala, cortili, facciate, coperture) vengono acquisite con i metodi più accurati disponibili, mentre gli ambienti interni degli alloggi privati si configurano "buchi" nel quadro geometrico complessivo dell'edificio (Giannattasio et al., 2020).

È in questo scenario che la documentazione archivistica assume una funzione conoscitiva insostituibile, complementare e non alternativa al rilievo. I disegni di

progetto originali, le relazioni tecniche di cantiere e le fotografie storiche custodite negli archivi degli enti gestori forniscono informazioni sulle distribuzioni interne, sui dettagli costruttivi e sulle tecnologie impiegate che nessuna scansione esterna può restituire con analogo completezza. L'integrazione metodologica tra nuvole di punti riferite alle parti accessibili e planimetrie ricostruite da fonti documentali configura un approccio ibrido che risponde alla specificità del patrimonio ERP con maggiore efficacia di qualsiasi metodologia "monostrumentale". Questa integrazione richiede però procedure esplicite di verifica della coerenza dimensionale tra le due famiglie di dati e, soprattutto, la dichiarazione formale del livello di affidabilità associato a ciascuna componente del modello. L'adozione del Level of Reliability (LoR) rappresenta la sintesi pratica di quanto discusso finora (Bianchini & Nicastro, 2018). Rendere esplicito lo scarto tra i dati misurati direttamente e quelli ricostruiti tramite fonti d'archivio eleva l'onestà scientifica a requisito fondamentale del modello, garantendo una piena leggibilità delle informazioni. Questa distinzione, unita a una gestione trasparente del dato, costituisce la base della proposta metodologica approfondita nelle pagine successive.

5.2 Laser scanner e fotogrammetria per il rilievo architettonico

Il laser scanning terrestre e la fotogrammetria rappresentano oggi alcune delle tecnologie più consolidate nel panorama del rilievo architettonico digitale⁴³. La sua affermazione nel settore del patrimonio costruito è avvenuta in modo progressivo a partire dalla fine degli anni Novanta, accelerando nel corso del primo decennio del Duemila con la miniaturizzazione degli strumenti, la riduzione dei costi e il

⁴³ Dal momento che si tratta di nozioni ampiamente documentate e consolidate in ambito accademico, si rinvia alla letteratura scientifica per gli approfondimenti sulle specifiche tecniche di queste metodologie. Tra i contributi di riferimento si segnalano le opere di Remondino, F., & Campana, S. (2014), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage*, e di Docci, M., & Maestri, D. (2009), *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*.

miglioramento dei software di processamento. L'applicazione sistematica del laser scanning nel campo dell'HBIM ha amplificato l'interesse per queste tecnologie, che oggi costituiscono la base acquisitiva più affidabile per la generazione di nuvole di punti dense, precise e colorimetricamente accurate (Remondino, 2011; Aicardi et al., 2018). Il collegamento tra il dato metrico tridimensionale così ottenuto e la piattaforma BIM costituisce un passaggio critico e consapevole, poiché implica scelte interpretative calibrate sugli obiettivi specifici del modello e progressivamente codificate dalla letteratura disciplinare in protocolli orientati all'uso (Chiabrando et al., 2016). In parallelo, la fotogrammetria digitale basata su algoritmi di Structure from Motion (SfM) ha conosciuto una crescita altrettanto significativa, diventando complemento indispensabile (e in certi contesti alternativa praticabile) al rilievo laser scanner.

I laser scanner terrestri operano misurando la distanza tra lo strumento e le superfici dell'oggetto rilevato attraverso l'emissione di impulsi o onde laser. Esistono due principali tecnologie di misura distanziometrica: il metodo tempo di volo (time-of-flight, ToF) e il metodo a differenza di fase (phase-shift) (Fig. 30). Nel primo caso, lo strumento calcola la distanza misurando il tempo impiegato dall'impulso laser a percorrere il tragitto andata-ritorno verso la superficie; questo principio garantisce elevati range operativi, nell'ordine di centinaia di metri, ma con cadenze di acquisizione relativamente contenute. Nel secondo caso, lo strumento emette un'onda laser continua modulata in ampiezza e determina la distanza calcolando lo sfasamento di fase tra il segnale emesso e quello ricevuto; questo approccio consente velocità di acquisizione molto superiori (nell'ordine di milioni di punti al secondo) e accuratèzze nominali più elevate a distanze ravvicinate e medie, a scapito di range operativi più ridotti, generalmente non superiori ai 70-150 metri (Borkowski & Kubrat, 2024). Per il rilievo di edifici residenziali pluripiano inseriti in contesti urbani densi, la tecnologia phase-shift è generalmente preferibile, poiché consente di coprire facciate articolate su più livelli con stazioni posizionate a distanze di lavoro contenute, ottenendo risoluzioni millimetriche senza ricorrere a un numero eccessivo di posizionamenti.

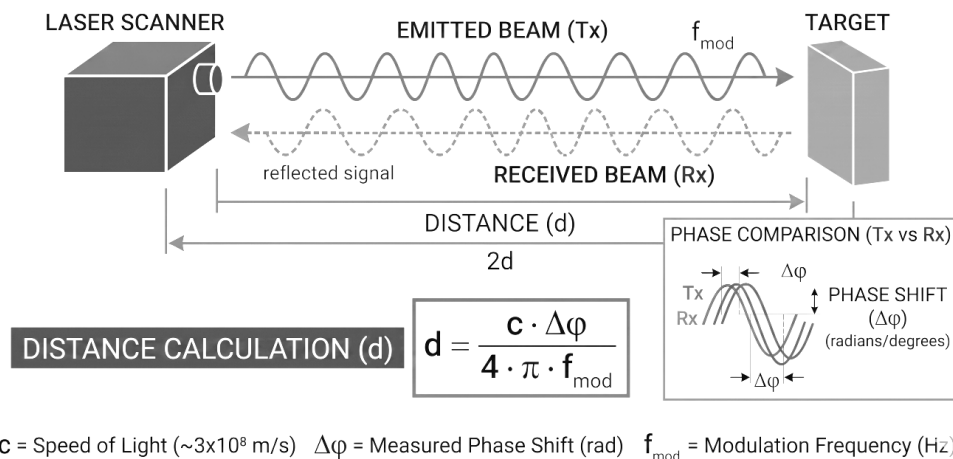


Fig. 30 - Illustrazione schematica del funzionamento dei laser scanner a differenza di fase.

La progettazione di una campagna di rilievo laser scanner richiede un'attenta pianificazione preliminare che tenga conto della geometria dell'edificio (Fig. 31), degli ostacoli prevedibili, delle condizioni di luce e dell'accessibilità degli spazi. La definizione dei protocolli di scansione dipende da variabili contestuali che richiedono una valutazione caso per caso e non si prestano a una standardizzazione assoluta, come la morfologia del lotto, la presenza di elementi aggettanti o di piani rientrati, la disponibilità di punti di stazionamento sicuri, i vincoli di accessibilità imposti dall'uso residenziale dell'edificio (Buldo et al., 2023).

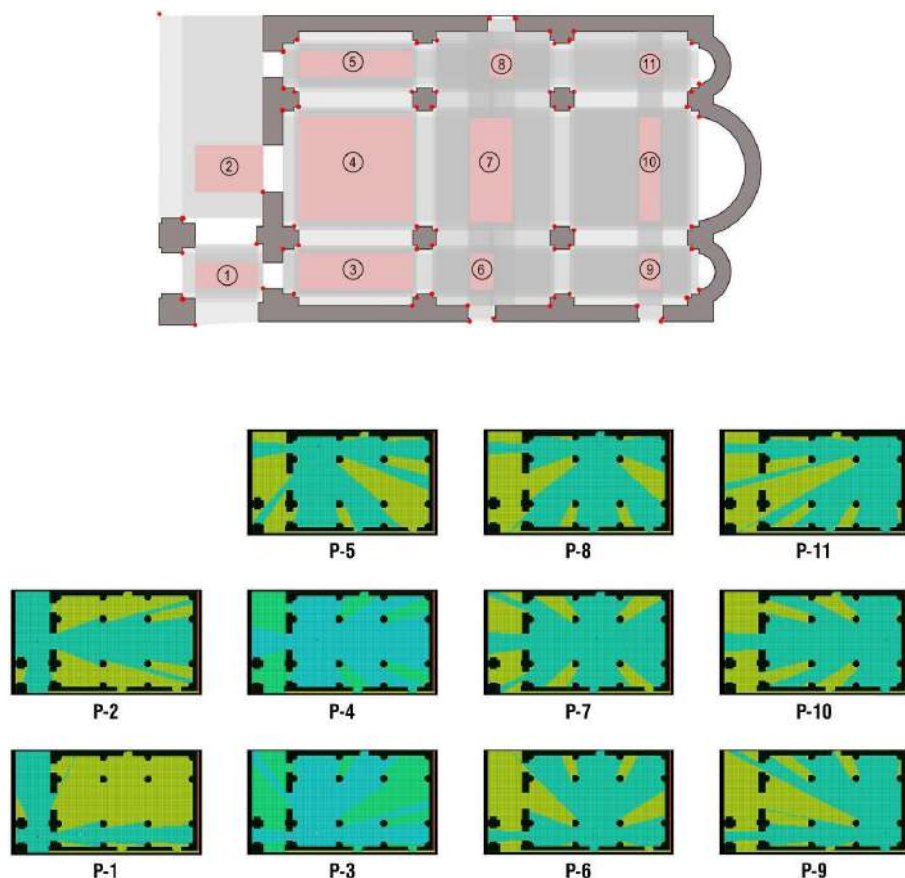


Fig. 31 - Pianificazione automatizzata delle posizioni di scansione laser. (Buldo et al., 2023)

Il principio fondamentale che guida il posizionamento delle stazioni è la massimizzazione della copertura superficiale con il minimo numero di scansioni, garantendo al contempo una sovrapposizione sufficiente tra scan adiacenti (generalmente non inferiore al 20-30% della superficie coperta) per la successiva fase di registrazione (López et al., 2017). I target di registrazione, ovvero sfere riflettenti o pannelli planari posizionati in punti visibili da almeno tre stazioni consecutive, costituiscono un elemento critico del workflow, determinando sia la qualità della registrazione che la georeferenziazione complessiva del dato.

Per la registrazione delle scansioni (l'operazione di riconduzione di tutte le nuvole acquisite da stazioni diverse a un sistema di riferimento comune) si ricorre generalmente a due approcci complementari. Il metodo basato su target sfrutta i marker posizionati in campo e riconosciuti automaticamente dal software come punti omologhi tra scansioni adiacenti; questo approccio garantisce accuratissime elevazioni ma richiede una pianificazione accurata del posizionamento dei target e un numero minimo di punti di appoggio comuni per ciascuna coppia di scan. Il metodo basato su cloud-to-cloud alignment sfrutta l'algoritmo Iterative Closest Point (ICP) (Besl & McKay, 1992; Holz et al., 2015), che opera sulla geometria intrinseca della nuvola ricercando la corrispondenza tra punti omologhi nelle regioni di sovrapposizione attraverso successive iterazioni di minimizzazione delle distanze punto-punto; pur essendo più automatizzato, questo approccio presuppone una sovrapposizione geometrica sufficiente e una variabilità morfologica adeguata delle superfici nella regione di overlap (Bruno et al., 2022). Nella pratica le due strategie vengono spesso combinate, impiegando la registrazione target-based per ancorare il dato a un sistema metrico coerente e il successivo affinamento ICP per minimizzare i residui nelle zone di sovrapposizione.

Una volta completata la registrazione, la nuvola unificata viene sottoposta a operazioni di pulizia e decimazione prima di essere importata nell'ambiente BIM. La pulizia della nuvola si articola in due livelli operativi distinti. Il primo riguarda la rimozione manuale degli elementi estranei acquisiti durante le campagne: vegetazione, veicoli parcheggiati, passanti, attrezzature temporanee; il secondo riguarda la gestione degli errori statistici distribuiti nella nuvola, che non derivano da oggetti fisici ma da imperfezioni di acquisizione. Per questo secondo livello, CloudCompare mette a disposizione due filtri complementari. Il filtro SOR (Statistical Outlier Removal) calcola per ciascun punto la distanza media ai suoi k vicini più prossimi e rimuove i punti la cui distanza supera la soglia definita dalla media più un multiplo della deviazione standard; questo filtro è particolarmente efficace per eliminare punti isolati e rumore diffuso non correlato con la geometria locale. Il filtro Noise opera invece proiettando ciascun punto sul piano di

best-fit calcolato sul suo intorno locale e rimuovendo i punti che si discostano da quel piano oltre una soglia definita; questo approccio è più selettivo nelle discontinuità geometriche e consente di preservare spigoli e dettagli architettonici che il SOR rischierebbe di eliminare. A questi si aggiunge la gestione degli artefatti "mixed-pixel", ovvero anomalie geometriche che si generano nelle discontinuità superficiali quando il fascio laser intercetta contemporaneamente due superfici a profondità diverse. Nelle aree a forte discontinuità geometrica, come gli angoli tra facciata e balcone o i profili delle finestre, i punti affetti da mixed-pixel possono alterare significativamente le misurazioni dimensionali, con deviazioni che in alcuni casi superano il doppio dell'accuratezza nominale dello strumento (Alshawabkeh & Baik, 2023); la loro attenuazione in post-processamento avviene attraverso filtri per normale vettoriale o per distanza dal piano locale, ma non è mai completa. Questo problema, che la fotogrammetria SfM è in grado di mitigare attraverso l'acquisizione da posizioni diverse, costituisce uno degli argomenti tecnici più solidi a favore dell'integrazione delle due tecnologie.

La decimazione della nuvola costituisce l'operazione di riduzione controllata dei dati necessaria per garantire la gestione del modello all'interno dell'ambiente BIM senza rinunciare alle informazioni geometriche rilevanti. A differenza della pulizia, che interviene sulla correttezza del singolo punto, questa fase agisce sulla massa dei dati attraverso algoritmi di sottocampionamento spaziale in grado di ottimizzare la densità in funzione della morfologia dell'edificio e delle necessità di calcolo. La letteratura e i software di elaborazione mettono a disposizione diversi approcci metodologici, tra cui il campionamento spaziale uniforme (che fissa una distanza minima costante tra i punti), l'impiego di griglie tridimensionali o Voxel Grid (che calcola un punto rappresentativo per ogni cella di volume predefinito) e la decimazione adattiva basata sulla curvatura. Quest'ultima tecnica risulta particolarmente efficace, poiché preserva un dettaglio elevato in corrispondenza di elementi articolati come cornici o telai di apertura e applica una semplificazione più aggressiva sulle parti piane estese dei paramenti murari. La scelta del metodo e della densità finale rimane strettamente legata

al LOIN definito per la ricerca, in quanto per la documentazione del patrimonio residenziale pubblico risulta sufficiente una risoluzione che renda leggibili i componenti fondamentali come muri, solai e aperture. Questo approccio permette di contenere il peso dei file e favorire l'efficienza dei software di modellazione, trasformando la nuvola in una base di lavoro operativa e funzionale rispetto alla densità ridondante delle scansioni originali.

Parallelamente al rilievo laser scanner, la fotogrammetria digitale SfM costituisce la seconda tecnologia di acquisizione integrata nel workflow. La fotogrammetria SfM si basa sull'estrazione automatica di punti di interesse omologhi da sequenze di immagini sovrapposte acquisite da posizioni diverse, stimando simultaneamente la posizione e l'orientamento delle camere e la geometria tridimensionale della scena attraverso algoritmi di bundle block adjustment (Schönberger & Frahm, 2016). Il flusso operativo standard prevede quattro fasi sequenziali: l'allineamento delle immagini con stima dell'orientamento relativo, la generazione di una nuvola sparsa dai punti di interesse, la densificazione attraverso algoritmi di dense image matching per ottenere la nuvola densa, e la successiva ricostruzione della superficie mesh. La georeferenziazione metrica del modello fotogrammetrico richiede l'impiego di Ground Control Points (GCP), ovvero punti di riferimento di coordinate note estratti dalla nuvola laser georiferita, per orientare il modello in un sistema di riferimento assoluto e scalare il dato alla geometria reale (Alshawabkeh & Baik, 2023). Software come Agisoft Metashape gestiscono l'intero flusso SfM in un ambiente integrato, permettendo di controllare parametri come la qualità del matching, la densità della nuvola e l'accuratezza della georeferenziazione con grande flessibilità operativa. Nel rilievo del patrimonio architettonico, la fotogrammetria SfM viene impiegata principalmente per la documentazione delle superfici di facciata a dettaglio elevato e per la copertura di zone parzialmente occultate alla traiettoria laser (sporgenze di balconi, sottosquadri di cornicioni, elementi decorativi in aggetto), complementando il dato TLS con informazioni radiometriche ad alta risoluzione utili nella successiva fase di modellazione parametrica.

Il confronto tra le due tecnologie evidenzia profili di prestazione complementari. Il laser scanner garantisce una precisione geometrica intrinsecamente metrica, indipendente dalla scala e dalla distanza dell'oggetto entro il range operativo dello strumento, e una velocità di acquisizione senza equivalenti nelle tecniche image-based; la sua limitazione principale riguarda la qualità radiometrica dei dati, poiché la fotocamera integrata acquisisce le immagini dalla stessa posizione delle stazioni di scansione, che non coincide necessariamente con la posizione ottimale per la documentazione colorimetrica delle superfici (Bruno et al., 2022). La rigidità nella posizione di acquisizione comporta un'ulteriore criticità legata alla variabilità della luce naturale, in quanto i diversi orari di ripresa generano disomogeneità colorimetriche tra scansioni adiacenti che determinano salti cromatici visibili nella nuvola unificata, compromettendo sia la leggibilità delle superfici sia la qualità delle ortofoto estratte. Il problema del mixed-pixel effect sulle discontinuità geometriche e quello della disomogeneità radiometrica rappresentano dunque le due limitazioni principali del TLS che l'integrazione con la fotogrammetria è chiamata a compensare. La fotogrammetria SfM produce dati radiometricamente eccellenti perché le immagini possono essere acquisite dalla posizione più appropriata per ciascuna superficie, in condizioni di luce ottimali e con obiettivi calibrati; la sua limitazione è invece di natura geometrica, poiché la precisione assoluta del modello dipende dalla qualità e dalla distribuzione dei GCP, e le zone prive di texture (superfici lisce, uniformemente colorate, in ombra o eccessivamente illuminate) possono generare lacune nella nuvola densa difficilmente colmabili in post-processamento (Borkowski & Kubrat, 2024). Sul piano dei costi e dei tempi di acquisizione, la fotogrammetria è generalmente più accessibile per equipaggiamenti standard, ma richiede sessioni fotografiche più lunghe per garantire la copertura completa di oggetti complessi; il laser scanner, pur comportando un investimento maggiore, consente campagne più rapide grazie all'automazione del campionamento superficiale.

L'integrazione delle due sorgenti di dati in un sistema di riferimento coerente rappresenta il passaggio tecnico più delicato dell'intero workflow di acquisizione, e

costituisce da anni un tema attivo nella letteratura sul rilievo del patrimonio (Grussenmeyer et al., 2012). La strategia più diffusa prevede che la nuvola TLS, in quanto dato geometricamente più affidabile, serva da riferimento per l'orientamento del modello fotogrammetrico, e che quindi i punti di controllo necessari alla georeferenziazione del dato SfM vengono estratti dalla nuvola laser già registrata, assicurando la consistenza metrica delle due sorgenti e liberando la fotogrammetria dalla necessità di un rilievo topografico indipendente (Bruno et al., 2022). L'allineamento cloud-to-cloud tra nuvole di origine eterogenea viene poi condotto in ambienti software dedicati (tra cui il software open-source CloudCompare), sfruttando sia punti omologhi identificati manualmente che raffinamenti ICP automatizzati. Questa procedura permette di densificare selettivamente le zone del dato laser dove la risoluzione o la colorazione risultano insufficienti (spigoli, sottosquadri, superfici in forte obliquità rispetto alle stazioni), preservando la coerenza geometrica garantita dal dato TLS come riferimento (Alshawabkeh & Baik, 2023). L'esito di questo processo è una nuvola ibrida, unificata e orientata, che conserva le qualità metriche del laser scanner e le qualità colorimetriche della fotogrammetria, costituendo una base di dati di qualità elevata per le successive operazioni di analisi e segmentazione.

La segmentazione della nuvola di punti (la suddivisione del dataset in porzioni corrispondenti a componenti architettonici distinti) facilita il riconoscimento degli elementi nella successiva fase di modellazione, ma non costituisce un passaggio obbligatorio in tutti i contesti. La procedura può essere condotta in CloudCompare attraverso l'algoritmo RANSAC (Random Sample Consensus), che individua le primitive geometriche (piani, cilindri, sfere) che meglio approssimano sottoinsiemi della nuvola e consente di isolare le superfici riconducibili a componenti architettonici regolari (Musicco et al., 2021). Sul piano del degrado superficiale, le tecniche di segmentazione basate su attributi colorimetrici risultano particolarmente efficaci per distinguere materiali e mappare patologie su edifici in muratura, attraverso la combinazione di clustering gerarchico nello spazio colore HSV e segmentazione geometrica basata su RANSAC (Fig. 32).



Fig. 32 - Segmentazione di nuvola di punti effettuata tramite algoritmo Random Forest. (Musicco, Buldo, Rossi, et al., 2024)

I recenti sviluppi nella segmentazione semantica automatizzata offrono strumenti capaci di ridurre il costo operativo di questa fase in modo significativo, attraverso la combinazione di model-fitting, clustering basato su densità e analisi della curvatura locale (Buldo et al., 2025), e tecniche complementari di machine learning

supervisionato e ricostruzione mesh multi-livello per la classificazione automatica dei componenti e la loro conversione in geometrie ottimizzate per l'ambiente HBIM (Buldo, 2024; Musicco, 2022). L'adozione sistematica di questi approcci in future applicazioni del workflow su scala più ampia rappresenta una direzione coerente con il contesto operativo degli enti gestori del patrimonio ERP, dove le risorse disponibili per operazioni su dataset estesi sono spesso limitate.

La nuvola di punti registrata, pulita e orientata che emerge al termine di questo processo porta con sé la geometria dell'edificio, la sua colorazione, la struttura morfologica e le tracce del suo stato di conservazione. Trasformarla in un modello BIM parametrico, però, richiede un ulteriore passaggio di mediazione interpretativa, ovvero la scelta di cosa modellare, a quale livello di dettaglio, con quali famiglie parametriche e secondo quali criteri di semplificazione geometrica non è mai una trasposizione meccanica dal dato alla rappresentazione. L'operatore deve costantemente negoziare tra la fedeltà al dato acquisito (che registra ogni irregolarità costruttiva, ogni deformazione indotta dal tempo, ogni scostamento dalla geometria ideale) e le esigenze di parametrizzazione di un modello BIM, che lavora per elementi discreti, famiglie tipologiche e relazioni logiche tra componenti.

5.3 Scan-to-BIM

La trasformazione della nuvola di punti in un modello BIM parametrico costituisce il momento più problematico e, al tempo stesso, più ricco di implicazioni disciplinari dell'intero workflow di documentazione del patrimonio architettonico. Negli ultimi quindici anni, il processo Scan-to-BIM si è consolidato come riferimento metodologico nell'ambito dell'HBIM (Fig. 33). Le basi concettuali per l'applicazione della modellazione informativa al costruito storico prevedono l'utilizzo di librerie di

elementi parametrici, sviluppate integrando fonti documentali e rilievi metrici (Murphy et al., 2009).

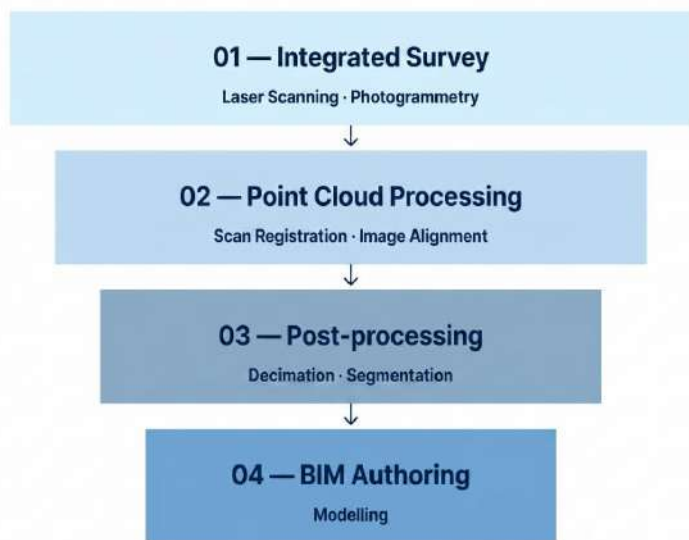


Fig. 33 - Diagramma del processo Scan-to-BIM consolidato.

Il processo si articola, nella sua struttura canonica, in tre fasi sequenziali che comprendono l'acquisizione dei dati metrici, l'elaborazione e il processamento della nuvola di punti, la modellazione parametrica e l'arricchimento semantico del modello. Ciascuna fase comporta perdite e trasformazioni dell'informazione che non sono neutrali: ogni scelta operativa lascia una traccia metodologica che deve essere dichiarata e motivata. La nuvola di punti, come discusso nel paragrafo precedente, è già disponibile nella sua forma integrata e georeferenziata; il passaggio che qui si descrive trasforma il dato acquisito in un oggetto informativo strutturato attraverso un atto interpretativo, in cui il giudizio del modellatore plasma il risultato finale in modo determinante. La fase di modellazione rimane la più dispendiosa in termini di tempo e la meno standardizzabile dell'intero workflow, indipendentemente dalla qualità dei dati acquisiti, poiché la complessità morfologica del costruito storico e la necessità di decisioni interpretative elemento per elemento rendono questa fase strutturalmente resistente all'automatizzazione completa (Liu et al., 2023).

La questione teorica centrale che il passaggio nuvola-modello pone è quella della fedeltà: in quale misura il modello parametrico può e deve riprodurre la complessità geometrica del costruito reale? La nuvola di punti descrive la superficie dell'edificio con una continuità e una ricchezza di dettaglio nell'ordine di 100.000 punti per metro quadrato nelle acquisizioni ad alta densità (Escudero, 2023), mentre nel modello BIM risultante la densità si riduce in molti casi a meno di dieci punti per metro quadrato. Il modello parametrico si fonda sulla logica della tipizzazione: muri, solai, scale, colonne sono oggetti-tipo con parametri variabili, ma necessariamente semplificati rispetto alla realtà. La scelta del LOD (Level of Development), ovvero del livello di sviluppo geometrico secondo la terminologia degli standard UNI 11337-4:2017⁴⁴, determina quali informazioni vengono preservate nel modello, quali vengono semplificate e quali vengono perse: si tratta di una decisione metodologica, non soltanto tecnica (López et al., 2017). In questa direzione, i protocolli GOG (Grade of Generation) definiscono gradi crescenti di generazione geometrica per il modello HBIM, dai livelli più semplificati fondati su estrusione e sottrazione (GOG 1-8) fino ai modelli basati su superfici NURBS (GOG 9 e 10), capaci di preservare la ricchezza morfologica del costruito senza le approssimazioni inevitabili della geometria parametrica standard (Banfi, 2017). La selezione del livello di generazione geometrica dipende dagli utilizzi previsti per il modello informativo. L'adozione di un LOD elevato risulta appropriata quando le specifiche finalità richiedono un elevato grado di precisione, come nei casi di rilievo finalizzato al restauro o alla verifica strutturale. Di contro, obiettivi operativi legati alla gestione patrimoniale o al facility management possono essere perseguiti in modo efficace ricorrendo a livelli di sviluppo inferiori (Brumana et al., 2018). Per il patrimonio

⁴⁴ La norma UNI 11337-4:2017 *Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti* appartiene alla serie UNI 11337 *Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni*, il quadro normativo nazionale italiano per l'applicazione del BIM, sviluppato dall'UNI a partire dal 2009 e articolato in più parti (dalla terminologia ai flussi informativi, dalla classificazione degli oggetti ai requisiti professionali). La Parte 4, nello specifico, definisce il sistema di classificazione dei livelli di sviluppo degli oggetti digitali attraverso una scala progressiva di lettere (LOD A, B, C, D, E, F, G), dalla configurazione simbolica alla rappresentazione aggiornata dello stato di fatto. Questo sistema, concepito per un'applicazione uniforme all'intero modello, è stato successivamente integrato dall'approccio della norma UNI EN 17412-1:2021, che sostituisce la scala predefinita con una dichiarazione puntuale dei requisiti informativi (LOIN) calibrata sullo scopo specifico della commessa.

architettonico del dopoguerra, le librerie parametriche standard risultano quasi sempre insufficienti, poiché le soluzioni costruttive del periodo non trovano corrispondenza nelle famiglie native di Revit (López et al., 2017). La letteratura identifica inoltre il rischio di overmodeling, ovvero l'adozione di un livello di dettaglio superiore a quanto richiesto dalle finalità del progetto. Tale approccio appesantisce la gestione dei file e ostacola l'interoperabilità, rendendo difficoltoso l'aggiornamento del modello nel tempo (Borkowski & Kubrat, 2024). La tensione tra completezza della rappresentazione e sostenibilità operativa del modello è stata identificata come uno dei nodi critici irrisolti del Scan-to-BIM per l'esistente, aggravata dalla mancanza di standard condivisi sulla granularità attesa del modello (Volk et al., 2014).

La modellazione in Revit a partire dalla nuvola di punti importata tramite Autodesk ReCap® segue logiche operative diverse a seconda della natura degli elementi da rappresentare. Per gli elementi a geometria semplice e ricorrente (muri portanti, solai, vani scala, coperture piane o a falde regolari) si ricorre alle famiglie di sistema native, che consentono una modellazione rapida e coerente con i vincoli topologici e strutturali dell'edificio. Quando la geometria è più complessa, invece, è necessario costruire famiglie caricabili ad hoc con profili sagomati, parametri adattivi o nesting gerarchico. La strategia di distinzione tra le due tipologie, in funzione della complessità geometrica e della singolarità dell'elemento, è stata formalizzata come criterio metodologico esplicito nella letteratura sulla modellazione HBIM in ambiente Revit (Potestà, 2020). L'oggetto BIM deve superare la mera sovrapposizione geometrica ai punti della nuvola per riconoscerne e codificarne la logica costruttiva e morfologica. Tale processo segna il passaggio dalla gestione operativa del dato rilevato alla sua effettiva interpretazione semantica (Chiabrando et al., 2016).

La questione dell'automazione rappresenta uno dei fronti più attivi nella ricerca contemporanea sul Scan-to-BIM. L'ipotesi di fondo è che algoritmi di segmentazione semantica, riconoscimento di primitive geometriche e ricostruzione parametrica possano ridurre drasticamente l'intervento manuale dell'operatore. I risultati conseguiti su geometrie semplici e regolari sono promettenti. Un metodo bottom-up non

supervisionato per la ricostruzione automatica della geometria muraria in ambiente Revit è stato sviluppato a partire da una pipeline che procede per segmentazione della nuvola in primitive planari, classificazione tramite Random Forest pre-addestrate, clustering delle osservazioni di parete e infine estrazione parametrica della geometria con produzione diretta di oggetti nativi Revit attraverso le API di Rhinocommon e Rhino.Inside, producendo muri LOD200 che raggiungono un'accuratezza comparabile a quella della modellazione manuale esperta su geometrie rettilinee, curvilinee e poligonali (Bassier et al., 2019). Un approccio alternativo converte l'intera nuvola di punti in geometrie BIM attraverso Revit e il linguaggio visuale Dynamo, rappresentando ciascun punto come una geometria sferica con coordinate e attributi RGB originali e attribuendo a ogni punto i parametri di classificazione generati in CloudCompare, con possibilità di integrazione in sistemi GIS tramite esportazione IFC in ArcGIS Pro; il limite principale di questa soluzione è la gestione delle risorse computazionali, con instabilità del software già al di sopra di centomila punti simultanei (Escudero, 2023). Un percorso ulteriore combina Rhinoceros, Grasshopper e ArchiCAD per convertire dati TLS e SfM in mesh tridimensionali texturizzate come oggetti BIM: questo approccio preserva meglio la complessità geometrica dell'acquisizione, a costo di una riduzione della strutturazione parametrica e delle potenzialità di gestione informativa (Andriasyan et al., 2020). La ricostruzione tramite mesh poligonali a partire da nuvole segmentate rappresenta un percorso parallelo (Fig. 34). Un confronto sistematico tra Alpha Shape, Ball-Pivoting e Poisson Surface Reconstruction ha evidenziato che l'approccio Poisson garantisce la maggiore coerenza dimensionale ai livelli di dettaglio più elevati, con deviazioni standard nell'ordine del millimetro, e che le mesh risultanti possono essere ottimizzate tramite script VPL in Dynamo e integrate nel modello HBIM come oggetti DirectShape (Musicco et al., 2024).

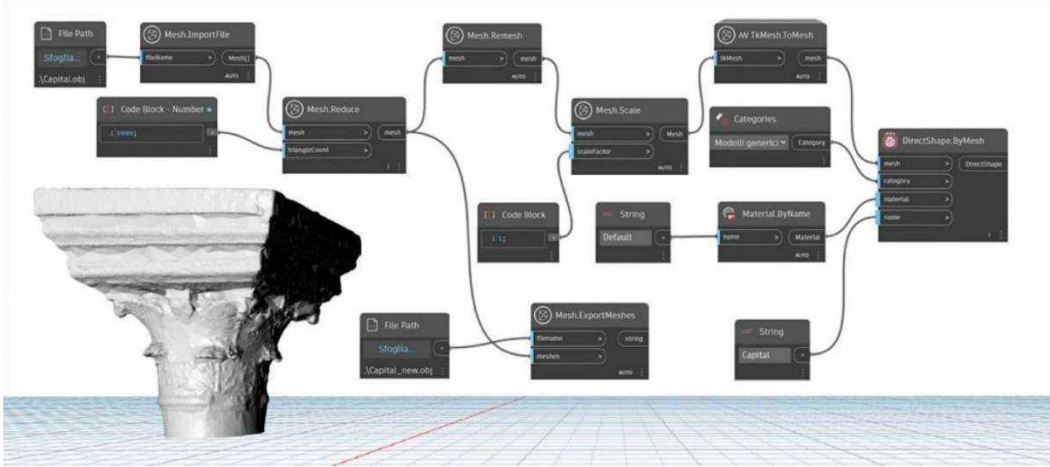


Fig. 34 - Applicazione di script in Dynamo per la riduzione della mesh tridimensionale. (Musicoo, Buldo, Rossi, et al., 2024)

L'applicazione di algoritmi di clustering (DBSCAN e K-means) all'estrazione automatica di planimetrie ha prodotto risultati quantitativamente rilevanti (Fig. 35). il metodo DBSCAN, calibrato con valori di epsilon compresi tra 0,3 e 0,5 m, ha raggiunto un errore medio assoluto di 0,0091, riducendo il tempo di generazione di circa 6.400 segmenti planimetrici da circa quattro ore e mezza a meno di cinquanta secondi (Escudero et al., 2024).

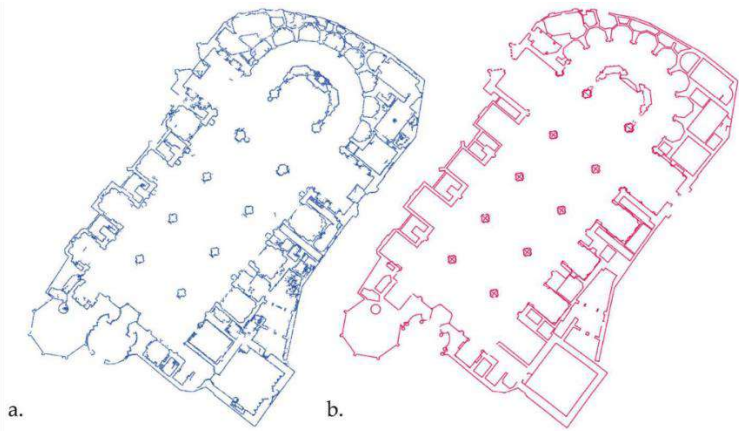


Fig. 35 - Estrazione automatica di profili planimetrici da nuvola di punti mediante algoritmo DBSCAN. (Escudero et al., 2024)

La presenza di rumore nella nuvola, l'irregolarità delle geometrie storiche e la densità variabile dei punti costituiscono tuttavia limitazioni strutturali che gli stessi autori riconoscono esplicitamente. La validità degli approcci automatizzati diminuisce all'aumentare della complessità morfologica dell'edificio. Le architetture del patrimonio esistente presentano infatti caratteristiche che sfuggono ai modelli probabilistici, generalmente ottimizzati per geometrie ortogonali e standardizzate. Di conseguenza, l'intervento manuale dell'operatore si conferma indispensabile per garantire una corretta interpretazione semantica degli elementi (Rocha et al., 2020). L'automazione può accelerare le operazioni di pre-processing e la generazione di geometrie di base, ma il giudizio disciplinare che trasforma un insieme di punti in un modello dotato di significato rimane, allo stato attuale della ricerca, non delegabile.

È in questo contesto che emerge la specificità del caso dell'edilizia residenziale pubblica occupata. Lo Scan-to-BIM, nelle sue procedure standard, presuppone un accesso fisico completo all'edificio da rilevare, per generare una nuvola di punti in grado di restituire l'intero manufatto, ogni spazio interno deve infatti risultare accessibile alla strumentazione di acquisizione. Questa condizione, realizzabile negli edifici storici disabitati, nei musei o negli edifici pubblici istituzionali, non è sempre praticabile nell'edilizia residenziale pubblica occupata da inquilini, dove la privacy delle persone residenti e complicazioni sociali costituiscono un vincolo. Il risultato consiste in una nuvola di punti incompleta. Le facciate, le corti, i corpi scala e le aree comuni vengono acquisiti con precisione, mentre le unità abitative generano vuoti geometrici corrispondenti alla maggior parte della superficie coperta dell'edificio. La risoluzione di questi vuoti richiede fonti alternative di dati affidabili, poiché l'impiego di algoritmi di completamento automatico produrrebbe geometrie prive di riscontro empirico. L'integrazione tra dati d'archivio e rilievi parziali costituisce infatti una delle principali criticità nella digitalizzazione del patrimonio ERP europeo, configurandosi come una competenza fondamentale per gli operatori del settore (Castellano-Román et al., 2022).

La risposta operativa a questo problema è la modalità ibrida di modellazione, che distingue esplicitamente tra due fonti di natura e affidabilità diverse, integrandole nel

medesimo modello BIM senza confonderle. Le parti accessibili al rilievo diretto vengono modellate in modalità *reality-based*; quindi, la geometria degli oggetti BIM è ricavata direttamente dalla nuvola di punti, con piena tracciabilità della fonte. Le parti non accessibili (la distribuzione planimetrica degli appartamenti tipo, la geometria dei vani interni, la disposizione delle pareti di compartimentazione) vengono ricostruite in modalità *model-based* a partire dai disegni di progetto originali conservati negli archivi degli enti gestori, ovvero planimetrie, sezioni, prospetti e tavole costruttive che documentano l'intento progettuale e, con i margini di variazione propri della produzione edilizia del dopoguerra, la configurazione realizzata. La coerenza dimensionale tra le due componenti è garantita dal perimetro esterno dell'edificio, rilevato dalla scansione laser e utilizzato come sistema di riferimento vincolante per la posizione delle partizioni interne ricostruite da archivio. Qualora un disegno di progetto indichi dimensioni incompatibili con la facciata già modellata dalla nuvola, la configurazione rilevata prevale su quella progettata e la discrepanza viene registrata come elemento di incertezza documentato nel modello. Per rispondere al vincolo di inaccessibilità delle unità abitative occupate, il modello ibrido adotta una soluzione basata sulla trasparenza metodologica, distinguendo chiaramente le porzioni rilevate da quelle ricostruite e attribuendo a ciascuna un grado di affidabilità verificabile.

La dichiarazione e la misurazione di questa affidabilità costituisce il momento conclusivo del processo Scan-to-BIM. Per le porzioni modellate in modalità *reality-based*, la qualità geometrica risulta verificabile attraverso l'analisi di deviazione tra la nuvola di punti e le superfici del modello BIM. L'impiego di strumenti dedicati quali Autodesk Point Layout® consente di eseguire tale confronto, generando mappe cromatiche che illustrano la distribuzione spaziale degli scostamenti punto per punto. La valutazione dell'accuratezza dipende dalla precisione dello strumento di acquisizione e dall'interpretazione che l'operatore fa della nuvola nella fase di modellazione (Bonduel et al., 2017). Il concetto di Level of Accuracy (LoA), formalizzato in un quadro di riferimento che distingue livelli basso, medio e alto in funzione dei valori di deviazione standard misurati (Maiezza, 2019; Maiezza & Tata, 2021), fornisce la struttura

classificatoria per questa dichiarazione: un'accuratezza alta corrisponde a deviazioni inferiori a 20 mm rispetto alla nuvola per modelli ad alto livello di sviluppo geometrico. Il rapporto tra livello di sviluppo geometrico e livello di accuratezza non implica una proporzionalità diretta. Un modello semplificato può infatti raggiungere un elevato valore di LoA in presenza di elementi dalla morfologia poco articolata. Di contro, un modello caratterizzato da un alto sviluppo geometrico rischia di risultare inaccurato qualora la fase di restituzione manchi del necessario rigore (Brusaporci et al., 2023). La componente archivio-based del modello ibrido ha invece un'incertezza di tipo qualitativo, che dipende dalla scala dei disegni originali, dalla qualità dei supporti, dal grado di corrispondenza tra progetto e costruzione osservato nelle porzioni accessibili e dal giudizio critico esercitato nella lettura dei documenti. Il concetto di Level of Reliability (Bianchini & Nicastro, 2018) si differenzia dal LoA poiché supera la mera valutazione dell'accuratezza geometrica per attestare l'attendibilità complessiva dell'informazione contenuta nel modello. Questo indicatore valuta, infatti, la provenienza dei dati, la loro verificabilità e i limiti di utilizzo previsti. Questa distinzione risulta particolarmente rilevante all'interno del modello ibrido, dove l'affidabilità delle componenti muta in relazione alle fonti impiegate.

Il modello BIM, parzialmente rilevato e parzialmente ricostruito con gradi di affidabilità differenziati e dichiarati, è uno strumento di conoscenza in continua evoluzione. Le sue potenzialità operative si concretizzano in molteplici ambiti di applicazione. Tra questi figurano il supporto decisionale per le strategie di manutenzione e riqualificazione degli enti gestori, lo studio delle trasformazioni del patrimonio ERP nel tempo e l'integrazione con i sistemi GIS per lo sviluppo di analisi a scala territoriale. La natura di questo oggetto è quella di un artefatto interpretativo che sintetizza due flussi informativi (il dato acquisito e il documento d'archivio) in una struttura parametrica coerente, con livelli di affidabilità esplicitamente dichiarati e metodologicamente motivati.

5.4 Gli archivi e le tecniche di conservazione e digitalizzazione degli elaborati

Il patrimonio documentale conservato negli archivi degli enti gestori dell'ERP offre un contributo unico al processo di documentazione, garantendo una profondità di analisi che completa efficacemente le informazioni raccolte direttamente sul campo. La documentazione conservata negli archivi degli enti gestori dell'ERP rappresenta una risorsa informativa peculiare, in quanto permette di recuperare aspetti ormai invisibili quali l'intenzione progettuale originaria, l'articolazione interna degli alloggi e le variazioni di cantiere mai ufficializzate. A differenza dei dati del rilievo diretto, verificabili attraverso il confronto tra la realtà fisica e la nuvola di punti, queste fonti restituiscono informazioni precluse all'indagine strumentale che risultano fondamentali per ricostruire la stratigrafia costruttiva e l'evoluzione del fabbricato. Per gli edifici residenziali occupati in cui l'accesso agli appartamenti è limitato per varie motivazioni, questa documentazione costituisce spesso l'unica fonte capace di restituire informazioni geometriche verificabili sugli spazi interni che compongono le zone d'ombra del modello. La componente "Archive" del workflow Archive+Scan-to-BIM poggia interamente su questa premessa, e il rigore metodologico con cui essa viene trattata deve essere equivalente a quello che governa la componente "Scan". Trattare il documento d'archivio come un dato di seconda classe rispetto alla nuvola di punti significherebbe compromettere la coerenza dell'intero modello ibrido.

Il disegno tecnico storico porta con sé una forma di conoscenza che nessuno strumento di rilievo attivo è in grado di produrre autonomamente. Esso restituisce l'organismo edilizio nel momento in cui era ancora in costruzione, fissa le scelte distributive prima che l'edificio venisse abitato e trasformato nel tempo dall'uso, e incorpora la grammatica formale e costruttiva che sottende la forma realizzata (Fig. 36). La relazione tra il disegno e l'edificio ha natura genetica, nel senso che il disegno custodisce il codice che ha generato la forma costruita (Conte & Rossi, 2019).

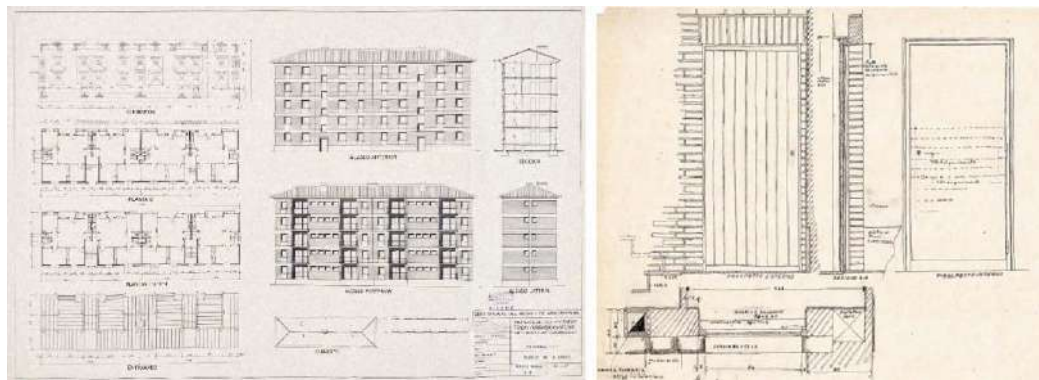


Fig. 36 - Disegni d'archivio digitalizzati. (Archivio Municipal Zaragoza, A.R.C.A. Capitanata)

Questo aspetto assume un valore operativo preciso nella modellazione BIM, poiché i disegni di progetto rappresentano la fonte più diretta della logica con cui l'edificio è stato concepito e che il modello informativo punta a contenere. La stessa metodologia HBIM si è sviluppata a partire dall'utilizzo di fonti documentali come base primaria della modellazione, ricorrendo a trattati di architettura e pattern books per costruire librerie parametriche di elementi architettonici prima ancora che a dati di rilievo diretto (Murphy et al., 2013). Questa impostazione, in cui la documentazione costituisce il fondamento della modellazione piuttosto che un suo supporto secondario, è quella che il workflow Archive+Scan-to-BIM eredita e trasferisce al caso degli edifici ERP con accessibilità limitata. Il parallelo con l'archeologia, già suggerito nell'impostazione generale di questa ricerca, trova qui un momento di approfondimento necessario, poiché proprio come lo scavo rivela strati informativi preclusi all'osservazione superficiale, i disegni di cantiere restituiscono dati sull'organismo costruito che integrano la percezione delle superfici esterne offerta dal laser scanner. Il workflow Archive+Scan-to-BIM trasferisce al patrimonio ERP del dopoguerra l'analogia consolidata in letteratura per i manufatti storici o perduti (Apollonio et al., 2017; Gherardini & Sirocchi, 2022), trattando gli edifici esistenti come siti parzialmente sepolti a causa della loro limitata accessibilità. In questo scenario, la ricerca si sposta dalla superficie visibile agli strati informativi celati negli archivi, permettendo di ricostruire l'organismo architettonico con una profondità che il solo rilievo strumentale non potrebbe garantire.

Le specificità degli archivi degli enti gestori ERP italiani rendono la ricerca documentale un'operazione tutt'altro che routinaria. La frammentazione istituzionale costituisce il primo ostacolo strutturale. La successione degli enti gestori, da IPES a IACP ad ARCA, passando per denominazioni intermedie legate a riforme regionali succedutesi nel tempo, ha determinato trasferimenti di documentazione non sempre sistematici, con perdite, dispersioni e sovrapposizioni di serie archivistiche difficili da ricostruire a posteriori. A questa frammentazione si aggiunge il deterioramento fisico dei supporti. I fondi documentali prodotti tra gli anni Cinquanta e Settanta del Novecento sono prevalentemente costituiti da disegni su lucido, soggetti a ingiallimento, fragilità e sbiadimento progressivo, da copie eliografiche che perdono leggibilità per effetto dell'umidità e dell'esposizione alla luce, e da riproduzioni su carta da lucido che hanno subito deformazioni dimensionali nel tempo, con conseguenze dirette sull'attendibilità delle scale di rappresentazione. La terza criticità risiede nella mancanza di un catalogo digitale ordinato, in quanto l'assenza di criteri di archiviazione comuni impedisce di interrogare i fondi per tipologia edilizia, progettista o cronologia degli interventi. Lo scenario descritto accomuna la Puglia a numerose realtà europee, in quanto la standardizzazione dell'edilizia residenziale pubblica del dopoguerra ha prodotto una mole di documenti che solo raramente ha beneficiato di una gestione archivistica rigorosa, confermando come le difficoltà italiane siano ampiamente condivise a livello internazionale (Castellano-Román et al., 2022). La disomogeneità dei formati complica ulteriormente il quadro, in quanto all'interno di un singolo fondo convivono spesso disegni a china su lucido di grandi dimensioni, eliografie A1, copie in formato ridotto e (per le pratiche più recenti) file CAD in formati ormai obsoleti o privi della versione nativa modificabile.

In questo scenario, la ricerca negli archivi richiede un approccio metodologico rigoroso che parta dall'identificazione dei diversi soggetti conservatori, poiché per l'edilizia residenziale pubblica italiana degli anni Cinquanta e Sessanta le fonti documentali risultano spesso frammentate tra l'ente gestore attuale, i comuni e i fondi dei progettisti. A questi si aggiungono i documenti depositati presso l'Archivio Centrale dello Stato o

le sedi regionali competenti, nelle quali le pratiche INA-Casa vengono conservate come testimonianza dell'attività degli organi centrali di gestione del piano. Una volta individuate le sedi potenziali, la ricerca segue una selezione documentale definita in base agli scopi del modello BIM, raccogliendo elaborati quali planimetrie di piano, sezioni e prospetti, insieme a dettagli costruttivi, relazioni tecniche e fotografie di cantiere. Questa lista funziona da griglia di riferimento attraverso cui misurare la completezza della documentazione disponibile e identificare le lacune da gestire nel modello con dichiarazione esplicita del livello di affidabilità. La loro assenza va registrata come dato metodologico, non come mancanza operativa da colmare con stime arbitrarie. La strutturazione dell'archivio documentale come fase fondativa del processo HBIM richiede che l'organizzazione dei file sia progettata in coerenza con la struttura semantica del modello a cui verrà collegata (Conte, 2020). La gestione di fonti di natura diversa (disegni, fotografie, testi, rilievi) all'interno di un framework BIM unitario è un problema metodologico affrontato nei lavori fondativi sull'Heritage BIM, che indicano nell'eterogeneità una condizione strutturale da governare attraverso protocolli espliciti di collegamento (Fai et al., 2011).

La digitalizzazione del documento cartaceo è il primo atto di trasformazione della fonte in dato operabile (Fig. 37), ma anche quello in cui si compiono le prime scelte interpretative che condizioneranno l'intera procedura successiva. Per i documenti tecnici destinati alla modellazione architettonica, la risoluzione minima adeguata è 300 dpi, specialmente per i particolari costruttivi dove il dettaglio grafico è essenziale alla comprensione tecnica (nodi strutturali, soglie, serramenti, annotazioni di quota scritte a mano in dimensioni ridotte). Per i documenti fragili (lucidi ingialliti, eliografie deteriorate, fogli con lacerazioni parziali) che non possono essere trasportati o sottoposti a scansione piana senza rischio di danno, si ricorre alla fotografia digitale ad alta risoluzione con luce diffusa e senza illuminazione direzionale, utilizzando cavalletto e livella per garantire la perpendicolarità dell'asse ottico rispetto al piano del documento (Fig. 38).

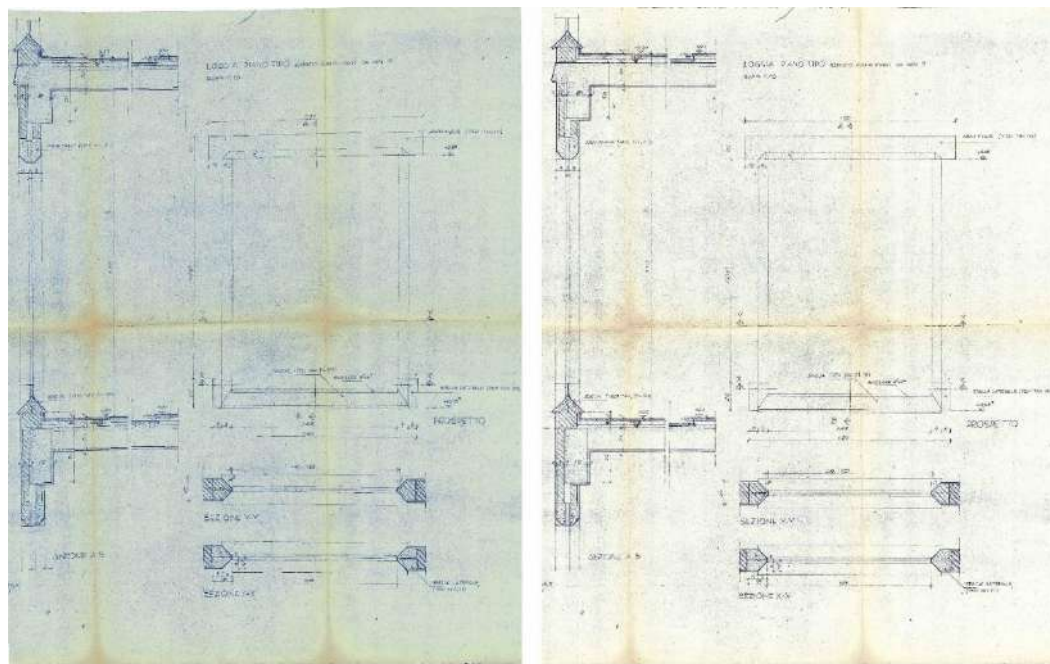


Fig. 37 - Disegni d'archivio prima e dopo le operazioni di post-produzione.



Fig. 38 - Operazioni di digitalizzazione di documenti d'archivio attraverso l'uso di stativo e macchina fotografica.

Nei casi in cui i tracciati siano parzialmente sbiaditi, l'acquisizione multispettrale permette di recuperare informazioni grafiche non leggibili in luce visibile, sfruttando la risposta differenziale di inchiostri e matite a diversi intervalli dello spettro.

La digitalizzazione rappresenta solo la fase iniziale di un percorso operativo articolato, poiché il documento acquisito come immagine raster deve essere sottoposto a una valutazione critica prima del suo inserimento nel processo di modellazione, distinguendo l'informazione storica dalla misurazione diretta della realtà fisica. Il disegno tecnico storico incorpora convenzioni di rappresentazione proprie del periodo e dello studio professionale che l'ha prodotto, scale nominali che non corrispondono necessariamente alle dimensioni reali a causa di deformazioni del supporto, tolleranze di esecuzione proprie delle pratiche costruttive dell'epoca, e margini di variazione tra il progetto disegnato e quanto effettivamente realizzato in cantiere. La distinzione tra il disegno come documento storico e il disegno come fonte geometrica richiede un atteggiamento filologico prima ancora che tecnico, trattando ogni tavola come un testo grafico da interpretare (De Luca, 2011). Un lucido INA-Casa in scala nominale 1:100, conservato per decenni in condizioni non controllate, presenta un'accuratezza geometrica incomparabilmente inferiore a quella di un rilievo metrico contemporaneo, e questa differenza deve essere riconosciuta, analizzata nelle sue implicazioni operative e propagata in modo dichiarato nella costruzione del modello (Apollonio, 2016). L'analisi critica del documento deve precedere la sua traduzione in geometria. Occorre valutare la coerenza interna tra elaborati diversi, identificare le discrepanze tra tavole di progetto e varianti di cantiere quando entrambe sono disponibili, e ricostruire la gerarchia di attendibilità tra fonti diverse riferibili al medesimo edificio. Quando due tavole contraddicono la stessa dimensione, la scelta di quale privilegiare dipende dalla data di produzione, dal tipo di elaborato, dalla firma che lo autentica e dal confronto con la misura perimetrale rilevata all'esterno con il laser scanner.

La vettorializzazione è il processo attraverso cui il documento raster digitalizzato viene trasformato in geometria operabile per la modellazione BIM. Per i documenti tecnici d'archivio, la vettorializzazione automatica produce risultati inaffidabili in presenza di

deterioramenti del supporto, tracciati sovrapposti o inchiostri sbiaditi che il riconoscimento automatico interpreta come rumore. Il protocollo operativo prevede il tracciamento manuale in ambiente AutoCAD® di ogni componente geometrico rilevante, sviluppando il disegno dalle quote nette degli ambienti e dagli assi delle murature con i relativi spessori fino alla definizione delle luci delle aperture, della geometria dei vani scala e delle dotazioni impiantistiche rintracciabili nei documenti. La calibrazione del disegno digitalizzato (l'operazione attraverso cui si assegna al file raster una scala corretta prima del tracciamento) è un passaggio critico che tiene conto delle possibili deformazioni del supporto. Applicare la scala nominale indicata in cartiglio è insufficiente; occorre verificare la coerenza dimensionale su elementi di riferimento noti, come lo spessore dei muri portanti o la larghezza di un vano di cui si dispone di una misura indipendente.

L'attività di tracciamento manuale si configura come un processo di analisi attiva, in cui la scelta della quota da privilegiare tra il dato numerico, la deduzione grafica o la variante di cantiere costituisce una decisione interpretativa che richiede di essere documentata e motivata all'interno del percorso operativo. La trasparenza delle scelte interpretative è un requisito riconosciuto nella letteratura sulla ricostruzione digitale da fonti grafiche. Le ipotesi assunte devono essere documentate e verificabili, affinché il modello possa essere criticato e aggiornato da ricercatori successivi (Gherardini & Sirocchi, 2022; Gabellone, 2012). La trasparenza delle scelte ha una valenza scientifica sostanziale: un modello che non dichiara le proprie assunzioni non può essere falsificato né considerato uno strumento affidabile. Il file DWG risultante dal tracciamento viene quindi importato in Autodesk Revit come underlay di riferimento per la costruzione della componente archivio-based del modello ibrido. L'importazione non conclude il processo di verifica. La coerenza dimensionale tra la geometria ricostruita da archivio e quella misurata dalla scansione laser va controllata sistematicamente sul perimetro dell'edificio, che funziona da confine fisso a cui ancorare la planimetria ricostruita. Eventuali discrepanze vanno documentate e risolte con una decisione motivata, preferendo in linea generale la misura rilevata per il perimetro esterno e il

disegno d'archivio per la distribuzione interna, salvo casi in cui l'evidenza documentale indichi diversamente. L'integrazione sistematica tra fonti 2D e 3D evidenzia come il confronto continuo tra i dati faccia emergere spesso incongruenze sfuggite a un primo esame (Gherardini & Sirocchi, 2022). Questo approccio assume un valore fondamentale quando i documenti d'archivio rappresentano l'unica traccia informativa per porzioni consistenti dell'edificio, trasformando la validazione dei dati in un'attività di indagine necessaria per la qualità del modello finale.

Il dato archivistico, una volta introdotto nel modello, deve essere accompagnato da una dichiarazione esplicita del suo livello di affidabilità geometrica, coerente con il framework già adottato per la componente reality-based. La gerarchia di affidabilità della componente archive-based riflette la qualità della catena documentale su cui si fonda. Il livello alto corrisponde alla disponibilità di disegni esecutivi di dettaglio verificati da variante di cantiere firmata; il livello medio è assegnato quando la fonte è una planimetria di massima priva di aggiornamenti documentati; il livello basso si applica quando la ricostruzione è ottenuta per analogia tipologica con altri edifici dello stesso piano casa, in assenza di documentazione specifica per l'edificio oggetto di modellazione. Questa struttura si armonizza con i framework di affidabilità proposti in letteratura per il patrimonio costruito (Bianchini & Nicastro, 2018; Maiezza & Tata, 2021), già applicati alla componente reality-based. La loro estensione alla componente archive-based è la conseguenza logica di un approccio che considera l'incertezza come variabile di progetto trasversale a entrambe le componenti del modello. La visualizzazione dell'incertezza nel modello è un tema affrontato in letteratura attraverso sistemi di codifica cromatica e semantica che rendono visibile il grado di ipoteticità di ciascuna parte della ricostruzione (Apollonio et al., 2013; Remondino & Stylianidis, 2016). Anche per la componente archive-based, la dichiarazione di affidabilità deve essere leggibile direttamente nella rappresentazione grafica, consentendo a qualsiasi utente di distinguere le parti rilevate da quelle ricostruite.

6. L'ESPERIENZA CON A.R.C.A. CAPITANATA

6.1 L'Ente e le sue attività

L'Agenzia Regionale per la Casa e l'Abitare della provincia di Foggia, denominata A.R.C.A. Capitanata, è un ente pubblico non economico istituito dalla Regione Puglia con la Legge Regionale 20 maggio 2014, n. 22⁴⁵ in sostituzione dell'Istituto Autonomo per le Case Popolari (I.A.C.P.) di Foggia. La riforma ha ridisegnato l'intero sistema regionale dell'edilizia residenziale pubblica, trasformando i cinque ex I.A.C.P. provinciali in agenzie dotate di personalità giuridica di diritto pubblico e autonomia organizzativa, patrimoniale, finanziaria, contabile e tecnica, configurate come enti strumentali della Regione Puglia (L.R. 22/2014, art. 6). La transizione istituzionale ha comportato la successione di A.R.C.A. in tutti i rapporti giuridici attivi e passivi del precedente I.A.C.P., inclusa la titolarità del patrimonio immobiliare e della relativa documentazione tecnica e amministrativa. L'I.A.C.P. di Foggia, istituito nel 1928, aveva operato per quasi novanta anni come ente gestore del patrimonio abitativo pubblico della Capitanata, svolgendo un ruolo determinante nella costruzione e amministrazione dei quartieri residenziali del secondo dopoguerra. L'Istituto foggiano fu tra i soggetti attuatori del Piano INA-Casa nella provincia, gestendo i cantieri e le assegnazioni degli alloggi realizzati nell'ambito del primo e del secondo settennio (Maddaluno, 2007).

La sede legale e operativa di A.R.C.A. Capitanata è situata in Via Romolo Caggese 2, a Foggia. L'ente è attualmente retto da un Amministratore Unico, il dott. Giuseppe Liscio, nominato con Deliberazione di Giunta Regionale e successivo Decreto del Presidente

⁴⁵ La norma *"Riordino delle funzioni amministrative in materia di edilizia residenziale pubblica e sociale e riforma degli enti regionali operanti nel settore"* ha riformato la gestione dell'edilizia pubblica in Puglia disponendo la trasformazione dei precedenti IACP nelle nuove ARCA, con lo scopo di razionalizzare l'amministrazione e la cura del patrimonio abitativo regionale.

della Giunta Regionale n. 1936 del 22 dicembre 2022. Questa forma di governance monocratica, prevista dall'art. 8 della L.R. 22/2014, riflette una scelta di semplificazione gestionale adottata dalla Regione Puglia per le proprie agenzie abitative. A.R.C.A. Capitanata è associata a Federcasa, la federazione nazionale che riunisce oltre 80 enti gestori di edilizia residenziale pubblica e sociale in Italia e che, attraverso la partecipazione a Housing Europe (già CECODHAS⁴⁶), garantisce un collegamento con le reti europee dell'abitare sociale.

Le competenze istituzionali di A.R.C.A. sono definite dall'art. 7 della L.R. 22/2014⁴⁷, che assegna alle agenzie provinciali quattro ambiti operativi, tra cui la gestione e la manutenzione del patrimonio di edilizia residenziale pubblica di proprietà; la gestione degli alloggi di proprietà degli enti locali sulla base di apposite convenzioni; la realizzazione di programmi costruttivi di edilizia residenziale pubblica e delle relative opere infrastrutturali; la promozione e l'attuazione di programmi di edilizia sociale e di rigenerazione urbana. Queste funzioni collocano A.R.C.A. al centro di un sistema complesso che integra la conservazione del patrimonio esistente con la programmazione di nuovi interventi, in un contesto normativo che attribuisce crescente rilievo alla rigenerazione dell'edilizia pubblica postbellica.

L'organizzazione interna dell'ente si articola in tre aree operative coordinate dalla Direzione Generale. L'Area Patrimonio comprende i servizi di gestione dell'utenza, autogestione condominiale, valorizzazione immobiliare e sistemi informatici. L'Area Amministrativa gestisce gli affari generali e il settore finanziario. L'Area Tecnica, alla quale afferiscono le attività più direttamente connesse alla gestione fisica del

⁴⁶ Acronimo di *Comité Européen de Coordination de l'Habitat Social*. L'organizzazione, fondata nel 1988 e oggi rinominata Housing Europe, è la federazione europea che rappresenta gli enti e le cooperative operanti nel settore dell'edilizia abitativa pubblica e sociale.

⁴⁷ L'art. 7 della Legge Regionale n. 22 del 20 maggio 2014 elenca nel dettaglio le funzioni attribuite alle Agenzie Regionali per la Casa e l'Abitare, specificando i loro compiti in materia di gestione amministrativa, contabile e tecnica del patrimonio di edilizia residenziale pubblica e sociale, nonché la possibilità di fornire servizi ai Comuni.

patrimonio, è suddivisa nei servizi di progettazione, appalti e contratti, costruzioni e manutenzioni.

Il portafoglio immobiliare gestito da A.R.C.A. Capitanata comprende 11.344 alloggi ad uso abitativo, distribuiti su oltre 60 comuni della provincia di Foggia e 3 comuni della provincia di Barletta-Andria-Trani (A.R.C.A. Capitanata, 2025). La distribuzione territoriale presenta forti concentrazioni nei centri urbani maggiori: il comune di Foggia da solo ospita 4.959 alloggi (Fig. 39), pari al 43,7% del totale; seguono San Severo con 1.158 unità, Cerignola con 1.036, Manfredonia con 662, Lucera con 327, Apricena con 298, Orta Nova con 251 e Trinitapoli con 241.

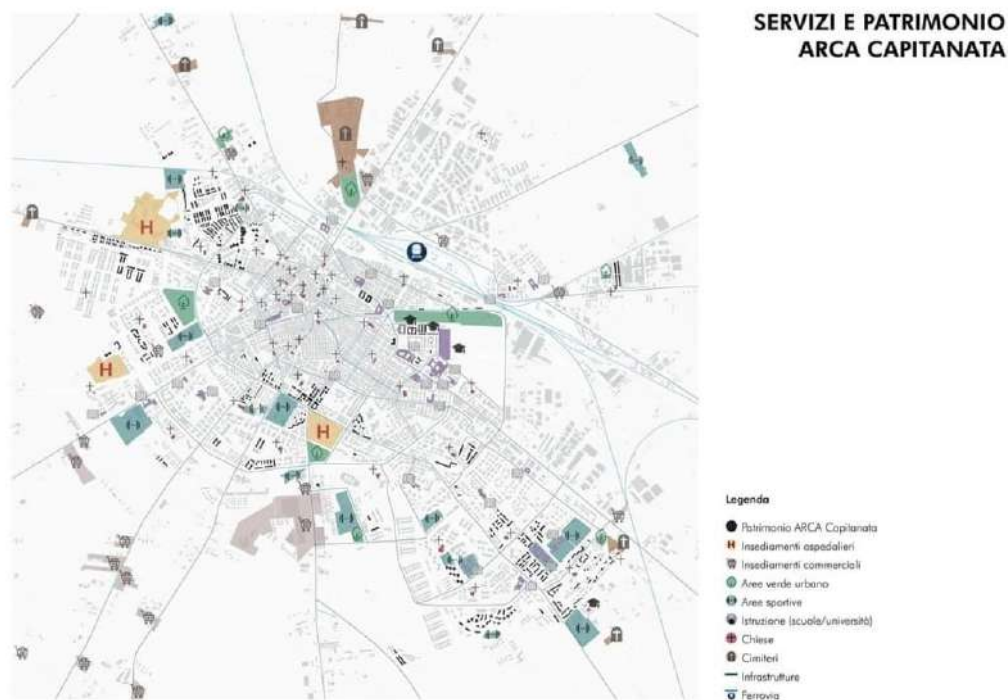


Fig. 39 - Distribuzione territoriale del patrimonio abitativo gestito da A.R.C.A. Capitanata. Adattato da (Anaclerio, Ariola, Gabrieli, et al., 2023)

I restanti alloggi si distribuiscono in decine di centri minori, configurando un patrimonio capillarmente diffuso su un territorio provinciale di oltre 7.000 km². I nuclei familiari

assegnatari ammontano a 10.542, di cui 10.165 in regime di edilizia residenziale pubblica, 46 in edilizia residenziale sociale e 331 nell'ambito della legge Gozzini. Il numero complessivo di residenti supera le 27.000 unità (A.R.C.A. Capitanata, 2025). È opportuno segnalare che il perimetro territoriale dell'Agenzia è stato recentemente ridefinito dalla L.R. 31 dicembre 2024, n. 42, che ha istituito una sesta agenzia regionale, denominata ARCA Sveva-Ofantina, alla cui competenza sono stati trasferiti, tra gli altri, i comuni di Margherita di Savoia, San Ferdinando di Puglia e Trinitapoli, precedentemente gestiti da A.R.C.A. Capitanata. I dati quantitativi riportati nelle Linee di Indirizzo 2025-2027, redatte prima dell'entrata in vigore della riforma, si riferiscono pertanto alla configurazione territoriale preesistente.

Questi dati delineano un ente che amministra uno dei patrimoni abitativi pubblici più estesi del Sud Italia, con una dispersione territoriale accentuata e un rapporto tra domanda e offerta di alloggi squilibrato. La dimensione del portafoglio, la sua frammentazione geografica e l'eterogeneità tipologica degli edifici, che spaziano dalle villette a schiera degli anni Cinquanta alle torri degli anni Sessanta e Settanta, pongono sfide gestionali e conoscitive di portata rilevante. Il patrimonio include edifici realizzati in epoche diverse, con tecnologie costruttive differenti e in condizioni di conservazione disomogenee, la cui documentazione tecnica riflette le vicende istituzionali dell'ente che li ha ereditati.

6.2 Problematiche nella gestione del patrimonio edilizio

Le criticità che caratterizzano la gestione del patrimonio di A.R.C.A. Capitanata non costituiscono un'anomalia locale, ma si inscrivono in una condizione strutturale che investe l'intero sistema dell'edilizia residenziale pubblica italiana. Inquadrare questa condizione a scala nazionale è il presupposto per comprendere la portata dei problemi specifici dell'ente foggiano e il contesto entro il quale il contributo della presente ricerca si colloca.

Il patrimonio ERP italiano ammonta a circa 758.000 alloggi secondo i dati raccolti da Nomisma per conto di Federcasa, di cui circa 652.000 regolarmente assegnati (Nomisma-Federcasa, 2020). L'incidenza sul patrimonio abitativo complessivo del Paese si attesta intorno al 4%, un valore che colloca l'Italia significativamente al di sotto della media europea, stimata al 6%, e a grande distanza da paesi come la Francia e il Regno Unito, dove la quota di alloggi sociali supera il 16% (Housing Europe, 2021). A questa limitatezza quantitativa si sommano problemi di natura gestionale e finanziaria. I canoni di locazione applicati agli assegnatari, calibrati sulla capacità contributiva di nuclei familiari con redditi bassi o molto bassi, coprono in media solo una frazione dei costi reali di gestione e manutenzione. Le domande di assegnazione in attesa, prive di prospettiva concreta, superano le 650.000 unità a livello nazionale, configurando un fabbisogno insoddisfatto di proporzioni strutturali. A questo si aggiunge la contrazione del patrimonio stesso. Tra il 1993 e il 2013, le politiche di alienazione degli alloggi pubblici hanno determinato una riduzione superiore al 22% dello stock disponibile, senza che i proventi delle vendite venissero reinvestiti a sufficienza nella costruzione di nuove unità. Il 7% degli alloggi gestiti dal sistema Federcasa (circa 55.000 unità) risulta sfitto, soprattutto per la necessità di interventi di manutenzione straordinaria che gli enti gestori non riescono a finanziare (Federcasa, 2023). Una ricerca di SDA Bocconi e Federcasa su dieci aziende casa ha evidenziato un'incertezza sul ruolo di questi enti. Gli enti gestori, nati dalla trasformazione degli ex IACP, svolgono compiti diversi, divisi tra la gestione del patrimonio e l'erogazione di servizi sociali. Attualmente manca un quadro normativo regionale che ne definisca con chiarezza la missione principale o i criteri di valutazione dei risultati (SDA Bocconi - Federcasa, 2021). Questa ambiguità strategica si riflette direttamente sulla capacità degli enti di pianificare la manutenzione, gestire il patrimonio documentale e investire nell'innovazione dei propri sistemi informativi.

La situazione di A.R.C.A. Capitanata si inserisce in questo quadro nazionale, presentando al contempo specificità legate al territorio e al contesto sociale della provincia di Foggia. L'ente gestisce 11.344 alloggi che ospitano oltre 27.000 residenti

in più di 60 comuni, con una concentrazione rilevante nel capoluogo. Il tasso di turn-over degli alloggi, ovvero la percentuale di unità che si rendono annualmente disponibili per nuove assegnazioni, è pari allo 0,6%, un valore del tutto inadeguato rispetto a un fabbisogno che le stime dell'ente stesso quantificano intorno al 30%. Nel 2024 sono stati assegnati 68 alloggi, a fronte di un fabbisogno stimato di circa 800 assegnazioni annue per esaurire le graduatorie attive entro un orizzonte quadriennale. Il dato si traduce in tempi di attesa virtualmente indefiniti per i nuclei in graduatoria. A Cerignola risultano 624 domande di assegnazione a fronte di un patrimonio di 1.036 alloggi, con un tasso di richiesta pari al 60,17%, il che significa che per ogni cinque alloggi esistenti, tre famiglie sono in attesa di assegnazione (A.R.C.A. Capitanata, 2025). Il contesto urbano foggiano è stato definito nella letteratura recente come un territorio ad alta tensione abitativa (Fig. 40), caratterizzato da dinamiche di sfratto, occupazione abusiva e insediamenti informali che persistono nonostante la contrazione demografica della città, e che evidenziano il fallimento dei programmi di rigenerazione urbana tentati nei decenni precedenti (Annese et al., 2024).

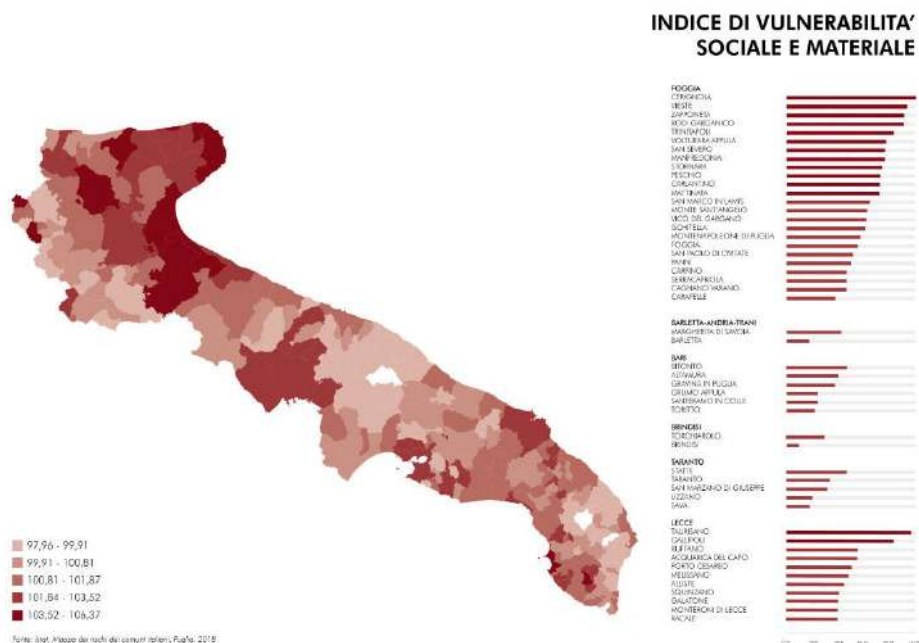


Fig. 40 - Mappatura ISTAT dell'indice di vulnerabilità sociale e materiale. In alto a sinistra è evidente come nella provincia di Foggia l'indice sia piuttosto elevato. Adattato da (Anaclerio, Ariola, Gabrieli, et al., 2023)

L'equilibrio finanziario dell'ente risente della morosità degli assegnatari, che ammonta complessivamente a 71,85 milioni di euro. Tale debito è distribuito su 7.560 posizioni e determina un tasso di morosità del 35% sull'intero patrimonio. Il canone medio applicato si attesta intorno a € 80 mensili, un importo che, moltiplicato per il numero di alloggi assegnati, genera introiti largamente insufficienti a coprire i costi ordinari di gestione. A questa criticità si aggiunge il peso dell'IMU. L'eventuale applicazione dell'imposta al patrimonio comporterebbe un costo annuo stimato di circa 5 milioni di euro, insostenibile per un ente con ricavi da locazione che non garantiscono l'autosufficienza. Questo meccanismo genera un effetto di selezione avversa segnalato dall'ente stesso. Ad acquistare sono i locatari più regolari nei pagamenti, la cui uscita

riduce le entrate e aumenta la percentuale di morosità tra gli inquilini rimasti, compromettendo la stabilità finanziaria nel lungo periodo (A.R.C.A. Capitanata, 2025).

Il fenomeno delle occupazioni abusive rappresenta una delle manifestazioni più visibili della crisi gestionale. A.R.C.A. Capitanata ha censito 452 alloggi occupati senza titolo sul proprio patrimonio. A partire dal 2018, l'ente ha trasmesso alla Prefettura di Foggia gli elenchi degli occupanti abusivi nell'ambito della Cabina di regia per la sicurezza, istituita ai sensi del D.L. 20 febbraio 2017, n. 14 e della L. 18 aprile 2017, n. 48. Le operazioni di recupero, condotte dalle forze dell'ordine in coordinamento con la Prefettura, hanno prodotto risultati significativi ma ancora parziali rispetto alla dimensione del fenomeno: 29 alloggi recuperati a Foggia, 25 a Trinitapoli, 14 a Manfredonia e 11 a San Severo (A.R.C.A. Capitanata, 2025). Un comunicato del Ministero dell'Interno del febbraio 2023 ha documentato il raggiungimento di 23 sgomberi nella sola città di Foggia, precisando che gli alloggi liberati erano occupati da soggetti legati alla criminalità organizzata locale (Ministero dell'Interno, 2023). Il legame tra occupazioni abusive e infiltrazione criminale nei quartieri ERP di Foggia è documentato anche nella relazione prefettizia che ha portato allo scioglimento del Comune per infiltrazioni mafiose, circostanza che conferisce alla gestione del patrimonio abitativo pubblico una dimensione di legalità che eccede la sfera tecnico-amministrativa. Nel corso del 2024, A.R.C.A. ha investito € 4.830.698, stanziati con DGR n. 1471 del 4 novembre 2024, per il riattamento degli alloggi recuperati e sfitti, e per il 2025 è previsto l'intervento su ulteriori 71 alloggi ERP, di cui 40 nel solo comune di Foggia, e 42 alloggi in regime di legge Gozzini, di cui 34 a Foggia (A.R.C.A. Capitanata, 2025).

Queste criticità generano una lacuna di informazioni che riguarda direttamente la presente ricerca, ovvero la mancanza di una documentazione tecnica e archivistica organica. Il materiale relativo al patrimonio di A.R.C.A. è frammentato a livello fisico, organizzativo e digitale. Gli archivi sono sparsi sul territorio a causa dei passaggi istituzionali dell'ente (dalla gestione I.A.C.P. alla trasformazione in A.R.C.A.) che hanno causato la dispersione dei documenti. I disegni originali, conservati su carta (come

lucidi, eliografie e carte da spolvero), versano in condizioni critiche. Molti elaborati sono deteriorati, fragili e talvolta illeggibili, rendendo difficile la loro consultazione.

A questa obsolescenza dei supporti si aggiunge l'assenza pressoché totale di digitalizzazione e di pubblicazione online dei materiali, il che rende l'archivio accessibile solo mediante consultazione fisica presso la sede dell'ente. La documentazione pubblicata sul patrimonio è altrettanto scarsa. La bibliografia esistente si limita ad analisi storiche e stilistiche, senza includere rilievi tecnici, dati metrici o una documentazione fotografica completa degli edifici.

La dimensione regionale di questo deficit è stata rilevata dalla piattaforma PUSH (Puglia Social Housing), lo strumento informativo della Regione Puglia per il monitoraggio e la gestione del patrimonio ERP. L'analisi regionale ha riscontrato problemi simili in tutte le ARCA pugliesi, come l'incompletezza delle banche dati patrimoniali, la scarsa automazione dei processi e l'obsolescenza dei sistemi informativi in uso (Regione Puglia-PUSH/ORCA). L'ente foggiano ha riconosciuto questa situazione avviando, nel 2024, una bonifica del database gestionale IncasaWEB. L'operazione ha permesso di correggere oltre 100 posizioni contabili e di annullare circa un milione di euro di bollettazioni errate (A.R.C.A. Capitanata, 2025). L'entità degli errori scoperti testimonia quanto il deficit informativo non sia soltanto un problema di conservazione storica, ma una criticità operativa che incide direttamente sulla capacità dell'ente di conoscere e amministrare il proprio patrimonio. Il monitoraggio regionale evidenzia anche dati patrimoniali incomplete e una limitata automazione dei processi informativi presso le diverse aziende casa pugliesi. L'ente ha risposto a questa condizione avviando operazioni di bonifica dei propri database gestionali, attività che conferma quanto il deficit conoscitivo rappresenti un ostacolo quotidiano per l'amministrazione del patrimonio.

6.3 Come la ricerca può supportare l'Ente

Le problematiche documentate nel paragrafo precedente convergono verso una carenza di fondo, individuabile nell'assenza di una conoscenza organica e geometricamente affidabile del patrimonio gestito. Tuttavia, gli obiettivi strategici individuati per il triennio 2025-2027 pongono la valorizzazione immobiliare e la digitalizzazione come priorità necessarie per la trasparenza e l'efficienza amministrativa. Nell'ambito di questo contesto trova spazio l'interesse dell'ente verso la transizione al BIM⁴⁸, inteso come strumento per superare l'attuale frammentazione informativa e migliorare la programmazione della manutenzione. La ricerca si colloca dunque come un supporto operativo a questa visione aziendale, offrendo i protocolli necessari per trasformare il dato d'archivio in modelli informativi pronti per essere integrati nei futuri sistemi di gestione dell'ente.

Questo orientamento programmatico riflette una chiara consapevolezza del problema, pur concentrandosi prevalentemente sulla dimensione amministrativa della conoscenza attraverso il monitoraggio del numero di alloggi, dello stato delle assegnazioni e delle posizioni contabili. Anche la piattaforma regionale PUSH/ORCA, alla quale A.R.C.A. trasmette i dati patrimoniali con cadenza semestrale, opera entro il medesimo perimetro informativo, richiedendo descrizioni quantitative che trascurano la consistenza fisica e architettonica degli edifici. Attualmente non esiste, nei sistemi dell'ente o nella piattaforma regionale, un livello di approfondimento capace di restituire le caratteristiche geometriche e materiche dei fabbricati. Tale assenza di dati edilizi verificati rende complessa ogni attività di programmazione tecnica, dalla pianificazione della manutenzione ordinaria alla progettazione di interventi di riqualificazione energetica o di recupero edilizio.

⁴⁸ Il progetto BIM@Arca, lanciato nel 2022 e promosso dall'Amministratore Unico dott. Giuseppe Liscio, rappresenta l'iniziativa di riferimento per la transizione digitale dell'ente coordinata dall'Area Tecnica. Il programma definisce il quadro operativo volto alla digitalizzazione dei processi di manutenzione e alla creazione di un'anagrafe tecnica digitale del patrimonio, integrandosi con le strategie regionali di monitoraggio immobiliare.

Questa criticità emerge chiaramente nella riqualificazione energetica, poiché i rapporti tecnici di ENEA e Federcasa confermano la difficoltà di progettare interventi senza dati geometrici e costruttivi verificati. In mancanza di rilievi aggiornati, i consumi vengono stimati con modelli basati su documenti incompleti, producendo errori che incidono sull'affidabilità delle diagnosi e sulla quantificazione degli investimenti necessari (ENEA-Federcasa)⁴⁹. Il patrimonio di A.R.C.A., costituito in larga parte da edifici realizzati tra gli anni Cinquanta e Settanta con tecnologie costruttive e prestazioni termiche anteriori a qualsiasi normativa sul contenimento energetico, rientra pienamente in questa condizione. La misura PNRR M7-I.17 RePower, alla quale A.R.C.A. ha aderito con proposte progettuali per diversi comuni della provincia, presuppone la disponibilità di dati tecnici sugli edifici oggetto di intervento, dati che, allo stato attuale, l'ente non possiede in forma sistematica.

La collaborazione tra questa ricerca e A.R.C.A. Capitanata si è inserita in questo contesto con l'intento di supportare l'ente in questa transizione. L'attività, condotta per un periodo di sei mesi durante il secondo anno di dottorato, ha operato all'interno degli uffici dell'ente con l'obiettivo di avviare un processo di documentazione digitale del patrimonio edilizio a partire da casi studio selezionati. Le attività svolte hanno riguardato la consultazione degli archivi storici dell'ente, la selezione dei casi studio in collaborazione con i tecnici dell'Area Tecnica, l'accesso mediato agli edifici per le operazioni di rilievo e la digitalizzazione della documentazione grafica d'archivio reperita. La selezione dei casi studio è avvenuta attraverso un confronto diretto con il personale tecnico di A.R.C.A., incrociando i criteri scientifici della ricerca (valore architettonico riconosciuto, presenza nel Censimento delle Architetture Contemporanee

⁴⁹ ENEA – Federcasa, *Rapporto sull'efficienza energetica del patrimonio edilizio residenziale pubblico*, Roma 2020. La pubblicazione esamina le difficoltà tecniche nella progettazione dell'efficientamento per il patrimonio ERP e approfondisce il concetto di consumo ricostruito, utilizzato per definire i parametri termici degli edifici quando i rilievi geometrici e costruttivi risultano incompleti o assenti. Questo metodo permette di stimare i fabbisogni energetici basandosi su modelli derivati da documentazione parziale, sopperendo alla mancanza di dati fisici aggiornati sulla consistenza reale dei fabbricati.

del MiC, rappresentatività tipologica) con le esigenze operative dell'ente, che ha indicato i complessi per i quali la necessità di documentazione risultava più urgente.

Questa collaborazione è stata formalizzata con un protocollo d'intesa per supportare l'ente nella digitalizzazione della documentazione tecnica. L'attività si è svolta per sei mesi durante il secondo anno di dottorato presso gli uffici dell'ente, operando in dialogo con l'ingegner Vincenzo De Devitiis e Annamaria Tomasulo per l'Area Tecnica, con il supporto dell'ingegner Stefano Salvemini per l'Area Patrimonio.

il coordinamento ha permesso l'accesso agli archivi del settore Tecnico e Patrimonio della sede di Via Caggese, dove la ricognizione ha evidenziato una gestione differenziata del materiale. L'ente ha fornito scansioni in formato PDF di alcuni elaborati originali, facilitando la consultazione di documenti altrimenti cartacei. La restante documentazione è organizzata in faldoni che includono talvolta supporti digitali come CD o floppy per gli interventi recenti, mentre le pratiche meno recenti risultano meno organizzate (Fig. 41). In queste sezioni (che rappresentano una piccolissima porzione degli archivi) i documenti consistono spesso in lucidi arrotolati non ancora classificati che necessitano di una catalogazione informatica.



Fig. 41 - Sezione dell'archivio con documentazione non catalogata.

Le attività hanno riguardato la consultazione degli archivi, la digitalizzazione del materiale cartaceo e il rilievo degli edifici. La selezione dei casi studio è avvenuta quindi, incrociando i criteri scientifici della ricerca, come il valore architettonico e la presenza nel Censimento del MiC, con le urgenze operative indicate dai tecnici dell'ente. L'accesso agli alloggi e alle pratiche riservate è avvenuto nel rispetto della privacy dei residenti, seguendo protocolli di riservatezza concordati per la tutela dei dati sensibili.

Lo sviluppo del workflow Archive+ Scan-to-BIM risponde quindi alle necessità emerse durante il confronto con l'Ente (Fig. 42). La metodologia proposta fornisce una risorsa operativa per la gestione del costruito, offrendo una base di conoscenza utile sia per la valorizzazione del patrimonio ma anche per la gestione e della manutenzione di questo. I modelli informativi risultanti permettono di disporre di una descrizione geometrica e

materica dei fabbricati, fondamentale per le attività di tutela e per i futuri interventi di recupero edilizio.

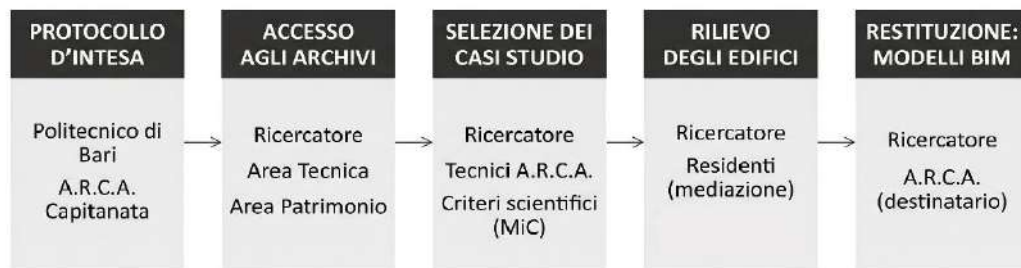


Fig. 42 - Diagramma che mostra le fasi della collaborazione con l'ente.

7. DEFINIZIONE DEL WORKFLOW OPERATIVO

7.1 Introduzione al workflow

La definizione di un workflow operativo per la documentazione digitale del patrimonio costruito non è mai un'operazione neutra. Le scelte che lo strutturano riflettono una precisa presa di posizione rispetto alla natura del problema affrontato: quali fasi includere, in quale sequenza disporle, quale peso attribuire a ciascuna nel processo complessivo. Nel caso della presente ricerca, tale problema è identificabile con precisione: documentare e modellare edifici residenziali pubblici del secondo Novecento che sono abitati, gestiti da enti pubblici e, nella quasi totalità dei casi, accessibili solo parzialmente. L'inaccessibilità degli spazi privati, ovvero gli alloggi occupati dagli inquilini, configura una condizione strutturale che regola il rapporto tra ente gestore e residenti e che, sul piano del rilievo, produce sistematicamente aree di conoscenza preclusa. È a partire da questo vincolo che il workflow Archive+Scan-to-BIM ((Fig. 43))) è stato concepito.

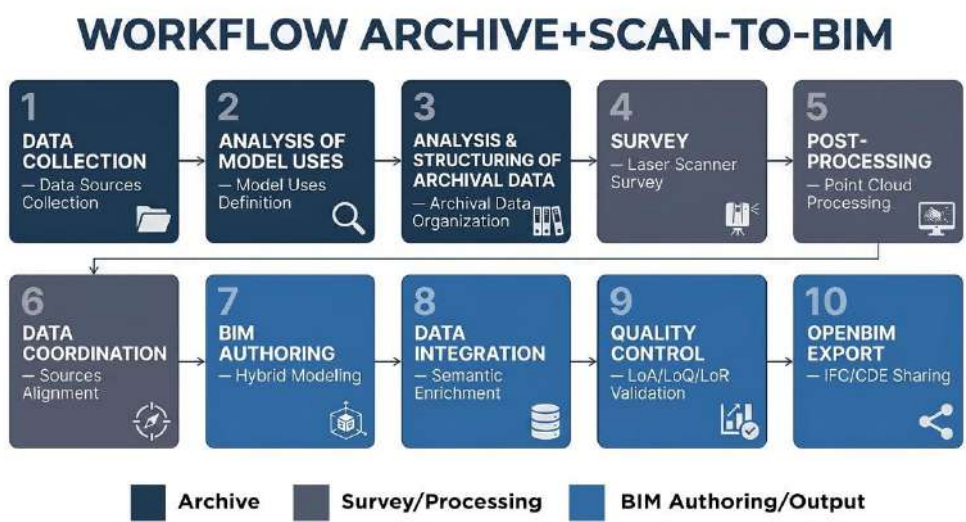


Fig. 43 - Diagramma esplicativo del workflow Archive+Scan-to-BIM nelle sue 10 fasi.

La costruzione del metodo poggia su tre considerazioni, ciascuna delle quali ha contribuito a precisare i contorni del problema e a orientare la struttura della risposta metodologica.

La prima, di natura storico-archivistica, riguarda la consistenza del patrimonio oggetto della ricerca. Lo studio della produzione residenziale pubblica italiana e spagnola del secondo Novecento ha evidenziato l'esistenza di un patrimonio edilizio vasto, talvolta tipologicamente ripetitivo e scarsamente documentato in formato digitale. La consultazione diretta e indiretta degli archivi tecnici degli enti gestori e degli archivi comunali ha rivelato una documentazione originale ricca ma frammentata, prevalentemente cartacea, conservata in condizioni eterogenee e priva di un ordinamento sistematico. Al contempo, i sopralluoghi preliminari agli edifici oggetto della ricerca hanno confermato che il rilievo strumentale degli interni era praticabile solo in misura parziale: gli spazi comuni, l'involucro esterno e, in alcuni casi più favorevoli, singoli alloggi campione risultano le uniche porzioni fisicamente accessibili.

La seconda considerazione è di natura critico-bibliografica e riguarda l'analisi dei workflow HBIM consolidati nella letteratura disciplinare. I principali contributi metodologici disponibili condividono un presupposto implicito: la possibilità di condurre un rilievo geometrico dell'intero manufatto, sul quale fondare la successiva modellazione parametrica. Uno dei contributi più strutturati articola il processo HBIM in cinque fasi, dalla pianificazione del modello alla modellazione, ciascuna delle quali presuppone che l'edificio sia ispezionabile nella sua interezza (Martinelli et al., 2022). L'approccio Scan-to-BIM, nella sua formulazione corrente, opera secondo la medesima logica: la nuvola di punti prodotta dal rilievo laser scanner costituisce l'impalcatura geometrica sulla quale il modello viene costruito, e la qualità del modello finale dipende direttamente dalla completezza della copertura metrica. Quando il rilievo è integrale, il metodo funziona; quando è strutturalmente parziale, come nel caso dell'edilizia residenziale pubblica occupata, il metodo produce modelli incompleti nelle porzioni con rilevanza funzionale, oppure modelli che colmano le lacune con ipotesi geometriche non dichiarate. In nessuno dei workflow esaminati il problema dell'accessibilità limitata

è affrontato come condizione di partenza del processo. La questione dell'incertezza nei processi HBIM è stata affrontata attraverso approcci basati sulla modellazione parametrica e sulla modellazione 4D, concepiti per gestire edifici con informazioni limitate e in evoluzione, nei quali l'incompletezza informativa è trattata come condizione operativa che il modello deve saper incorporare, strutturando i dati in modo da accogliere futuri aggiornamenti senza richiedere la ricostruzione dell'intero apparato informativo (Mazzei et al., 2024). Queste sperimentazioni si sono tuttavia concentrate su edifici di archeologia industriale abbandonati e parzialmente in rovina, la cui inaccessibilità è di natura fisica e contingente. Nel contesto ERP la situazione è diversa, l'edificio è in uso, e la limitazione all'accesso deriva dalla dimensione abitativa, dalla presenza dei residenti, un vincolo che non si risolve attraverso interventi tecnici sull'edificio.

La terza considerazione riguarda l'identificazione di un canale conoscitivo complementare al rilievo strumentale, a partire dalla constatazione che se le porzioni fisicamente accessibili dell'edificio possono essere documentate con tecnologie laser scanner producendo una copertura metrica accurata per l'involucro e gli spazi comuni, le porzioni inaccessibili richiedono una fonte informativa alternativa, capace di restituire dati geometrici e costruttivi con un grado di attendibilità dichiarabile. La documentazione d'archivio (piante, sezioni, prospetti, dettagli costruttivi, relazioni tecniche) si configura come questa fonte. Il ruolo del documento d'archivio nella ricostruzione digitale del patrimonio architettonico è riconosciuto in letteratura. Gli applicativi BIM-oriented possono funzionare come sistemi di archiviazione tridimensionale, consentendo la riunificazione virtuale di una documentazione progettuale spesso dispersa tra archivi diversi, e il disegno d'archivio, in questa prospettiva, è in grado di restituire la genesi e la logica di progetto dell'edificio (Conte & Rossi, 2019). Un workflow operativo per l'integrazione continua di fonti bidimensionali e tridimensionali nella ricostruzione virtuale di manufatti ha dimostrato che dati di natura eterogenea possono essere combinati in un modello digitale coerente attraverso fasi iterative di valutazione della compatibilità tra le fonti (Gherardini &

Sirocchi, 2022). Anche in questi casi, tuttavia, si opera su edifici non più esistenti o su manufatti artistici. Nel caso dell'edilizia residenziale pubblica la situazione è strutturalmente diversa: l'edificio esiste ed è in uso, il rilievo strumentale è disponibile per una parte del manufatto, e la documentazione d'archivio non sopperisce alla scomparsa dell'architettura ma alla mancanza di accesso a porzioni fisicamente presenti e funzionanti.

Dalla convergenza di queste considerazioni il workflow Archive+Scan-to-BIM ha assunto la sua configurazione. La logica del metodo è leggibile nel nome stesso, infatti, la componente "Scan-to-BIM" identifica il canale del rilievo strumentale diretto, consolidato nella letteratura e nella prassi, mentre la componente "Archive" identifica il canale della ricostruzione documentaria, che opera sulle porzioni inaccessibili con metodi e criteri propri. Il termine "Archive" definisce una componente che guida il flusso di lavoro dall'inizio alla fine, integrandosi in ogni fase operativa. L'integrazione dei due canali è pianificata fin dalla prima fase del processo e gestita attraverso meccanismi espliciti di dichiarazione della fonte e del grado di affidabilità di ciascun componente modellato.

L'adozione di un ambiente BIM, e non di un generico modellatore tridimensionale, è condizione necessaria perché questa integrazione risulti operativa. Un software di modellazione generico consentirebbe di restituire la geometria dell'edificio, ma non permetterebbe di collegare sistematicamente a ciascun elemento l'insieme dei dati informativi e documentali che ne qualificano la fonte, l'attendibilità e il ruolo all'interno del sistema costruttivo. È la capacità di strutturare in un unico ambiente la componente geometrica, quella informativa e il collegamento alle fonti documentali a rendere l'HBIM lo strumento appropriato per un workflow che opera con fonti eterogenee e affidabilità differenziate.

Il workflow si articola in dieci fasi sequenziali: *data collection, analysis of model uses, analysis and structuring of archival data, survey, post-processing, data coordination, BIM authoring, data integration, quality control e openBIM export*. La sequenza

risponde a una logica precisa. Le prime tre fasi precedono volutamente il rilievo strumentale: definire i model uses e analizzare la documentazione d'archivio prima di acquisire i dati metrici consente di calibrare la risoluzione e l'estensione del rilievo sugli obiettivi effettivi della modellazione. La pianificazione preliminare degli usi del modello è un principio consolidato nella letteratura BIM, formalizzato dalla norma EN 17412 attraverso il concetto di Level of Information Need (LOIN), che nella presente ricerca trova una declinazione specifica orientata alle esigenze di un ente gestore del patrimonio residenziale pubblico, con priorità sulla manutenzione programmata, sulla documentazione storico-architettonica e sulla condivisione delle informazioni tra uffici tecnici. La componente informativa del modello BIM, prevalentemente grafica in fase di progetto, si integra e si rinnova in formato prevalentemente alfanumerico nella fase gestionale, divenendo parte integrante dell'apparato manutentivo dei manufatti (Lo Turco, 2015).

La fase di *survey* permette di ottenere la nuvola di punti che documenta le porzioni fisicamente accessibili dell'edificio. Le fasi di *post-processing* e *data coordination* elaborano il dato metrico e lo allineano con la documentazione d'archivio digitalizzata su un sistema di riferimento comune. È nella sesta fase che i due canali conoscitivi convergono per la prima volta: il confronto tra la nuvola di punti e i disegni originali consente di verificare la compatibilità metrica tra le fonti e di individuare eventuali discrepanze riconducibili a varianti esecutive o trasformazioni successive. Un disegno coerente con il dato rilevato nelle porzioni accessibili può essere ragionevolmente impiegato per la ricostruzione delle porzioni inaccessibili; un disegno che presenta difformità significative richiede cautela e dichiarazione esplicita dell'incertezza.

La fase di *BIM authoring* traduce i dati geometrici e archivistici in un modello parametrico in cui ogni componente è classificato in base alla propria fonte: reality-based per gli elementi derivati dalla nuvola di punti, model-based per gli elementi ricostruiti a partire dai disegni d'archivio. La fase di *data integration* completa il modello geometrico con informazioni alfanumeriche, riferimenti alla documentazione d'archivio e codici di classificazione, attraverso parametri condivisi e collegamenti URL gestiti nel

CDE cloud previsto dal workflow; il workflow prevede inoltre la possibilità di automatizzare le operazioni ripetitive di popolamento informativo attraverso script Dynamo for Revit. La fase di *quality control* verifica la coerenza geometrica del modello rispetto alla nuvola di punti attraverso analisi delle deviazioni e dichiara il livello di affidabilità complessiva attraverso un framework di valutazione differenziato tra porzioni reality-based e model-based. La fase finale, *openBIM export*, garantisce l'interoperabilità dell'apparato informativo attraverso l'esportazione in formato IFC e la condivisione del modello all'interno del CDE, assicurando all'ente gestore l'accesso al dato digitale e la persistenza dei collegamenti alle fonti d'archivio.

7.2 Fasi del workflow

7.2.1. Data collection

La prima fase del workflow consiste nella raccolta sistematica di tutte le fonti disponibili sull'edificio oggetto di studio, condotta prima dell'avvio di qualsiasi operazione di rilievo architettonico (Fig. 44). Questa precedenza non è casuale: nel contesto dell'edilizia residenziale pubblica con accessibilità limitata, la conoscenza preliminare dell'edificio, quindi la sua configurazione planimetrica, il sistema costruttivo, le eventuali trasformazioni subite nel tempo, orienta le successive fasi del processo e, in particolare, consente di pianificare il rilievo in modo consapevole, sapendo in anticipo quali porzioni dell'edificio saranno accessibili e quali dovranno essere ricostruite per via documentaria.

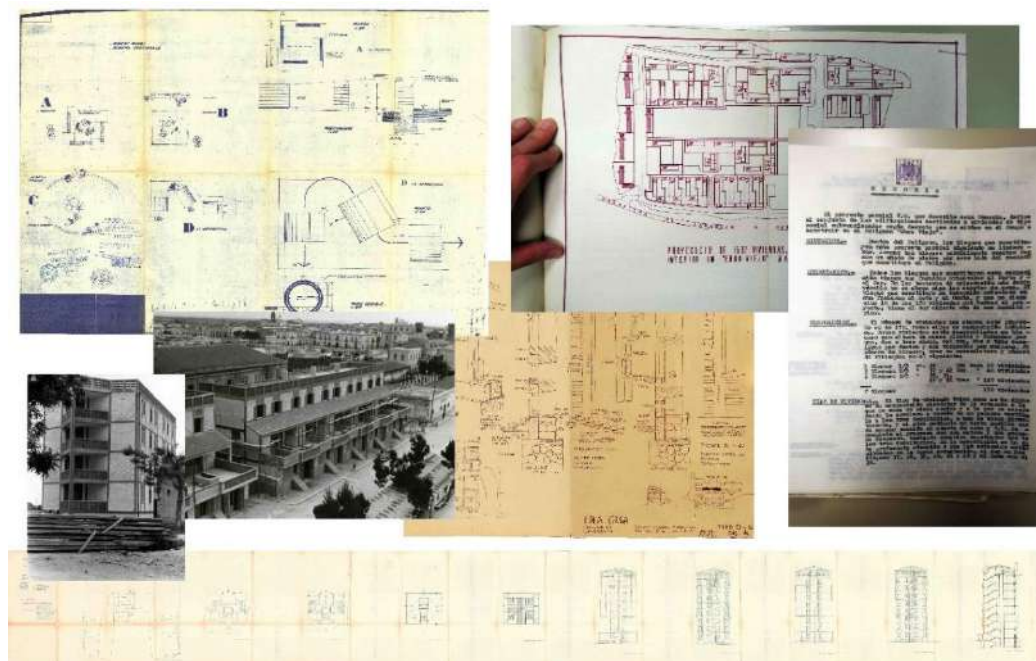


Fig. 44 - Le diverse tipologie di documenti individuabili nella fase di data collection.

Le fonti che vengono raccolte possono essere suddivise sostanzialmente in due categorie. La prima comprende la documentazione d'archivio (con identificazione della locazione quando possibile) conservata presso l'Ente gestore del patrimonio o presso archivi storici, quindi elaborati grafici come piante, sezioni, prospetti, dettagli costruttivi, relazioni, capitolati, computi metrici, fotografie di cantiere, corrispondenza tra committenza e progettisti. Questa documentazione costituisce innanzitutto la traccia della storia progettuale dell'edificio e rappresenta, nel caso delle zone inaccessibili, la principale fonte di informazione architettonica a disposizione dell'intero processo di modellazione. La seconda categoria comprende invece le fonti che posso essere definite "esterne" all'archivio dell'Ente, tra cui cartografie territoriali, ortofoto, rilievi o progetti precedenti eventualmente disponibili, pubblicazioni specifiche sull'edificio, sul quartiere o studi tipologici sulla produzione residenziale pubblica del periodo di riferimento.

La raccolta è un'attività critica che richiede competenze simili a quelle necessarie nella ricerca storico-archivistica. La documentazione d'archivio relativa al patrimonio ERP del secondo Novecento, infatti, è raramente organizzata secondo criteri archivistici coerenti, gli archivi o i fondi sono spesso dislocati tra uffici diversi, privi di inventario, conservati in condizioni talvolta improprie (Di Biagi, 2001). La capacità del ricercatore di identificare i documenti rilevanti, valutarne la completezza e riconoscere eventuali lacune o incongruenze è un requisito fondamentale per l'efficacia dell'intero workflow. La fase di *data collection* è in questo senso un'indagine conoscitiva che richiede la comprensione del contesto storico, normativo e istituzionale in cui l'edificio è stato pensato, progettato e realizzato, e che produce un corpus documentale eterogeneo, fatto di dati qualitativi e quantitativi, la cui strutturazione e il cui collegamento al modello digitale costituiscono una sfida specifica dei processi HBIM (Cursi et al., 2022).

La ricerca della documentazione segue percorsi che variano in funzione del contesto istituzionale e della disponibilità delle fonti. L'archivio tecnico dell'ente gestore del patrimonio costituisce generalmente il punto di partenza, poiché conserva gli elaborati grafici di progetto, le relazioni tecniche e la documentazione relativa agli interventi successivi alla costruzione. A questa fonte primaria si affiancano gli archivi comunali, dove sono depositati i progetti edilizi approvati, e, ove rintracciabili, i fondi professionali dei progettisti conservati presso istituzioni culturali o accademiche. In alcuni casi la documentazione è già stata oggetto di studi precedenti da parte di istituzioni universitarie o centri di ricerca, e la collaborazione con questi soggetti può rendere disponibili elaborati già digitalizzati o analisi tipologiche pregresse. Il confronto diretto con il personale tecnico dell'ente gestore è una componente rilevante di questa fase, poiché consente di orientare la ricerca all'interno di archivi spesso privi di catalogo e di accedere a informazioni sulla storia manutentiva dell'edificio che non sono reperibili nella sola documentazione grafica.

La natura della documentazione raccolta è, nella generalità dei casi relativi all'edilizia residenziale pubblica del periodo considerato, prevalentemente cartacea. I disegni

originali sono principalmente elaborati a china su carta lucida o schizzi realizzati a mano, con scale variabili e convenzioni grafiche proprie dell'epoca di redazione, le relazioni tecniche sono dattiloscritte e la documentazione fotografica è analogica. Questa condizione materiale implica che la fase di *data collection* produce un corpus documentale che non è immediatamente utilizzabile nel processo di modellazione, ma necessita di una successiva operazione di digitalizzazione, organizzazione e verifica.

Un altro aspetto metodologicamente rilevante della fase di *data collection* riguarda la raccolta parallela di informazioni sullo stato attuale dell'edificio, da condurre attraverso sopralluoghi preliminari e colloqui con i tecnici dell'ente gestore. L'obiettivo è quindi la mappatura delle condizioni di accessibilità, quali unità abitative o spazi comuni sono visitabili e quali porzioni dell'edificio dovranno essere ricostruite a partire dalla sola documentazione archivistica. Questa mappatura alimenta direttamente la pianificazione del rilievo e consente di assumere l'accessibilità parziale come condizione operativa fin dall'avvio del processo.

7.2.2. Analysis of model uses

La seconda fase del workflow consiste nella definizione degli usi previsti per il modello BIM, operazione che nella prassi operativa è identificata con l'espressione *model uses*. Definire i *model uses* significa decidere a cosa servirà il modello, e da questa decisione discendono tutte le scelte successive: quali informazioni inserire, con quale dettaglio geometrico e informativo, per quale destinatario. È in questa fase che si stabiliscono le premesse da cui derivano i *Level of Information Need* introdotti nell'inquadramento generale del workflow.

La pianificazione del modello BIM, compresa la selezione degli usi e la definizione del livello informativo necessario, è una fase che viene ampiamente trattata nella letteratura HBIM per il patrimonio storico e monumentale (Inzerillo et al., 2016; Brumana et al., 2018; Martinelli et al., 2022). L'aspetto qualificante, nel contesto della ricerca, è che il

destinatario primario del modello non è semplicemente un tecnico, un progettista o un restauratore, ma un ente gestore del patrimonio residenziale pubblico le cui esigenze informative differiscono significativamente da quelle che solitamente orientano i processi HBIM più convenzionali, applicati al patrimonio monumentale. Di fatti, mentre un modello HBIM concepito per il restauro di una chiesa o di un palazzo storico è calibrato su operazioni di intervento strutturale, diagnostica dei materiali e documentazione delle fasi costruttive, un modello destinato alla gestione del patrimonio ERP deve rispondere anche ad interrogazioni di natura amministrativa e manutentiva come la consistenza degli alloggi, lo stato di conservazione degli elementi costruttivi, programmazione degli interventi ordinari e straordinari, condivisione delle informazioni tra uffici tecnici e direzione. A queste esigenze gestionali si aggiunge la necessità imprescindibile di modellare e rappresentare graficamente il complesso a scala urbana (spazi aperti, viabilità, relazioni tra i blocchi). L'interesse patrimoniale di questi quartieri, infatti, non si esaurisce quasi mai a livello del singolo edificio, ma risiede nell'intero insediamento. A partire da queste considerazioni, per tutti e quattro i casi studio sono stati definiti tre model uses, (Fig. 45) individuati a priori coerentemente con gli obiettivi dichiarati precedentemente.

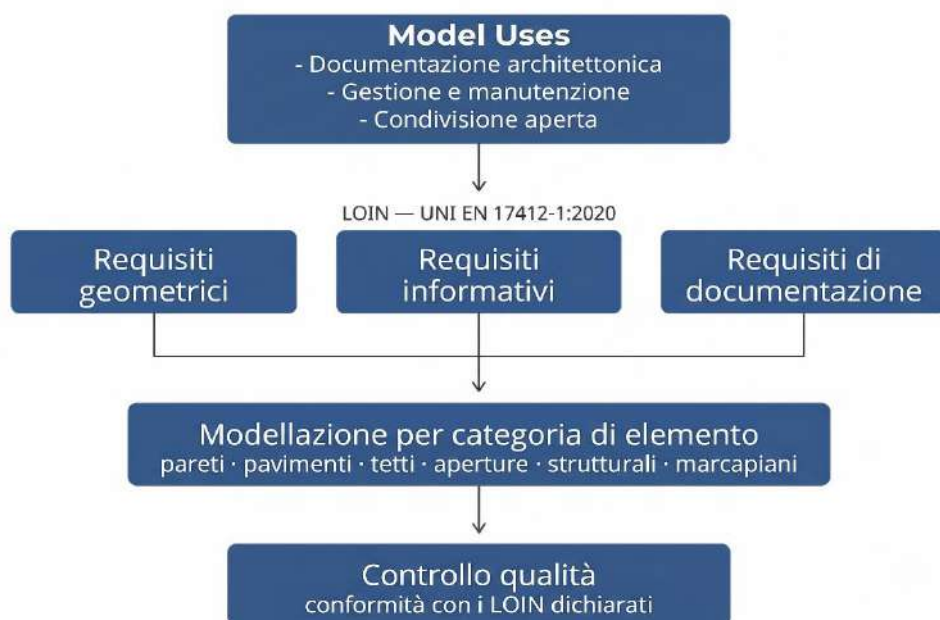


Fig. 45 - Diagramma che definisce il rapporto diretto tra model uses, LOIN e modello.

Il primo uso individuato è quello della documentazione storico-architettonica. Gli edifici oggetto della ricerca portano la firma di progettisti di rilievo nel panorama dell'edilizia pubblica del secondo Novecento e dell'architettura contemporanea in generale, e presentano scelte costruttive, formali e compositive che meritano una restituzione capace di renderne leggibili i caratteri distintivi. Il modello, in questa prospettiva, deve raggiungere un livello di dettaglio geometrico sufficiente a distinguere i sistemi costruttivi (struttura portante, tamponamenti, finiture) e a restituire la morfologia degli elementi che caratterizzano le architetture attraverso il proprio linguaggio architettonico. Al contempo, il modello funge da contenitore delle fonti storiche relative all'edificio e all'intero quartiere. I disegni di progetto originali, comprese le planimetrie generali e i progetti storici di urbanizzazione del complesso, le fotografie di cantiere, le relazioni tecniche e la documentazione d'archivio vengono collegati ai componenti modellati,

rendendo accessibile attraverso un'unica interfaccia un patrimonio documentale altrimenti disperso tra archivi diversi.

Il secondo uso è il supporto alla gestione e alla manutenzione del patrimonio edilizio. Gli enti gestori dell'edilizia residenziale pubblica operano, spesso, secondo una logica di manutenzione reattiva, intervenendo quindi a danno manifestato e in assenza di una base informativa strutturata sullo stato di fatto degli edifici. Il modello BIM consente di rovesciare questa logica, trasformando la rappresentazione geometrica dell'edificio in un sistema informativo nel quale ogni elemento costruttivo è associato alle proprie caratteristiche fisiche, alla datazione, allo stato di conservazione e agli interventi subiti (Lo Turco, 2015). La componente informativa del modello assume così, un peso pari se non superiore a quella geometrica: non è sufficiente rappresentare un muro, occorre sapere come è fatto, quando è stato realizzato e in quali condizioni si trova. Su questa base è possibile programmare gli interventi, stimare i costi e monitorare nel tempo le condizioni di conservazione degli elementi. Lo stesso apparato informativo costituisce inoltre il presupposto per sviluppi successivi come la gestione impiantistica, il tracciamento delle richieste di intervento provenienti dagli inquilini e, in prospettiva, la predisposizione del modello come digital twin dell'edificio, capace di dialogare, attraverso sensori, con sistemi di monitoraggio. La predisposizione a questi sviluppi non richiede la loro implementazione immediata, ma impone che il dato informativo sia strutturato fin dall'origine secondo criteri di classificazione e coerenza compatibili con le infrastrutture gestionali.

Infine, il terzo e ultimo uso è la condivisione del modello con l'ente gestore. Le considerazioni appena esposte sul ruolo informativo del modello perdono efficacia se il prodotto digitale resta confinato nell'ambiente software con cui è stato costruito. Infatti, un modello BIM consultabile solo da chi possiede una licenza di un software specifico e le competenze per utilizzarlo non risponde alle esigenze operative di un ente pubblico i cui tecnici lavorano con strumenti diversi e per i quali la transizione verso metodologie BIM è ancora in via di attuazione. Il modello deve pertanto essere

esportabile in formati aperti e interoperabili e visualizzabile attraverso piattaforme web-based accessibili senza software proprietari dedicati. Questo requisito condiziona oltre alle scelte tecniche della fase finale del workflow, anche le fasi intermedie di modellazione e di integrazione informativa, poiché impone che la strutturazione dei dati sia leggibile e interrogabile anche al di fuori dell'ambiente di authoring originale.

Il convenzionale sistema di classificazione per lettere (LOD A, B, C, D, E) assegnava a ciascun elemento un livello di dettaglio predefinito, indipendentemente dal contesto applicativo e dagli usi previsti per il modello⁵⁰. Questo approccio, consolidato nella prima fase di diffusione del BIM per il patrimonio esistente, è stato superato dalla norma UNI EN 17412-1:2020 in favore di una dichiarazione puntuale dei LOIN per categoria di elementi, calibrata sulle esigenze specifiche del progetto e funzionale alla tracciabilità dei requisiti nella successiva fase di *quality control*.

La definizione dei model uses, come anticipato, precede e condiziona ogni scelta successiva del workflow e da essa si deducono i LOIN così come formalizzati dalla norma. Questa stabilisce l'informazione minima necessaria per soddisfare ogni requisito senza eccessi che costituirebbero spreco informativo. I LOIN si compongono di tre gruppi distinti e complementari, ovvero i *requisiti geometrici*, che definiscono il livello di discretizzazione con cui ciascun elemento deve essere modellato, i *requisiti informativi*, che identificano i parametri necessari a sostenere gli usi dichiarati, e i *requisiti documentali*, che stabiliscono quali documenti esterni devono essere collegati a ciascun elemento del modello.

I LOIN non vengono assegnati in modo unitario all'intero edificio, ma dichiarati per ciascuna categoria di elementi (murature esterne e interne, solai, elementi strutturali

⁵⁰ Il sistema LOD per il patrimonio esistente, formalizzato nella normativa italiana dalla UNI 11337 e nella prassi HBIM attraverso le declinazioni LOG (Level of Geometry) e LOI (Level of Information), prevedeva una scala di dettaglio crescente dalla lettera A (rappresentazione simbolica) alla lettera E (rappresentazione esecutiva), applicata in modo omogeneo all'intero modello. La UNI EN 17412-1:2020 ha sostituito questa logica con il concetto di Level of Information Need, che prescrive la definizione dei requisiti in funzione dello scopo della commessa e non di una scala di dettaglio predefinita.

verticali, coperture, aperture, elementi di facciata). La differenziazione opera su due livelli: il primo distingue gli elementi effettivamente rilevati (reality-based) da quelli ricostruiti dalla documentazione d'archivio (model-based), poiché le due classi dispongono di fonti con accuratezza e natura diverse; il secondo differenzia le categorie tra loro, poiché non tutti i componenti dell'edificio richiedono il medesimo livello di discretizzazione geometrica né il medesimo corredo informativo. Dal model use discendono i LOIN, dai LOIN discende la modellazione, e in sede di *quality control* si verifica il rispetto di entrambi. Accuratezza geometrica, risoluzione del dato metrico e livello di dettaglio non vengono dichiarati ex-post come caratteristiche del prodotto finale, ma decisi ex-ante a partire dai requisiti LOIN, che forniscono il parametro di riferimento per ciascuna fase operativa successiva.

A partire dai model uses dichiarati, i requisiti sono stati definiti per ciascuna categoria di elementi costruttivi secondo i tre gruppi prescritti dalla norma.

Sul piano *geometrico*, la discretizzazione della stratigrafia varia in funzione del ruolo che l'elemento svolge nella documentazione del sistema costruttivo. Le murature esterne sono modellate con stratigrafia esplicitata, distinguendo lo strato strutturale, la finitura esterna e la finitura interna, poiché la restituzione del sistema costruttivo è un requisito del model use della documentazione storico-architettonica e i casi studio presentano soluzioni costruttive diverse tra loro. Le murature interne, che ricadono prevalentemente nelle zone d'ombra, sono modellate con stratigrafia semplificata a volume unico, poiché l'impossibilità di verificare la composizione effettiva della parete e la rilevanza prevalentemente distributiva di questi elementi rendono la discretizzazione non giustificata. I solai distinguono lo strato strutturale dallo strato di finitura senza rappresentazione degli elementi interni (travetti, elementi di alleggerimento), la cui restituzione non è funzionale agli usi dichiarati. Gli elementi strutturali verticali richiedono una modellazione con profilo reale quando la loro configurazione è architettonicamente significativa, ad esempio in presenza di pilastri a sezione variabile in altezza la cui plasticità costituisce un tratto distintivo del linguaggio costruttivo

dell'edificio; negli altri casi la modellazione con profilo semplificato è sufficiente. Le aperture sono modellate con attenzione all'apparato architettonico di contorno (stipiti, davanzali, soglie) più che al serramento, quasi sempre sostituito nel corso dei decenni. Gli elementi marcapiano e le cornici-gocciolatoio, di geometria prevalentemente rettilinea, sono assimilati alle murature nella logica di modellazione; gli elementi a tessitura complessa possono richiedere la modellazione in un ambiente esterno e l'importazione nel progetto come componente non parametrico, preservando la semantica dell'elemento attraverso l'assegnazione dei parametri condivisi alla famiglia importata.

La tolleranza dimensionale attesa per le parti reality-based è di ± 10 mm per gli elementi strutturali verticali, la cui posizione e sezione sono dati critici per la documentazione costruttiva, di ± 20 mm per le murature, i solai, le coperture e gli elementi marcapiano, e di ± 30 mm per le aperture, dove la sostituzione dei serramenti e le possibili variazioni tra progetto e realizzazione giustificano un margine più ampio. Per le parti model-based la tolleranza non è calcolabile direttamente sulla nuvola di punti e l'incertezza viene dichiarata in funzione della scala della fonte d'archivio utilizzata per la ricostruzione. Gli elaborati di progetto a scala 1:50, che costituiscono la fonte principale per la modellazione degli interni, comportano un'incertezza implicita dell'ordine di ± 10 -15 mm; gli elaborati preliminari a scala 1:100 comportano un'incertezza di ± 20 -30 mm; i dettagli costruttivi a scala 1:10 o 1:20 offrono un'incertezza trascurabile.

Sul piano *informativo*, l'anagrafica costruttiva, ovvero materiale prevalente, tecnica costruttiva e anno di realizzazione, è obbligatoria per tutte le categorie poiché risponde al model use della documentazione storico-architettonica e viene compilata a partire dalla documentazione d'archivio e dalla conoscenza delle tecniche costruttive del periodo. La classificazione secondo la norma UNI 8290⁵¹ e il parametro Fonte_Dati

⁵¹ La norma UNI 8290-1:1981 "Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia" definisce la scomposizione del sistema tecnologico edilizio su tre livelli gerarchici: classi di unità tecnologiche (primo livello, ad esempio "Chiusura"), unità tecnologiche (secondo livello, ad esempio "Chiusura verticale") e classi di elementi tecnici (terzo livello, ad esempio "Pareti perimetrali verticali"). Benché riferita all'edilizia residenziale, la classificazione

sono obbligatori per tutti gli elementi senza eccezione, in quanto costituiscono il presupposto per l'interrogazione strutturata del modello e per la distinzione tracciabile tra porzioni reality-based e model-based. Lo stato di conservazione è condizionato all'ispezione diretta, compilabile per le porzioni accessibili e dichiarato come "non ispezionato" per le zone d'ombra. La storia manutentiva è condizionata alla disponibilità dell'informazione e nella maggior parte dei casi i parametri corrispondenti resteranno vuoti; il modello è predisposto per accogliere dati che l'ente gestore potrà inserire nel tempo senza modificare la struttura informativa del progetto.

Sul piano *documentale*, il collegamento alla tavola d'archivio da cui è stata ricavata la geometria è obbligatorio per ogni elemento model-based, poiché senza di esso la ricostruzione non è verificabile e la catena di tracciabilità del dato si interrompe. Il collegamento a relazioni tecniche, capitolati e specifiche costruttive è condizionato alla disponibilità; le relazioni di progetto, dove disponibili, forniscono informazioni sulla composizione delle murature, sulla tipologia dei solai e sulle specifiche dei materiali che integrano il dato geometrico dei disegni. Il collegamento a fotografie storiche di cantiere e a fotografie di sopralluogo è condizionato alla disponibilità.

Le tabelle seguenti sintetizzano la dichiarazione ex-ante dei requisiti informativi per ciascuna categoria:

REQUISITI GEOMETRICI - UNI EN 17412-1:2020			
Categoria	Stratigrafia	Tolleranza (reality-based)	Tolleranza (model-based)
Murature esterne	Esplicitata (strato strutt. + finitura esterna + finitura interna)	± 20 mm	Da scala fonte ($\pm 10-15$ mm at 1:50; $\pm 20-30$ mm at 1:100)
Murature interne	Semplificata (volume unico)	± 20 mm	Da scala fonte

è applicabile anche ad altre destinazioni d'uso e fornisce una terminologia unificata per le attività normative, progettuali e operative.

Solai	Strutt. + finitura (senza elem. interni)	± 20 mm	Da scala fonte
Coperture	Strutt. + elementi di bordo semplificato	± 20 mm	Da scala fonte
Elem. Strutturali verticali	Profilo reale (se architettonicamente significativo) o semplificato	± 10 mm	Da scala fonte
Aperture	Apparato di contorno + serramento generico	± 30 mm	Da scala fonte
Elem. Marcapiano/cornici	Profilo semplificato	± 20 mm	Da scala fonte

REQUISITI INFORMATIVI - UNI EN 17412-1:2020		
Categoria	Parametri obbligatori	Parametri condizionali
Murature esterne	Materiale, tecnica costruttiva, anno, UNI 8290, Fonte_Dati	Stato_Conservazione Intervento_Precedente Storia manutentiva
Murature interne	Materiale, UNI 8290, Fonte_Dati	Stato_Conservazione Intervento_Precedente Storia manutentiva
Solai	Materiale, tecnica costruttiva, anno, UNI 8290, Fonte_Dati	Stato_Conservazione Intervento_Precedente Storia manutentiva
Coperture	Materiale, tecnica costruttiva, UNI 8290, Fonte_Dati	Stato_Conservazione Intervento_Precedente Storia manutentiva
Elem. strutturali verticali	Materiale, tecnica costruttiva, sezione, anno, UNI 8290, Fonte_Dati	Stato_Conservazione Intervento_Precedente Storia manutentiva

Aperture	Materiale, UNI 8290, Fonte_Dati	Stato_Conservazione Intervento_Precedente Storia manutentiva
Elem. Marcapiano/cornici	Materiale, UNI 8290, Fonte_Dati	Stato_Conservazione Intervento_Precedente Storia manutentiva

REQUISITI DOCUMENTALI - UNI EN 17412-1:2020		
Categoria	Documentazione obbligatoria	Documentazione condizionale
Murature esterne	Tavola d'archivio (pianta / sezione)	Relazioni tecniche/capitolati Fotografie storiche/cantiere Fotografia sopralluogo
Murature interne	Tavola d'archivio (pianta / sezione)	Relazioni tecniche/capitolati Fotografie storiche/cantiere Fotografia sopralluogo
Solai	Tavola d'archivio (pianta / sezione/dettaglio costruttivo)	Relazioni tecniche/capitolati Fotografie storiche/cantiere Fotografia sopralluogo
Coperture	Tavola d'archivio (pianta / sezione/dettaglio costruttivo)	Relazioni tecniche/capitolati Fotografie storiche/cantiere Fotografia sopralluogo
Elem. strutturali verticali	Tavola d'archivio (pianta / sezione/dettaglio costruttivo)	Relazioni tecniche/capitolati Fotografie storiche/cantiere Fotografia sopralluogo
Aperture	Tavola d'archivio (prospetto/dettaglio costruttivo)	Relazioni tecniche/capitolati Fotografie storiche/cantiere Fotografia sopralluogo
Elem. Marcapiano/cornici	Tavola d'archivio (prospetto)	Relazioni tecniche/capitolati Fotografie storiche/cantiere Fotografia sopralluogo

7.2.3. *Analysis and structuring of archival data*

La terza fase del workflow è dedicata all'organizzazione, alla verifica e alla digitalizzazione della documentazione raccolta nella fase di *data collection*. Il corpus documentale prodotto dalla prima fase è eterogeneo per formato, scala, epoca di redazione e condizioni materiali, e la sua trasformazione in un archivio digitale strutturato, verificato e predisposto per alimentare le successive operazioni di modellazione e di integrazione informativa costituisce l'obiettivo specifico di questa fase.

La fase prende avvio dall'acquisizione digitale degli elaborati grafici originali (piante, sezioni, prospetti, dettagli costruttivi) nei casi in cui il materiale d'archivio sia conservato esclusivamente su supporto cartaceo. Quando l'ente gestore o altri soggetti istituzionali dispongono già di riproduzioni digitali, l'operazione si concentra sulla verifica di qualità e completezza dei file esistenti, con particolare attenzione alla leggibilità delle quote, all'integrità dei cartigli e alla corrispondenza tra scala dichiarata e scala effettiva. In entrambi i casi, il processo richiede decisioni che vanno oltre il piano tecnico della risoluzione e del formato di archiviazione, poiché occorre stabilire quali documenti trattare in via prioritaria, riconoscere le ridondanze tra elaborati provenienti da fondi diversi e valutare l'attendibilità complessiva delle fonti reperite. Le problematiche connesse a questa fase sono oggetto di una riflessione ormai ampia, che ha prodotto sia standard tecnici per la riproduzione digitale del patrimonio documentario, sia contributi specifici sulle implicazioni interpretative della trasposizione degli elaborati grafici dal supporto cartaceo all'ambiente digitale (FADGI, 2023; ICDP, 2022; Cera et al., 2024).

L'organizzazione del materiale richiede un'infrastruttura digitale centralizzata in grado di garantire la raccolta, la condivisione e la tracciabilità delle informazioni relative all'edificio. La norma ISO 19650-1:2018 e la UNI 11337-5:2017⁵² identificano questa

⁵² La Parte 1 (*Concepts and principles*) della norma 19650 definisce i concetti fondamentali e i principi generali della gestione informativa, tra cui la struttura del Common Data Environment (CDE), le regole di denominazione,

infrastruttura rispettivamente nel Common Data Environment (CDE) e nell'Ambiente di Condivisione dei Dati (ACDat), definito come ambiente concordato tra gli attori coinvolti nel processo, nel quale i dati vengono raccolti, validati e distribuiti secondo regole esplicite di accesso, di versioning e di registrazione delle modifiche. Nella pratica professionale, tra le piattaforme CDE più diffuse si trovano Forma Data Management di Autodesk (già Autodesk Docs, parte dell'ecosistema Autodesk Forma che ha sostituito Autodesk Construction Cloud), Trimble Connect e usBIM di ACCA Software.

Queste soluzioni condividono un nucleo funzionale comune costituito da un ambiente cloud multi-utente con gestione differenziata dei permessi, versioning automatico dei file, un viewer interattivo che consente di ispezionare il modello BIM e le proprietà dei singoli oggetti senza necessità di software di modellazione, e un sistema di issue tracking per l'assegnazione di attività con allegati e scadenze. A queste funzionalità si aggiunge la possibilità di collegare al modello documenti esterni in formati aperti (.pdf, .jpeg, .tif, .csv, .xml), consentendo di associare la documentazione d'archivio al modello in un'unica interfaccia.

Il workflow prevede, nella sua configurazione ottimale, l'adozione di un Common Data Environment conforme alla norma ISO 19650, inteso come infrastruttura di archiviazione, condivisione e gestione controllata del modello informativo e della documentazione associata. Gli enti gestori di edilizia residenziale pubblica si trovano generalmente in una fase di progressivo avvicinamento alle tecnologie digitali per la gestione del patrimonio immobiliare, un percorso che la letteratura recente ha esplorato proprio con riferimento al contesto dell'housing sociale (Block & Rossi-Schwarzenbeck, 2021) e che il quadro normativo nazionale incentiva anche al di sotto delle soglie di obbligatorietà BIM. In questa prospettiva, l'organizzazione del materiale

archiviazione e distribuzione dei dati, e i criteri di accesso e validazione delle informazioni condivise tra i soggetti coinvolti nel processo. La Parte 5 (*Flussi informativi nei processi digitalizzati*) della norma 11337, definisce i ruoli, le responsabilità e le regole per lo scambio dei dati nei processi BIM, introducendo il concetto di Ambiente di Condivisione dei Dati (ACDat), equivalente italiano del Common Data Environment (CDE) previsto dalla norma EN ISO 19650-1:2018.

digitalizzato è impostata sin dall'origine secondo una logica gerarchica e convenzioni di denominazione univoche, pensate per rendere l'archivio interoperabile con una piattaforma CDE cloud-based e allo stesso tempo pienamente funzionale anche in un ambiente di archiviazione locale, nel caso in cui vincoli di connettività, politiche interne di gestione dei dati o limiti infrastrutturali rendano impraticabile l'adozione immediata di un ambiente cloud. Questa scelta garantisce che la struttura dei dati non richieda ristrutturazioni nell'eventuale passaggio da una gestione in locale a una gestione in rete, consentendo all'ente di adottare il sistema in modo incrementale, secondo le proprie tempistiche e risorse.

L'archivio digitale (Fig. 46) è organizzato in una struttura gerarchica di cartelle articolata per caso studio, ciascuna delle quali comprende sottocartelle dedicate agli elaborati grafici, alle fotografie (suddivise per tipologia in fotografie di sopralluogo e fotografie storiche di cantiere), al modello BIM, alle relazioni tecniche, ai progetti di interventi successivi e alle pubblicazioni di riferimento.

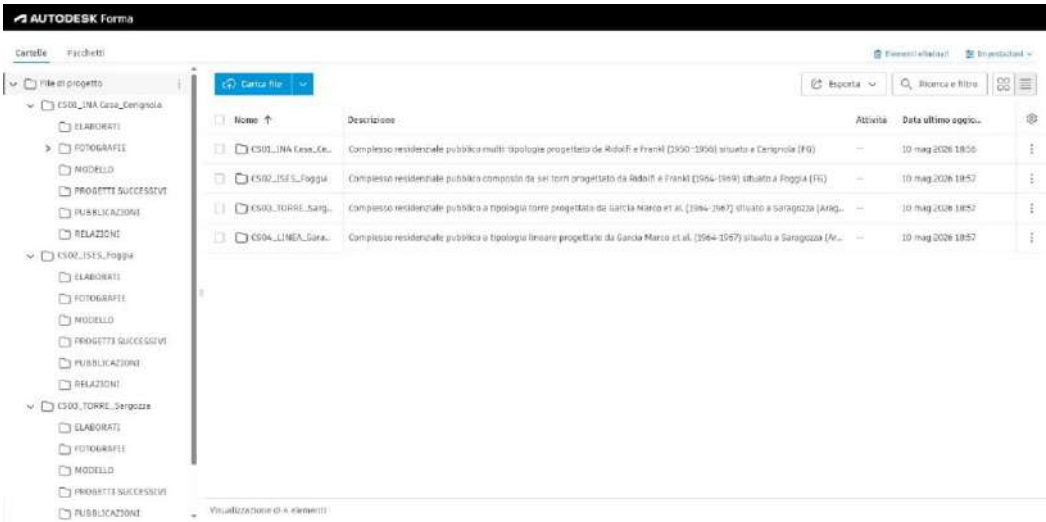


Fig. 46 - Interfaccia del CDE online Autodesk Forma.

A ciascun file caricato nella cartella degli elaborati sono associati attributi personalizzati configurati nell'ambiente CDE, che funzionano come metadati strutturati del documento e comprendono la tipologia dell'elaborato (schizzo, disegno preliminare, disegno di progetto), una descrizione sintetica del contenuto, la scala di rappresentazione, il formato originale del supporto (china su carta lucida, copia eliografica, china e matita su lucido), la data riportata sull'elaborato, la qualità e leggibilità della riproduzione e la provenienza archivistica. Gli elaborati grafici sono inoltre calibrati metricamente all'interno della piattaforma, in modo che le misurazioni effettuate direttamente nel viewer corrispondano alle dimensioni reali dell'edificio; questa operazione rende l'archivio non solo consultabile ma anche metricamente interrogabile, consentendo ai tecnici dell'ente di verificare dimensioni e distanze sugli elaborati senza ricorrere a software di disegno dedicati. La struttura dell'archivio e la convenzione di codifica dei file sono concepite in modo che ciascun documento disponga di un collegamento URL univoco e stabile all'interno della piattaforma, copiabile direttamente nelle proprietà degli elementi del modello BIM nella fase di *data integration*; in questo modo il CDE funge da infrastruttura attiva di collegamento tra la documentazione e il modello.

La struttura dell'archivio è definita sia in funzione dei dati disponibili al momento della sperimentazione che in vista di futuri aggiornamenti. Questo criterio è particolarmente rilevante nel contesto dell'ERP occupata, dove le condizioni dell'edificio e dei suoi alloggi sono soggette a variazioni continue, dagli avvicendamenti degli inquilini alle modifiche della distribuzione interna degli appartamenti, dagli interventi manutentivi o di adeguamento impiantistico alla possibilità che unità inizialmente escluse dal rilievo diventino accessibili in un momento successivo. In ciascuno di questi casi, i dati aggiornati possono essere integrati nel modello senza che sia necessaria una riorganizzazione dell'archivio.

Un aspetto specifico della fase riguarda la verifica della qualità materiale delle riproduzioni disponibili. Gli elaborati grafici relativi al patrimonio ERP del secondo Novecento sono conservati frequentemente sotto forma di copie eliografiche di diversa

generazione e provenienza, la cui resa grafica può risultare disomogenea per grana, contrasto e leggibilità delle quotature. Al contempo, è raro che un singolo fondo archivistico conservi la totalità degli elaborati relativi a un edificio, rendendo necessario un lavoro di integrazione tra riproduzioni di qualità differente e provenienza diversa per ricomporre un quadro documentario il più possibile esaustivo. Stabilire quale versione del disegno corrisponda allo stato effettivamente realizzato e valutare il grado di affidabilità delle informazioni dimensionali desumibili da riproduzioni di qualità variabile richiede un'operazione di critica delle fonti che è, a tutti gli effetti, un'attività di ricerca storica applicata alla modellazione. L'integrazione sistematica di fonti eterogenee nella costruzione di un modello digitale coerente è una pratica consolidata nella documentazione del patrimonio perduto o parzialmente compromesso (Gherardini & Sirocchi, 2022); nel caso dell'ERP occupata questa operazione assume un rilievo particolare, poiché il confronto tra le fonti mira a compensare una lacuna di accesso a porzioni fisicamente esistenti, sulle quali il disegno d'archivio costituisce l'unica traccia disponibile.

La verifica della coerenza tra le fonti è una fase ineludibile del processo, poiché il confronto tra i disegni originali e i dati dimensionali ottenuti dalle porzioni accessibili degli edifici (misurabili attraverso sopralluogo diretto o, nelle fasi successive, attraverso la nuvola di punti) può evidenziare difformità riconducibili a varianti esecutive introdotte in cantiere, a modifiche successive non documentate o a imprecisioni grafiche degli elaborati originali. Queste differenze non invalidano l'utilizzo della documentazione d'archivio come fonte per la ricostruzione delle zone d'ombra, ma impongono una dichiarazione esplicita della loro entità e della loro localizzazione all'interno del modello, secondo un principio di trasparenza che il workflow traduce operativamente nella fase di *quality control*.

L'output della fase è un archivio digitale strutturato, verificato e predisposto per il collegamento al modello BIM, comprensivo degli elaborati grafici digitalizzati e denominati secondo le convenzioni adottate nel CDE, di una tabella di corrispondenza

tra i documenti e i componenti dell'edificio a cui si riferiscono, e di un registro delle difformità riscontrate tra le fonti con le relative decisioni critiche adottate per la loro risoluzione. Questo materiale alimenta direttamente le fasi successive del workflow, ovvero la *data coordination*, in cui i disegni digitalizzati vengono allineati alla nuvola di punti, e il *BIM authoring*, in cui le informazioni archivistiche guidano la modellazione delle zone d'ombra.

7.2.4. Survey

La quarta fase del workflow riguarda il rilievo architettonico delle porzioni fisicamente accessibili degli edifici oggetto di studio, condotto mediante tecniche di laser scanning terrestre (per le specifiche della strumentazione e delle tecnologie impiegate si rimanda al capitolo 5). Nel caso dell'edilizia residenziale pubblica occupata il rilievo integrale del manufatto è spesso irrealizzabile, e la campagna di acquisizione produce una gabbia metrica accurata e verificabile limitata alle porzioni raggiungibili, ovvero l'involucro esterno, gli spazi comuni di distribuzione verticale e orizzontale, le coperture e, ove la disponibilità dei residenti lo consenta, un numero limitato di unità abitative campione. In questa fase risulta di fondamentale importanza documentare la data o il periodo esatto di esecuzione del rilievo sul campo; tale riferimento temporale verrà successivamente integrato come metadato all'interno del modello BIM, permettendo di storicizzare l'acquisizione e monitorare l'evoluzione del manufatto nel tempo. Le porzioni non accessibili vengono ricostruite nella fase di *BIM authoring* a partire dalla documentazione d'archivio strutturata nella fase precedente.

La pianificazione del rilievo (Fig. 47) rappresenta la declinazione pratica dei requisiti geometrici dei LOIN dichiarati nella fase di *analysis of model uses*, e non un'operazione tecnica autonoma. Distanza di acquisizione, risoluzione e percentuale di sovrapposizione minima tra scansioni vengono definiti preventivamente a partire dal livello di dettaglio geometrico richiesto dal model use, e la conformità del dato rilevato

a questi parametri costituisce il riferimento per la successiva fase di *quality control*. Nella prassi consolidata del rilievo architettonico la risoluzione di acquisizione è spesso dettata dalle caratteristiche dello strumento e l'accuratezza viene dichiarata ex-post come proprietà del prodotto finito; nel workflow proposto la logica è opposta, poiché i parametri di acquisizione discendono dai requisiti informativi e vengono calibrati per soddisfarli con la strumentazione disponibile.



Fig. 47 - Pianificazione delle posizioni di scansione sulla base di una pianta d'archivio.

Un aspetto che caratterizza il workflow Archive+Scan-to-BIM è il ruolo che la documentazione d'archivio, già analizzata e strutturata nella fase precedente, svolge nella pianificazione del rilievo stesso. Disponendo delle piante originali dell'edificio prima della campagna di acquisizione, è possibile stimare in anticipo la configurazione degli ambienti da rilevare, individuare i punti critici in cui le occlusioni saranno più probabili (angoli, vani stretti, disimpegni) e calcolare il numero minimo di stazioni

necessarie per garantire una copertura adeguata delle porzioni accessibili. Questo modo di procedere riduce i tempi della campagna sul campo, aspetto critico quando la permanenza negli alloggi è vincolata alla disponibilità degli inquilini, e consente di arrivare al rilievo con una strategia di acquisizione già definita. La letteratura recente ha esplorato approcci computazionali per l'ottimizzazione del posizionamento delle stazioni di scansione a partire dalla planimetria dell'edificio, con l'obiettivo di massimizzare la copertura riducendo il numero di acquisizioni (Buldo, 2024). Nel workflow proposto la pianificazione segue un principio analogo, seppure condotto manualmente sulla base delle piante d'archivio disponibili.

Gli edifici di edilizia residenziale pubblica del periodo considerato presentano generalmente un numero limitato di tipologie abitative, replicate per piano o per corpo di fabbrica. Quando il rilievo degli interni è possibile solo per un numero ridotto di unità, la scelta ricade sugli alloggi che meglio rappresentano ciascuna tipologia presente nell'edificio, privilegiando dove possibile unità collocate a piani diversi per verificare la coerenza della distribuzione verticale e, a parità di rappresentazione tipologica, gli alloggi che mantengono una maggiore fedeltà all'assetto originario, poiché un alloggio fortemente modificato dagli inquilini offre un dato meno utile ai fini della validazione della documentazione d'archivio.

La campagna di acquisizione non punta alla copertura metrica totale dell'edificio, obiettivo che la condizione di accessibilità rende irraggiungibile, ma alla produzione di un dataset geometrico che soddisfi due requisiti operativi. Il primo è fornire l'impalcatura metrica per la modellazione delle porzioni accessibili, con un livello di dettaglio coerente con i LOIN dichiarati. Il secondo, specifico del workflow Archive+Scan-to-BIM, è produrre un numero adeguato di aree di sovrapposizione tra le porzioni rilevate e quelle che saranno ricostruite da archivio, in modo che nella fase di *data coordination* il confronto dimensionale tra nuvola di punti e disegni originali risulti significativo. Se il rilievo copre esclusivamente l'involucro esterno senza alcun dato sugli ambienti interni, la possibilità di verificare la coerenza delle piante d'archivio

si limita ai riscontri perimetrali; se invece include anche alcuni alloggi campione, i punti di confronto si moltiplicano e la validazione della documentazione archivistica diventa più robusta. La decisione su quante e quali porzioni interne rilevare dipende quindi anche dalla quantità di sovrapposizione necessaria a rendere attendibile il confronto con le fonti d'archivio.

Oltre alla campagna di acquisizione con laser scanner, la fase di *survey* comprende una serie di operazioni complementari di documentazione speditiva condotte durante i sopralluoghi e le stesse sessioni di rilievo strumentale, tra cui misurazioni manuali di verifica su elementi puntuali (spessori murari, altezze di interpiano, dimensioni di aperture) e documentazione fotografica sistematica degli ambienti rilevati e di quelli visibili ma non rilevabili strumentalmente. Queste informazioni non confluiscono direttamente nella nuvola di punti ma alimentano la fase di *data integration*. La loro raccolta durante il rilievo risponde a un criterio di economia operativa, poiché negli edifici ERP occupati ogni accesso a un alloggio o a uno spazio comune è un'occasione che potrebbe non ripresentarsi nelle stesse condizioni, e il rilievo strumentale rappresenta spesso l'unica finestra temporale disponibile per acquisire anche queste informazioni accessorie.

La campagna di rilievo produce come output una o più nuvole di punti tridimensionali, comprensive della componente colorimetrica RGB acquisita dalla fotocamera integrata nello scanner. Il workflow, nella configurazione descritta, si basa su dati range-based da laser scanning terrestre; in contesti in cui si renda necessaria una documentazione più dettagliata delle superfici o dei materiali, il protocollo può essere integrato con tecniche fotogrammetriche, secondo flussi di processamento che la letteratura ha formalizzato per l'acquisizione congiunta di dati metrici e colorimetrici (Bruno et al., 2022).

7.2.5. Post-processing

La quinta fase del workflow è dedicata all'elaborazione delle nuvole di punti grezze prodotte dalla campagna di rilievo, con l'obiettivo di trasformare il dato acquisito in un prodotto metrico pulito, ottimizzato e predisposto per l'importazione nell'ambiente di modellazione BIM. Le operazioni di *post-processing* non alterano il contenuto informativo della nuvola e ne migliorano la qualità e la gestibilità, rimuovendo le componenti non pertinenti e adattando la densità del dato alle esigenze delle fasi successive.

La prima operazione è la registrazione delle scansioni, ovvero l'allineamento di tutte le acquisizioni in un unico sistema di riferimento (Fig. 48). Il workflow prevede l'utilizzo dell'ambiente software proprietario dello strumento di rilievo (nel caso di questa ricerca, FARO Scene®), che consente sia procedure automatiche basate su algoritmi ICP (Iterative Closest Point) sia procedure manuali fondate sull'individuazione di punti omologhi tra coppie di scansioni adiacenti.

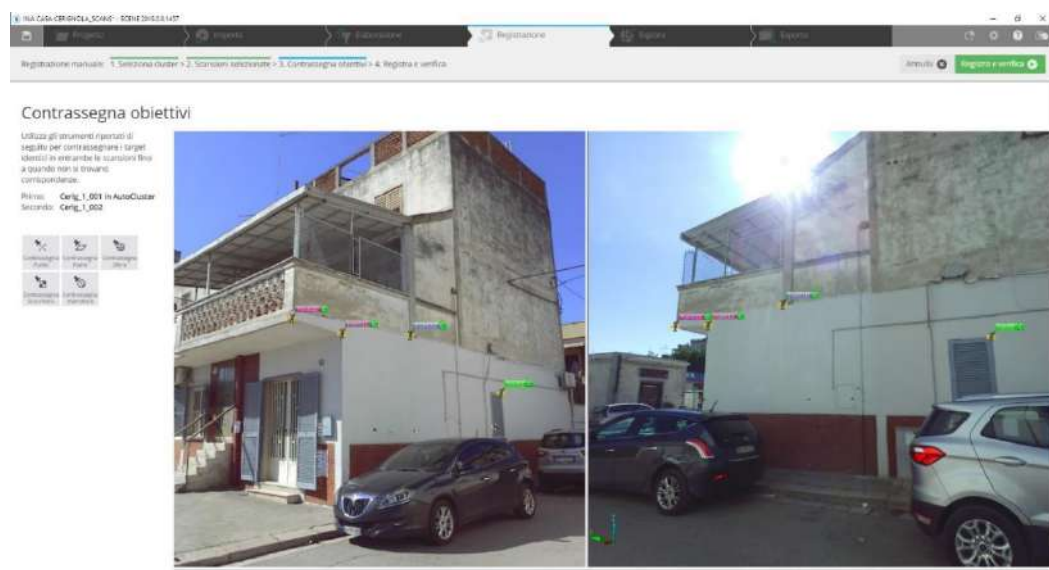


Fig. 48 - Registrazione di una coppia di nuvole di punti attraverso il posizionamento di punti omologhi all'interno del software Faro Scene.

La procedura manuale richiede tempi di elaborazione più lunghi ma riduce il rischio di errori cumulativi tipici degli algoritmi automatici, che presuppongono una sovrapposizione abbondante tra scansioni. Nel contesto dell'ERP occupata, dove i vincoli di permanenza negli alloggi possono ridurre la sovrapposizione tra scansioni adiacenti al di sotto delle soglie raccomandate per la convergenza automatica, la disponibilità di entrambe le procedure è una condizione operativa rilevante. La qualità della registrazione viene valutata attraverso l'errore medio di allineamento, espresso come distanza media tra i punti omologhi delle scansioni sovrapposte o come valore RMS (Root Mean Square); per un rilievo architettonico finalizzato alla modellazione BIM del patrimonio residenziale, valori nell'ordine di pochi millimetri (2-5 mm) sono generalmente compatibili con le tolleranze geometriche dichiarate nella fase di *analysis of model uses*.

A registrazione completata, le nuvole vengono sottoposte a operazioni di pulizia per la rimozione degli artefatti prodotti da riflessioni speculari, oggetti in movimento (persone, veicoli, vegetazione) e rumore strumentale.

La pulizia manuale viene condotta nell'ambiente software di registrazione, utilizzando gli strumenti di selezione disponibili (selezione rettangolare, poligonale e lazo) per isolare e rimuovere le porzioni non pertinenti della nuvola. Per il filtraggio semi-automatico del rumore residuo il workflow prevede l'impiego del filtro Statistical Outlier Removal (SOR), che consente di eliminare il rumore isolato senza intervenire sulla geometria delle superfici rilevate. Questa operazione può essere condotta sia nell'ambiente di registrazione, sia in software open-source come CloudCompare, che offre un'implementazione del filtro SOR con un controllo più fine dei parametri di soglia.

Il workflow prevede una fase di decimazione della nuvola di punti (Fig. 49), necessaria per rendere il dataset gestibile nell'ambiente di modellazione BIM. La procedura, descritta in dettaglio nel capitolo 5, consiste nella riduzione controllata del numero di

punti attraverso un ricampionamento spaziale che produce una distribuzione omogenea con una distanza minima garantita tra i punti. Il criterio guida per la scelta della densità finale è la coerenza con i LOIN dichiarati, e per la documentazione e gestione patrimoniale dell'edilizia residenziale pubblica una densità che consenta la leggibilità degli elementi costruttivi alla scala del componente (muri, solai, pilastri, aperture) è sufficiente.

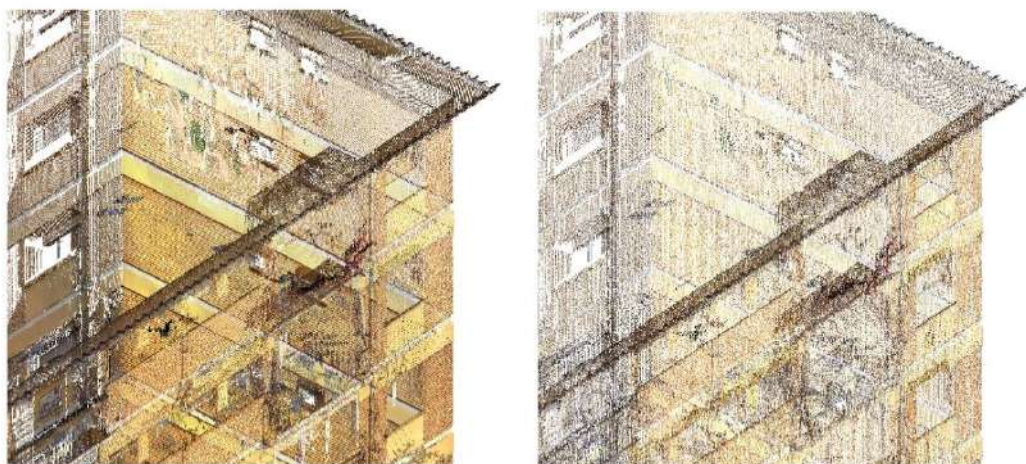


Fig. 49 - Una nuvola di punti prima e dopo la decimazione su CloudCompare.

Il workflow prevede inoltre la possibilità di una fase di segmentazione della nuvola di punti, finalizzata alla suddivisione del dataset in porzioni corrispondenti a componenti architettonici distinti per facilitare il riconoscimento degli elementi nella successiva fase di modellazione. La geometria prevalentemente rettilinea dell'edilizia residenziale pubblica del Novecento consente generalmente un'identificazione visiva agevole dei componenti in sede di *BIM authoring*, rendendo la segmentazione sistematica non sempre necessaria. Ove richiesta, la procedura può essere condotta in CloudCompare attraverso l'algoritmo RANSAC (Random Sample Consensus), che individua le primitive geometriche (piani, cilindri, sfere) che meglio approssimano sottoinsiemi della nuvola e consente di isolare le superfici riconducibili a componenti architettonici regolari. I

recenti sviluppi nella segmentazione semantica automatizzata offrono strumenti capaci di ridurre il costo operativo di questa fase in modo significativo, attraverso processi fondati sulla combinazione di model-fitting, clustering basato su densità e analisi della curvatura locale (Buldo et al., 2025), e tecniche complementari basate su machine learning supervisionato e ricostruzione mesh multi-livello per la classificazione automatica dei componenti e la loro conversione in geometrie tridimensionali ottimizzate per l'ambiente HBIM (Buldo, 2024; Musicco, 2022). L'adozione di questi approcci in future applicazioni del workflow su scala più ampia rappresenta una direzione di sviluppo coerente con il contesto operativo degli enti gestori del patrimonio ERP, dove le risorse disponibili per operazioni su dataset estesi sono spesso limitate.

Le nuvole elaborate vengono esportate in formato aperto .e57 e successivamente importate in Autodesk ReCap, che le converte nel formato indicizzato .rcp compatibile con Autodesk Revit, ambiente di modellazione adottato per la fase di *BIM authoring*. Il dato metrico così preparato costituisce l'input della fase di *data coordination*, in cui la nuvola di punti viene allineata alla documentazione d'archivio digitalizzata su un sistema di riferimento comune per il confronto dimensionale tra le due fonti.

7.2.6. *Data coordination*

La sesta fase del workflow è il momento in cui i due canali informativi su cui il metodo Archive+Scan-to-BIM si fonda, il dato metrico prodotto dal rilievo strumentale e la documentazione d'archivio digitalizzata e strutturata, convergono per la prima volta. L'operazione centrale è l'allineamento delle due fonti su un sistema di riferimento comune e la verifica della loro corrispondenza, passaggio che nel contesto della ricerca assume una funzione metodologica oltre che tecnica, poiché stabilisce le condizioni entro le quali la documentazione d'archivio può essere impiegata come fonte affidabile per la ricostruzione delle zone d'ombra.

L'allineamento viene realizzato importando i disegni d'archivio digitalizzati⁵³ nello spazio di lavoro di Autodesk Revit, in sovrapposizione alla nuvola di punti già caricata nell'ambiente di modellazione (Fig. 50). L'operazione consiste nel posizionare il disegno bidimensionale in corrispondenza della nuvola tridimensionale, facendo coincidere punti di riferimento riconoscibili in entrambe le fonti, come ad esempio: spigoli di muri perimetrali, intersezioni tra partizioni, posizioni dei pilastri, geometrie delle aperture. La procedura è manuale e richiede un'interpretazione critica di entrambi i dataset, poiché il disegno d'archivio rappresenta il progetto originale, o una sua variante esecutiva, mentre la nuvola di punti restituisce lo stato di fatto dell'edificio al momento del rilievo. La corrispondenza tra le due rappresentazioni non è mai perfetta, e le discrepanze riscontrate costituiscono un'informazione in sé, poiché segnalano l'entità delle trasformazioni subite dall'edificio tra la fase progettuale e lo stato attuale.

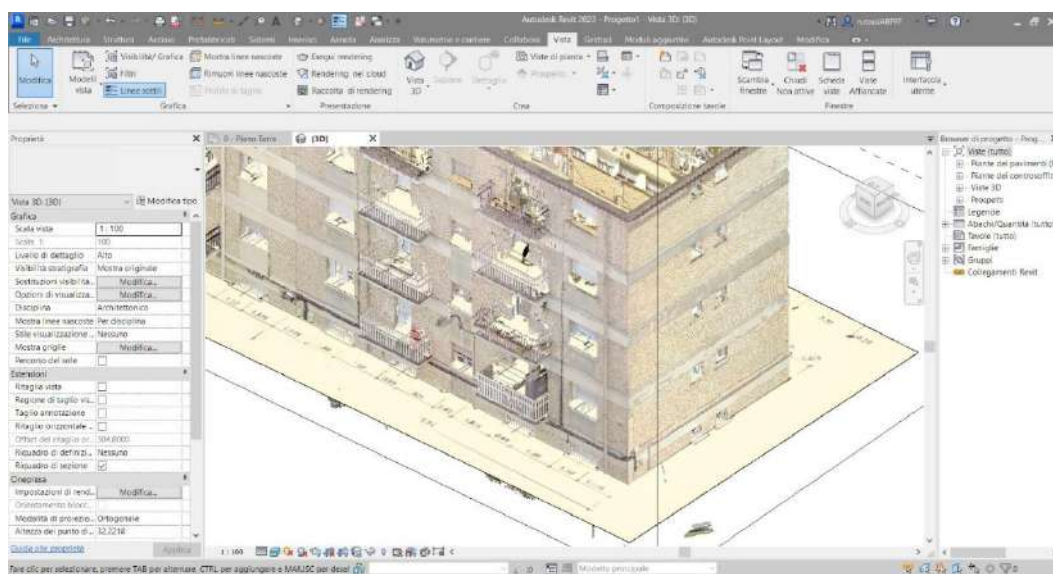


Fig. 50 - La nuvola di punti e una pianta d'archivio sovrapposte in Revit.

⁵³ Per l'importazione degli elaborati è stato utilizzato il formato TIFF. Sebbene il software supporti anche il formato PDF, il vantaggio legato all'uso dei punti di snap è limitato ai soli file di natura vettoriale. Poiché la documentazione d'archivio è costituita da scansioni di disegni cartacei storici, l'inattività della funzione di snap rende preferibile il formato raster TIFF per preservare la qualità del tratto e la precisione metrica del documento acquisito.

Le discrepanze riscontrabili nel confronto tra nuvola di punti e disegni d'archivio sono generalmente riconducibili a due ordini di fenomeni. Il primo riguarda differenze minori nelle dimensioni dei vani, spostamenti di partizioni interne, adattamenti degli elementi di finitura rispetto al progetto originale, ovvero varianti introdotte in fase di cantiere. Queste varianti, ricorrenti nell'edilizia pubblica del secondo Novecento, non stravolgono l'impianto complessivo del progetto ma impongono correzioni puntuali nella fase di modellazione. Il secondo ordine di discrepanze riguarda le trasformazioni successive alla costruzione; quindi, modifiche degli spazi interni operate dagli inquilini nel corso della vita dell'edificio, chiusure o aperture di vani, sostituzione di elementi di finitura. Queste trasformazioni sono documentabili solo attraverso il rilievo delle porzioni accessibili e, per le zone d'ombra, attraverso le segnalazioni dei tecnici dell'ente gestore.

La risoluzione delle discrepanze segue un principio di gerarchia secondo il quale, dove il dato metrico della nuvola di punti è disponibile, questo prevale sul disegno d'archivio; dove invece il dato metrico non è disponibile (come accade nelle zone d'ombra), il disegno d'archivio costituisce la fonte primaria, a condizione che la sua coerenza con il dato rilevato sia stata verificata nelle porzioni accessibili. Questo criterio riconosce alla documentazione d'archivio un ruolo conoscitivo al pari di quello strumentale, vincolandone però l'impiego alla verifica di compatibilità con la nuvola di punti. La gestione esplicita di questa gerarchia tra fonti è coerente con l'approccio alla modellazione in condizioni di incertezza, che richiede la distinzione tracciabile tra dati misurati e dati ricostruiti lungo l'intero processo (Mazzei et al., 2024).

A completamento della fase si colloca la georeferenziazione del modello, con la quale il sistema di riferimento locale adottato in sede di rilievo viene posto in relazione con un sistema di coordinate geografiche assoluto (Fig. 51). A tale scopo, a seconda del livello di accuratezza richiesto, questa operazione può prevedere l'integrazione di rilievi topografici di precisione eseguiti tramite strumentazione GNSS o stazione totale,

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico:
un approccio Archive+Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata (Italia) e Aragna (Spagna)

permettendo così l'allineamento diretto del modello al sistema cartografico ufficiale del luogo.

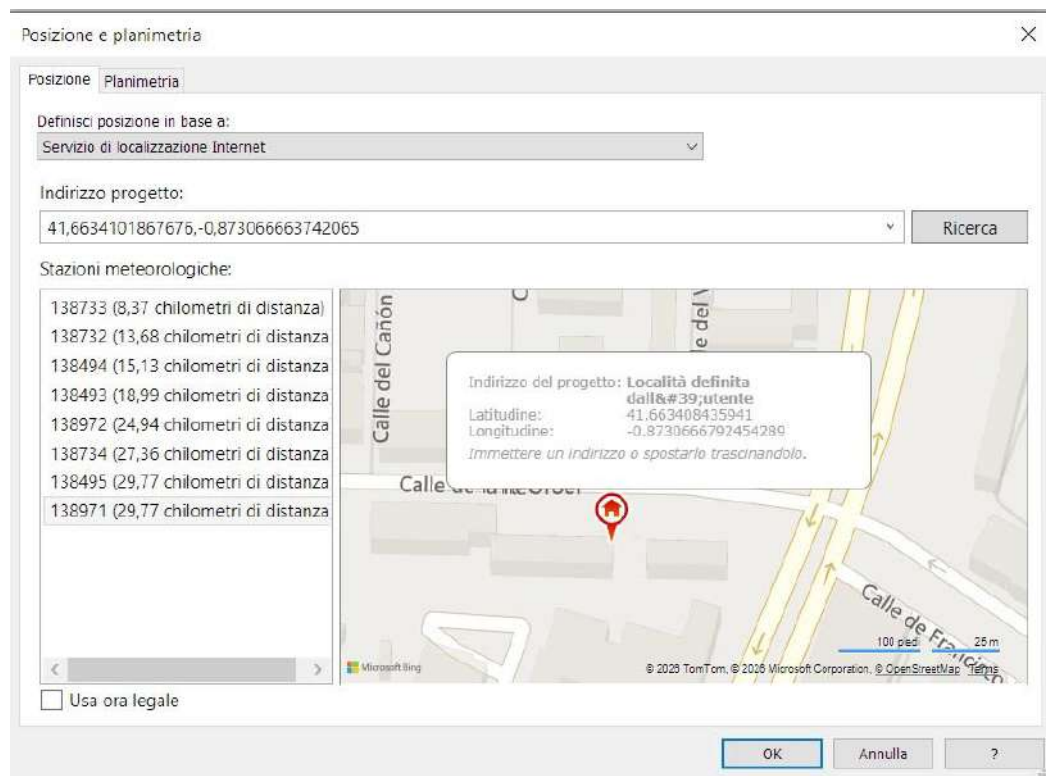


Fig. 51 - Geolocalizzazione iniziale del progetto in Revit.

La procedura consiste nell'inserimento in Autodesk Revit di un punto di riferimento a coordinate note, ricavate da cartografia ufficiale, da rilevamento GNSS o da servizi cartografici pubblici, così permettendo la localizzazione univoca del modello (Fig. 52). La georeferenziazione non modifica la geometria degli oggetti modellati, la sua funzione è di coordinazione del dato, poiché predispone il modello alla sua integrazione con infrastrutture informative esterne all'ambiente BIM, in particolare con i sistemi informativi geografici (GIS).



Fig. 52 - Inserimento del punto di rilevamento in Revit

Anche in assenza di una piena integrazione BIM-GIS nell'ambito della presente ricerca, la scelta di georeferenziare il modello risponde a una prospettiva di convergenza tra i due ambienti informativi che consente di armonizzare la scala del singolo edificio, propria del BIM, con la scala territoriale propria dei sistemi informativi geografici (Matrone et al., 2023; Pepe et al., 2024), che il paragrafo 7.2.10 riprende come prerequisito per l'adozione di piattaforme CDE evolute e che il paragrafo 10 sviluppa come direzione di ricerca futura. La predisposizione del modello al dialogo con l'ambiente GIS è coerente, inoltre, con la scala tipica del patrimonio ERP, costituito non

da singoli manufatti isolati ma da quartieri estesi, la cui gestione efficace presuppone la collocazione del dato edilizio all'interno di un sistema informativo territoriale.

L'output della fase di *data coordination* è un ambiente di lavoro in cui nuvola di punti e disegni d'archivio coesistono in un sistema di riferimento unificato, con una mappatura delle discrepanze riscontrate, e costituisce la base operativa per la fase di *BIM authoring*.

7.2.7. *BIM authoring*

La fase di *BIM authoring* rappresenta il momento in cui i dati metrici provenienti dal rilievo e le informazioni dimensionali ricavate dalla documentazione d'archivio convergono in un unico ambiente di modellazione parametrica per restituire l'organismo edilizio nella sua complessità costruttiva e informativa. La modellazione BIM di un edificio esistente comporta la scomposizione dell'architettura nei suoi elementi costitutivi e la loro ricomposizione secondo una logica semantica coerente con il sistema costruttivo reale (Potestà, 2020). Le scelte relative a quali elementi rappresentare, con quale livello di discretizzazione geometrica e con quale corredo informativo, discendono dai Level of Information Need dichiarati nel par. 7.2.2, articolati secondo i tre gruppi di requisiti prescritti dalla norma UNI EN 17412-1:2020.

Il processo di modellazione parte dalla configurazione dell'ambiente di progetto in Autodesk Revit, a partire dal template architettonico standard della piattaforma. Le operazioni preliminari comprendono l'impostazione delle unità di misura in sistema metrico, il caricamento del file dei parametri condivisi (.txt) predisposto nella fase di *analysis of model uses*, e l'importazione della nuvola di punti in formato .rcp generato in Autodesk ReCap nella fase di *post-processing*. La struttura dei livelli viene tracciata direttamente sulla nuvola di punti, utilizzando le quote di interpiano visibili nei tagli longitudinali e trasversali della nuvola come riferimento per il posizionamento di ciascun livello. Oltre ai livelli corrispondenti alle quote di pavimento di ciascun piano e alla

copertura, vengono inseriti livelli intermedi in corrispondenza dei pianerottoli del vano scala e, dove presenti, alla base e al colmo dei tetti a falde. Questi livelli intermedi svolgono la funzione di vincoli geometrici superiori e inferiori per gli elementi che vi afferiscono, tra cui le rampe di scala, i muri del vano scala, le porte e le finestre dei pianerottoli. La denominazione dei livelli segue una convenzione univoca, definita a priori per garantire la leggibilità del progetto e la coerenza tra i diversi casi studio. Griglie strutturali vengono tracciate in corrispondenza degli interassi del sistema portante e degli allineamenti di facciata, seguendo la logica costruttiva dell'edificio.

Completata la configurazione dei riferimenti geometrici, gli elaborati d'archivio vengono importati nello spazio di progetto come immagini raster in formato TIFF, posizionati sul piano di lavoro corrispondente al livello rappresentato e scalati metricamente sulla base dei riferimenti dimensionali verificati nella fase di *data coordination*. La compresenza della nuvola di punti e della documentazione d'archivio nel medesimo ambiente di modellazione (Fig. 53) esemplifica la natura ibrida del workflow, dove l'operatore dispone, per ogni elemento da modellare, di un dato metrico diretto dove la nuvola di punti è disponibile, e di un dato dimensionale mediato dove la ricostruzione procede dalla documentazione grafica.

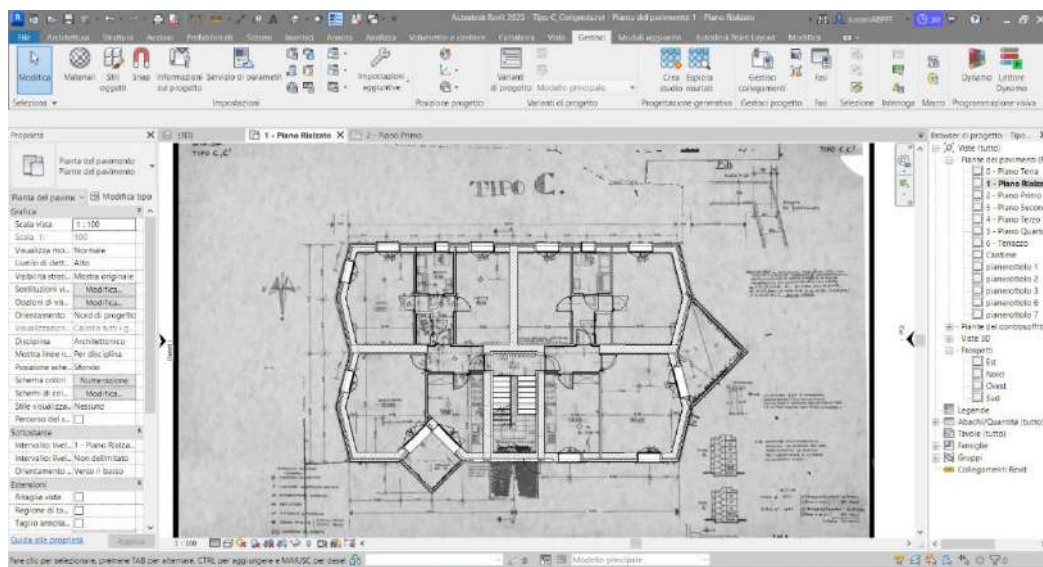


Fig. 53 - Il modello BIM allineato e sovrapposto alla documentazione d'archivio.

La nuvola di punti, visualizzabile attraverso sezioni, piante e prospetti generati dal section box, fornisce il riferimento primario per il posizionamento e il dimensionamento degli elementi nelle porzioni coperte dal rilievo, in modo analogo alla modellazione del patrimonio storico monumentale, dove la sezione della nuvola attraverso tagli consente di estrarre le dimensioni e i profili necessari alla restituzione geometrica (López et al., 2017).

La sequenza operativa di modellazione procede dal basso verso l'alto e dall'esterno verso l'interno, ovvero dal dato di maggiore certezza metrica a quello di minore certezza. Gli elementi dell'involucro esterno, posizionati sulla nuvola di punti, vengono modellati per primi; le partizioni interne, il vano scala e gli elementi degli alloggi seguono, utilizzando come riferimento la documentazione d'archivio nelle porzioni non coperte dal rilievo. Quando un elemento ricade in una zona coperta da entrambe le fonti, la nuvola di punti ha la precedenza per il posizionamento e il dimensionamento complessivo, mentre la documentazione d'archivio interviene per le informazioni che il rilievo non restituisce con sufficiente dettaglio, come la composizione stratigrafica delle

murature o le quote di elementi costruttivi di dimensioni ridotte, per i quali la risoluzione della nuvola non garantisce un dato affidabile.

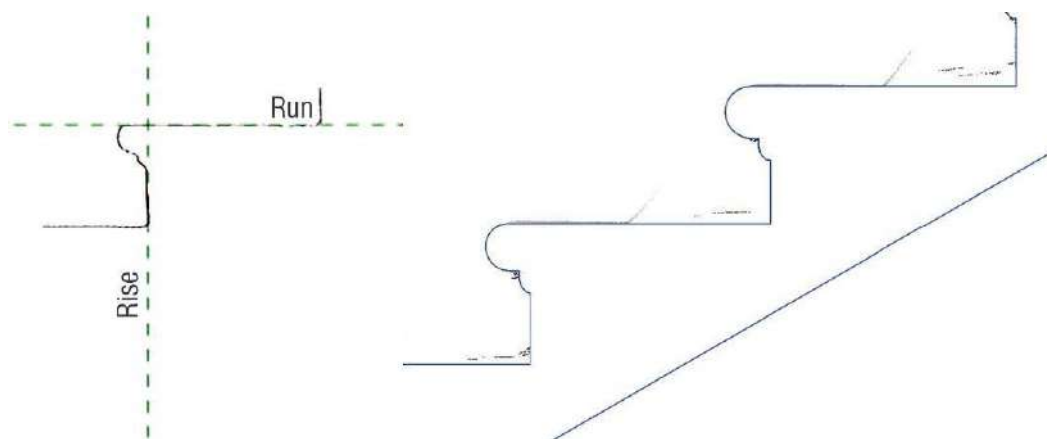
Per rendere la provenienza del dato geometrico esplicita e interrogabile all'interno del modello, è stato introdotto un parametro condiviso denominato "Fonte_Dati", applicato a tutte le categorie di elementi, con due valori possibili: "Rilievo" per gli elementi la cui geometria deriva dalla nuvola di punti e "Archivio" per quelli ricostruiti sulla base della documentazione grafica. Questo parametro consente la creazione di filtri vista con codice colore, applicabili a tutte le tipologie di vista (piante, sezioni, prospetti, viste tridimensionali), che rendono leggibile la provenienza del dato in qualsiasi elaborato estratto dal modello. La creazione dei filtri nell'ambiente di authoring ha implicazioni dirette sulla comunicazione del risultato, poiché le impostazioni cromatiche definite in questa fase vengono ereditate dalla piattaforma di condivisione. La dichiarazione esplicita della fonte è un requisito irrinunciabile nei processi HBIM applicati a edifici parzialmente accessibili, poiché il grado di affidabilità geometrica del modello non è omogeneo: le parti rilevate con laser scanner presentano un'accuratezza dell'ordine dei millimetri, mentre le parti ricostruite da archivio incorporano le incertezze proprie della documentazione originale, tra cui eventuali varianti in corso d'opera, imprecisioni grafiche e trasformazioni successive non documentate.

La piattaforma Autodesk Revit organizza gli elementi del modello in tre tipologie di famiglie. Le famiglie di sistema, tra cui muri, solai, tetti e scale, sono oggetti predefiniti nel template di progetto, parametrizzabili in termini di spessore, stratigrafia, materiale e vincoli geometrici, ma non esportabili come file autonomi. Le famiglie caricabili, modellate in file esterni attraverso il Family Editor a partire dalle misure ricavate dai disegni d'archivio e dalla nuvola di punti, offrono la massima flessibilità nella definizione di geometrie specifiche e possono essere riutilizzate in progetti diversi, costituendo il nucleo delle librerie HBIM (López et al., 2017). Le famiglie locali sono riservate a elementi unici e non replicabili. L'edilizia residenziale pubblica del secondo Novecento, caratterizzata da un repertorio costruttivo relativamente standardizzato, consente nella maggior parte dei casi l'impiego di famiglie di sistema opportunamente configurate. Il

ricorso a famiglie caricabili personalizzate si rende necessario per quegli elementi che non trovano corrispondenza nelle librerie standard, come pilastri a sezione variabile, travi con profili sagomati, tettoie, o componenti specifici del linguaggio architettonico dei singoli progettisti.

La scelta della tipologia di famiglia per ciascun elemento è una decisione progettuale che incide sulla struttura del modello e sulla sua gestibilità nel tempo. Il protocollo adottato non formalizza a priori un albero decisionale rigido, ma si fonda su un criterio che si è consolidato nel corso della sperimentazione e che può essere ricondotto a tre condizioni. Se un elemento costruttivo è riducibile a un'estrusione, una sweep o una combinazione di operazioni parametriche standard, e corrisponde a una categoria nativa del software (muro, solaio, tetto, scala), la modellazione avviene attraverso una famiglia di sistema con tipo personalizzato. Se l'elemento possiede un ruolo costruttivo specifico e una geometria che eccede le possibilità delle famiglie di sistema ma è comunque descrivibile in termini parametrici, viene modellato come famiglia caricabile nel Family Editor

(Fig. 54).



*Fig. 54 - Costruzione di una famiglia personalizzata a partire dal profilo estratto da una nuvola di punti.
(Buldo,2023)*

Se la geometria dell'elemento eccede le possibilità della modellazione parametrica nativa, in particolare per componenti a tessitura complessa, profili curvi e dimensioni ridotte, la modellazione avviene in un ambiente esterno, nella presente ricerca Rhinoceros, e il componente viene importato nel progetto Revit in formato .sat, inserito come modello generico all'interno di una nuova famiglia. La complessità geometrica degli edifici può variare in modo significativo in funzione del repertorio costruttivo e del linguaggio architettonico del progettista: edifici con un repertorio regolare e standardizzato possono essere modellati interamente con famiglie di sistema, mentre edifici con elementi a forte connotazione stilistica richiedono un numero maggiore di famiglie personalizzate e un impegno di modellazione proporzionalmente superiore.

Per i componenti importati da ambienti esterni è necessario garantire che la semantica dell'elemento sia preservata all'interno del modello finale, nonostante la perdita del comportamento parametrico nativo. La procedura prevede l'importazione del file .sat nell'origine di una nuova famiglia Revit, alla quale vengono successivamente assegnati i parametri condivisi del workflow e la classificazione UNI 8290 coerente con la funzione costruttiva dell'elemento. In questo modo, il componente risulta interrogabile, filtrabile e classificabile al pari degli elementi modellati parametricamente, anche se la sua geometria non è modificabile attraverso i parametri della famiglia. La scelta di ricorrere alla modellazione esterna va dichiarata e motivata nel modello, tenendo conto che il criterio discriminante è di ordine semantico-funzionale, per cui un elemento caratterizzante l'edificio per funzione costruttiva va modellato come famiglia Revit parametrizzata, mentre un elemento caratterizzante per morfometria o stile, non riducibile alla logica parametrica standard, può essere importato come componente esterno (Martinelli et al., 2022).

Nel corso della modellazione, il confronto continuo tra le due fonti fa emergere difformità tra il progetto originale e lo stato di fatto rilevato, difformità che la fase di *data coordination* ha già mappato nel registro delle discrepanze. Il criterio operativo per la loro gestione è che dove il dato di rilievo è disponibile, la modellazione riproduce lo

stato di fatto rilevato; dove il rilievo non è disponibile, la modellazione segue la documentazione d'archivio, con il livello di affidabilità dichiarato attraverso il parametro *Fonte_Dati* e verificato nella fase di *quality control*. Per le porzioni in cui è stato possibile accedere a un alloggio campione e lo stato di fatto presenta alterazioni rispetto al progetto originale, la modellazione riproduce la configurazione rilevata anziché quella progettata, documentando la discrepanza nei parametri informativi dell'elemento. La distinzione tra dato rilevato e dato ricostruito non configura una gerarchia qualitativa tra le porzioni del modello, ma una differenziazione del livello di verifica a cui ciascuna porzione è stata sottoposta.

Il livello di dettaglio geometrico della modellazione è concepito in modo uniforme per tutte le porzioni del modello, indipendentemente dalla fonte dei dati. Ciò che varia non è la granularità della rappresentazione, ma il grado di affidabilità dichiarato, espresso attraverso il framework LoA/LoQ/LoR descritto nel par. 7.2.9. Questa scelta garantisce che il modello risulti strutturalmente omogeneo e leggibile nella sua interezza, senza che le porzioni ricostruite da archivio appaiano come schematizzazioni incomplete, e al contempo rende trasparente il diverso fondamento conoscitivo delle parti. La gestione esplicita dell'incertezza è riconosciuta come priorità metodologica irrinunciabile nei processi HBIM, poiché il controllo del livello di incertezza costituisce la premessa per qualsiasi utilizzo affidabile del modello nel tempo (Mazzei et al., 2024).

L'output della fase di *BIM authoring* è un modello geometricamente definito, in cui ogni componente è classificato per fonte di derivazione e predisposto per l'arricchimento semantico descritto nella fase successiva. I filtri vista configurati rendono leggibile a colpo d'occhio la distribuzione tra porzioni reality-based e porzioni model-based, fornendo una mappa immediata della provenienza del dato che accompagna il modello in tutte le fasi successive del workflow.

7.2.8. Data integration

La fase di *data integration* completa il modello geometrico prodotto nella fase precedente con un apparato di proprietà alfanumeriche, riferimenti documentali e collegamenti a risorse esterne che trasformano ciascun elemento digitale nel contenitore di un insieme organizzato di informazioni. In un contesto di gestione patrimoniale come quello dell'edilizia residenziale pubblica, dove l'ente gestore necessita di informazioni aggiornate e strutturate per pianificare interventi manutentivi e di riqualificazione, la capacità di associare a ciascun componente dati relativi alle caratteristiche fisiche, alla storia costruttiva e alla relazione con le fonti documentarie originali è ciò che rende il modello BIM uno strumento operativo (Potestà, 2020).

L'arricchimento semantico del modello avviene attraverso la creazione di parametri condivisi, definiti in un file di testo esterno (.txt) e applicati trasversalmente a tutte le categorie di elementi presenti nel progetto (Fig. 55).

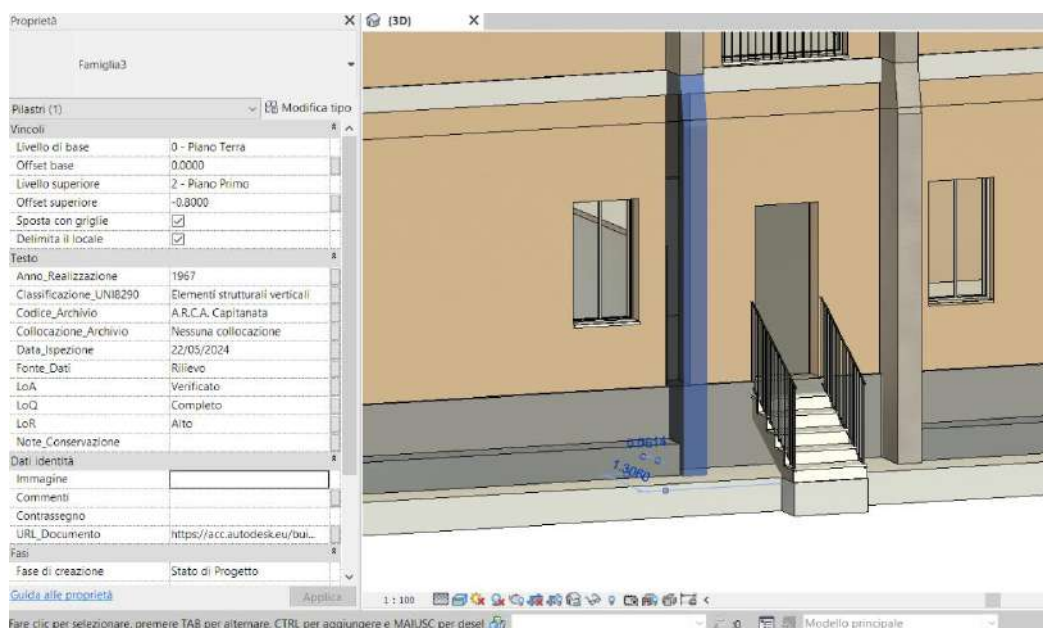


Fig. 55 - Ispezione dei parametri di un elemento del modello BIM.

Questa scelta garantisce l'uniformità della struttura informativa e la possibilità di interrogare il modello attraverso abachi e filtri parametrici. I parametri personalizzati sono organizzati in gruppi tematici coerenti con i requisiti informativi dichiarati nella fase di *analysis of model uses*. Un primo gruppo riguarda l'anagrafica costruttiva e raccoglie informazioni sul materiale prevalente, sulla tecnica costruttiva, sull'epoca di realizzazione e, dove documentata, sugli interventi successivi. Un secondo gruppo contiene i riferimenti archivistici, ovvero il codice identificativo del documento d'archivio da cui è stato desunto il dato geometrico o informativo, la collocazione archivistica e la data del documento. Questa granularità consente di risalire dalla geometria del componente digitale alla fonte cartacea originale conservata negli archivi dell'ente. Un terzo gruppo raccoglie i parametri relativi alla classificazione, comprendendo la classificazione secondo la norma UNI 8290, il parametro Fonte_Dati (con i valori "Rilievo" o "Archivio") e i parametri di affidabilità LoA, LoQ e LoR previsti dalla fase di *quality control*. La struttura parametrica è inoltre predisposta per accogliere informazioni relative allo stato di conservazione degli elementi e alla storia manutentiva, che nella maggior parte dei casi resteranno inizialmente vuoti poiché il modello è concepito come contenitore che l'ente gestore può popolare nel tempo senza modificare la struttura informativa del progetto.

La tabella seguente riporta le corrispondenze tra le categorie di elementi adottate nel workflow e i tre livelli di classificazione previsti dalla norma UNI8290.

Categoria	Classe di unità tecnologica	Unità tecnologica	Classe di elemento tecnico
Murature esterne	Chiusura	Chiusura verticale	Pareti perimetrali verticali
Murature interne	Partizione interna	Partizione interna verticale	Pareti interne verticali
Solai	Partizione interna	Partizione interna orizzontale	Solai
Coperture	Chiusura	Chiusura superiore	Coperture

Elementi strutturali verticali	Struttura	Struttura di elevazione	Pilastrì
Finestre	Chiusura	Chiusura verticale	Infissi esterni verticali
Porte esterne	Chiusura	Chiusura verticale	Infissi esterni verticali
Porte interne	Partizione interna	Partizione interna verticale	Infissi interni verticali
Elementi marcapiano / cornici	Chiusura	Chiusura verticale	Elementi di protezione
Parapetti / ringhiere	Chiusura	Chiusura verticale	Elementi di protezione
Scale	Partizione interna	Partizione interna inclinata	Scale interne
Fondazioni	Struttura	Struttura di fondazione	Strutture di fondazione dirette
Controsoffitti	Partizione interna	Partizione interna orizzontale	Controsoffitti
Rampe	Partizione interna	Partizione interna inclinata	Rampe interne

La tabella seguente riporta l'elenco completo dei parametri condivisi previsti dal workflow, con il tipo di dato, la descrizione, il grado di obbligatorietà e lo stato di compilazione nella fase attuale della ricerca.

Parametro	Tipo di dato	Descrizione	Stato
Fonte_Dati	Testo	Indica se la geometria dell'elemento deriva da un rilievo strumentale ("Survey") o da una ricostruzione basata sulla documentazione d'archivio ("Archive"). Consente la creazione di filtri di visualizzazione con codifica a colori per rendere leggibile la provenienza dei dati in qualsiasi elaborato estratto dal modello.	Attivo
Anno_Realizzazione	Misto	Anno di costruzione dell'elemento, ricavato dalla documentazione d'archivio o dalle relazioni tecniche di progetto.	Attivo

Classificazione_UNI8290	Testo	Classificazione dell'elemento secondo la norma UNI 8290-1:1981, espressa nella forma "Classe di unità tecnologica / Unità tecnologica / Classe di elementi tecnici" (ad es. "Chiusura / Chiusura verticale / Pareti perimetrali verticali"). Consente l'interrogazione del modello per categorie funzionali e la verifica della copertura della classificazione.	Attivo
Codice_Archivio	Testo	Codice identificativo del documento d'archivio da cui sono stati ricavati i dati geometrici o informativi dell'elemento, secondo la convenzione di codifica adottata nell'ACDat / CDE (ad es. CS02_TAV_001_v01).	Attivo
Collocazione_Archivio	Testo	Collocazione archivistica del documento di riferimento, strutturata in base al fondo consultato (ad es. "Archivio A.R.C.A. / Fondo ISES / Fascicolo 1519"). Consente di risalire dalla geometria del componente digitale alla fonte cartacea originale.	Attivo
URL_Documento	URL	Collegamento diretto al documento d'archivio memorizzato nel cloud del CDE (Autodesk Forma Data Management). Consente l'accesso alla documentazione originale direttamente dall'ambiente di modellazione.	Attivo
Stato_Conservazione	Testo	Stato di conservazione dell'elemento al momento del sopralluogo, espresso tramite un vocabolario controllato: "Buono", "Discreto", "Scarso", "Pessimo", "Non ispezionato". Quest'ultimo valore si applica agli elementi situati in zone d'ombra per i quali non è stato possibile effettuare un'ispezione diretta.	Attivo
Note_Conservazione	Testo	Breve descrizione del degrado osservato durante il sopralluogo. Compilato solo per gli elementi ispezionati direttamente.	Attivo
Data_Ispezione	Testo	Data del sopralluogo in cui è stato registrato lo stato di conservazione dell'elemento.	Attivo
LoA	Testo	Livello di accuratezza (Level of Accuracy). Per gli elementi basati sul rilievo della realtà (reality-based), valore numerico dello scostamento medio in millimetri derivante dall'analisi delle deviazioni (ad es. "8 mm"). Per gli elementi basati sul modello	Attivo

		d'archivio, indicazione testuale della condizione di verifica: "Verificato indirettamente" se il disegno d'archivio è stato validato durante la fase di coordinamento dei dati, "Non verificabile" in caso contrario.	
LoQ	Testo	Livello di qualità (Level of Quality). Valutazione della completezza del set parametrico e documentale rispetto ai requisiti dichiarati: "Completo" se tutti i parametri obbligatori sono compilati e il collegamento URL è funzionante, "Parziale" se mancano alcuni parametri, "Minimo" se sono compilati solo Fonte_Dati e Classificazione_UNI8290.	Attivo
LoR	Testo	Livello di affidabilità (Level of Reliability). Sintesi delle due dimensioni precedenti: "Alto" se la geometria è verificata (entro la tolleranza o indirettamente) e il set informativo è completo, "Medio" se una delle due dimensioni è parzialmente soddisfatta, "Basso" se la geometria non è verificabile o il set è minimo.	Attivo
Materiale_Prevalente	Testo	Materiale da costruzione predominante dell'elemento, descritto utilizzando la terminologia delle fonti d'archivio (ad es. "blocchi di tufo squadrate", "mattoni pieni UNI", "cemento armato"). Questo parametro integra i dati generici sui materiali del software con le informazioni storico-costruttive specifiche dell'edificio.	Pianificato
Tecnica_Costruttiva	Testo	Descrizione della tecnica costruttiva dell'elemento secondo la documentazione d'archivio (ad es. "muratura portante in mattoni con malta di calce", "telaio in cemento armato con tamponamento in mattoni a cassetta").	Pianificato
Intervento_Precedente	Testo	Breve descrizione di eventuali interventi di manutenzione o trasformazione subiti dall'elemento nel corso della vita dell'edificio (ad es. "rifacimento intonaco esterno", "sostituzione infissi").	Pianificato
Data_Intervento	Testo	Data del precedente intervento, se documentata.	Pianificato

I parametri sono applicati trasversalmente a tutte le categorie di elementi presenti nel progetto, comprese categorie non direttamente coinvolte nella modellazione degli elementi costruttivi (griglie, livelli, viste, planimetria). Questa scelta consente di associare la documentazione d'archivio di carattere generale, come tavole d'insieme e planimetrie complessive, a elementi del modello che rappresentano l'intero livello o l'intera vista, rispondendo alla condizione frequente in cui un singolo elaborato d'archivio informa più componenti dell'edificio e non è riconducibile a un unico elemento costruttivo.

Il collegamento tra gli elementi del modello e la documentazione esterna (disegni d'archivio digitalizzati, fotografie storiche e attuali, relazioni tecniche) avviene attraverso parametri di tipo URL che puntano ai file archiviati nel CDE cloud-based. L'operatore copia il collegamento URL del documento dalla piattaforma CDE e lo inserisce nel parametro corrispondente dell'elemento BIM, stabilendo una connessione diretta tra l'oggetto tridimensionale e la fonte documentaria che ne ha informato la modellazione. La logica di assegnazione dei collegamenti segue un criterio di pertinenza. Un dettaglio costruttivo specifico (ad esempio il dettaglio di un pilastro o di un solaio) viene collegato al singolo elemento o alla singola famiglia che descrive, mentre una tavola di carattere generale (ad esempio una pianta del piano tipo) viene collegata al livello corrispondente o a un gruppo di elementi inclusi nell'elaborato. In questo modo ciascun elemento del modello consente l'accesso diretto alla documentazione d'archivio corrispondente senza richiedere consultazioni separate, riprendendo sul piano metodologico l'approccio già sperimentato per l'architettura contemporanea, dove il modello parametrico è stato utilizzato come sistema di archiviazione documentale collegato a fondi archivistici distribuiti (Conte & Rossi, 2019).

Per le operazioni ripetitive di compilazione dei parametri e di collegamento documentale, il workflow prevede la possibilità di utilizzare Dynamo for Revit, l'ambiente di visual programming integrato nella piattaforma di modellazione. Gli script Dynamo consentono di popolare in modo massivo i parametri condivisi a partire da

fogli di calcolo esterni contenenti le schede informative compilate durante le fasi di *data collection* e di analisi archivistica, e di generare automaticamente i collegamenti URL sulla base delle convenzioni di codifica coerenti con la struttura dell'archivio digitale nel CDE (Salzano et al., 2023; Moyano et al., 2023). L'adozione di questi strumenti di automazione non è un requisito vincolante del workflow, poiché le medesime operazioni possono essere eseguite manualmente; la loro integrazione nel processo è prevista per garantire la scalabilità del metodo quando il numero di edifici da documentare cresca oltre la dimensione del singolo caso studio, come nel caso di un ente che gestisca un patrimonio distribuito su scala provinciale.

L'esito della fase di *data integration* è un modello in cui la componente geometrica e quella informativa risultano integrate in modo che ogni elemento è simultaneamente una rappresentazione spaziale e un nodo di un sistema informativo, interrogabile attraverso gli strumenti nativi della piattaforma (abachi, filtri, viste tematiche) o esportabile in formati tabellari per analisi esterne.

7.2.9. *Quality control*

La fase di *quality control* verifica la coerenza geometrica del modello BIM rispetto ai dati di rilievo e dichiara il livello di affidabilità della rappresentazione digitale, tanto per le parti reality-based quanto per quelle model-based. La validazione accompagna la modellazione come processo iterativo che, in caso di esito non soddisfacente, richiede l'aggiustamento degli elementi fino al raggiungimento delle tolleranze stabilite nella fase di *analysis of model uses*. La modellazione parametrica introduce inevitabilmente uno scarto tra la complessità del costruito reale e la semplificazione imposta dalla logica degli oggetti BIM (Brusaporci et al., 2023), e la misura di questo scarto, insieme alla sua valutazione in rapporto agli scopi della rappresentazione, costituisce l'oggetto della fase di controllo.

Il workflow prevede due ambiti di verifica, ovvero l'accuratezza morfometrica, che confronta la geometria del modello con il dato metrico del rilievo, e la qualità informativa, che controlla la completezza e la coerenza del corredo parametrico e documentale associato agli elementi.

Lo strumento primario per la verifica dell'accuratezza morfometrica è Autodesk Point Layout, un plug-in integrato nell'ambiente di modellazione che opera attraverso un'analisi di tipo point-to-face. Per ciascun punto della nuvola compreso nell'area di analisi, viene calcolata la distanza minima dalla faccia più vicina dell'elemento BIM, utilizzando la proiezione ortogonale del punto sul piano della faccia quando la proiezione cade all'interno della superficie, oppure la distanza dal bordo più prossimo negli altri casi. Il risultato è una mappa cromatica sovrapposta al modello tridimensionale, in cui le diverse fasce di colore corrispondono a intervalli di deviazione espressi in millimetri (Fig. 56). L'operatore definisce le soglie degli intervalli in funzione delle tolleranze dichiarate per ciascuna categoria di elementi nella fase di *analysis of model uses*: ± 10 mm per gli elementi strutturali verticali, ± 20 mm per le murature, i solai, le coperture e gli elementi marcapiano, ± 30 mm per le aperture. La mappa consente una lettura immediata della distribuzione spaziale degli scostamenti e l'individuazione degli elementi che necessitano di correzione geometrica. L'accuratezza della nuvola di punti utilizzata come riferimento dipende dalle specifiche dello strumento di rilievo impiegato e dalle condizioni di acquisizione, e la valutazione della deviazione deve tenere conto di questa variabile.

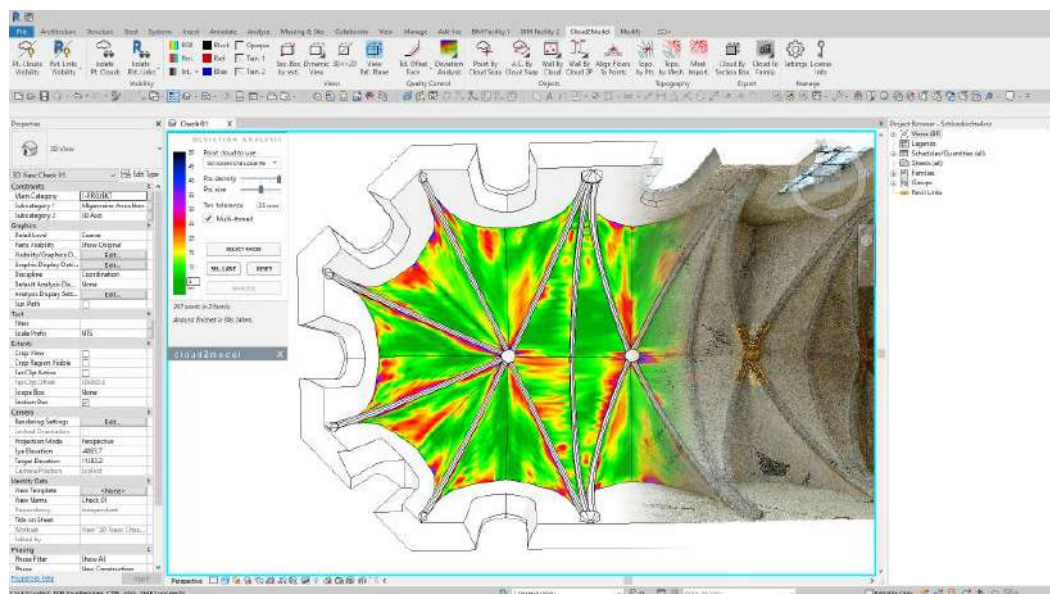


Fig. 56 - Analisi della deviazione effettuata in Revit attraverso il plugin Cloud2Model. (BIM Facility AG)

Un'ulteriore possibilità di verifica è offerta da CloudCompare, software open-source che consente un'analisi cloud-to-mesh indipendente dall'ambiente di modellazione. La procedura consiste nell'esportazione del modello BIM in formato .obj e nella sua importazione in CloudCompare insieme alla nuvola di punti originale. L'algoritmo calcola, per ciascun punto della nuvola, la distanza minima dalla superficie triangolata del modello (Cignoni et al., 1998), producendo una mappa cromatica analoga a quella di Point Layout con il vantaggio di operare in un ambiente software indipendente e con parametri di analisi interamente configurabili dall'operatore, compresa la possibilità di applicare filtri statistici per escludere outlier e di ottenere distribuzioni delle deviazioni con indicazione di media, deviazione standard e RMS. Il ricorso a CloudCompare non è obbligatorio nel workflow, ma costituisce un'opzione di controllo incrociato che rafforza la validità dell'analisi condotta nell'ambiente di modellazione.

La verifica della qualità informativa opera sul corredo parametrico e documentale associato agli elementi e i controlli sono deducibili direttamente dai LOIN dichiarati. La

verifica riguarda la presenza nel modello di tutti gli elementi previsti per ciascuna categoria, la compilazione effettiva dei parametri informativi dichiarati come obbligatori (materiale, tecnica costruttiva, anno, classificazione UNI 8290, Fonte_Dati), il collegamento corretto e funzionante dei parametri URL ai documenti d'archivio nel CDE, l'univocità della denominazione di ciascun elemento secondo la convenzione di codifica adottata nel progetto, e la corretta applicazione del sistema di classificazione UNI 8290⁵⁴. La verifica si avvale degli abachi di Revit, che consentono l'interrogazione parametrica del modello e l'estrazione tabellare dei dati associati a ciascuna categoria di elementi; un abaco filtrato sui parametri obbligatori evidenzia i campi non compilati o incoerenti, e un abaco sul codice di classificazione UNI 8290 consente la verifica della copertura e dell'uniformità dell'attribuzione funzionale.

I due ambiti di verifica confluiscono nel framework di affidabilità articolato in tre dimensioni (Maiezza, 2019), ovvero il Level of Accuracy (LoA), che misura l'accuratezza geometrica attraverso l'analisi della deviazione, il Level of Quality (LoQ), che valuta la qualità del corredo parametrico e documentale, e il Level of Reliability (LoR), che sintetizza le due dimensioni precedenti in un giudizio complessivo sull'affidabilità dell'elemento digitale (Fig. 57).

⁵⁴ Le classificazioni UNI 8290 adottate nel workflow per le categorie di elementi modellati sono: murature esterne (Chiusura / Chiusura verticale / Pareti perimetrali verticali), murature interne (Partizione interna / Partizione interna verticale / Pareti interne verticali), solai (Partizione interna / Partizione interna orizzontale / Solai), coperture (Chiusura / Chiusura superiore / Coperture), elementi strutturali verticali (Struttura / Struttura di elevazione / Pilastri), finestre e porte esterne (Chiusura / Chiusura verticale / Infissi esterni verticali), porte interne (Partizione interna / Partizione interna verticale / Infissi interni verticali), elementi marcapiano e cornici (Chiusura / Chiusura verticale / Elementi di protezione), scale (Partizione interna / Partizione interna inclinata / Scale interne).

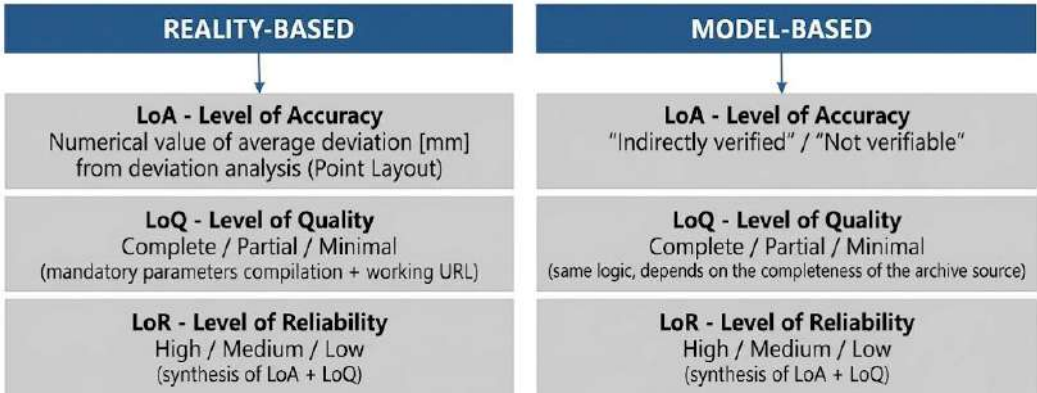


Fig. 57 - Diagramma esplicativo del processo di assegnazione LoA, LoQ e LoR.

Nel contesto del workflow Archive+Scan-to-BIM questa tripartizione agisce come dichiarazione puntuale per ciascun elemento, coerentemente con l'impostazione LOIN adottata. Gli elementi reality-based, modellati sulla nuvola di punti, presentano un LoA verificabile attraverso l'analisi della deviazione e un LoQ fondato su fonti dirette. Gli elementi model-based, ricostruiti da disegni d'archivio, presentano un LoA non calcolabile in assenza di dati di rilievo di confronto e un LoQ che dipende dalla natura e dalla completezza della documentazione utilizzata, con la necessità di distinguere tra fonti di scala adeguata (elaborati esecutivi a 1:50 o superiore), fonti parziali (piante a 1:100) e ipotesi ricostruttive dichiarate.

Nel workflow Archive+Scan-to-BIM, il LoA degli elementi reality-based è espresso come valore numerico della deviazione media in millimetri, ricavato dalla deviation analysis e confrontato con le tolleranze dichiarate nella fase di *analysis of model uses*; il LoA degli elementi model-based è espresso in forma testuale, distinguendo tra elementi il cui disegno d'archivio di riferimento è stato validato nella fase di *data coordination* attraverso il confronto con le porzioni accessibili ("verificato indirettamente") e elementi per i quali tale confronto non è stato possibile ("non verificabile"). Il LoQ è valutato sulla base della completezza del corredo parametrico rispetto ai requisiti informativi dichiarati per ciascuna categoria, distinguendo tre

condizioni: compilazione completa di tutti i parametri obbligatori con collegamento documentale funzionante ("completo"), compilazione parziale ("parziale"), o compilazione minima limitata alla sola classificazione e alla fonte del dato ("minimo"). Il LoR sintetizza le due dimensioni in un giudizio complessivo che distingue tra affidabilità alta (geometria verificata entro le tolleranze e corredo completo), media (una delle due dimensioni parzialmente soddisfatta) e bassa (geometria non verificabile o corredo minimo).

La dichiarazione del livello di affidabilità è resa operativa all'interno del modello attraverso i parametri condivisi dedicati (LoA, LoQ, LoR) descritti nella fase di *data integration*, associati a ciascun elemento e rappresentabili graficamente tramite filtri vista con codice cromatico. In questo modo ogni elaborato estratto dal modello comunica simultaneamente la geometria dell'edificio e il grado di attendibilità della rappresentazione.

7.2.10. openBIM export

La fase conclusiva del workflow riguarda l'esportazione del modello in formati aperti e interoperabili e la sua condivisione all'interno dell'ambiente di gestione dei dati previsto dal workflow. Le due operazioni rispondono a esigenze distinte: l'esportazione in formato aperto garantisce che il modello sia leggibile da piattaforme diverse da quella di modellazione, mentre la condivisione attraverso il CDE cloud (Fig. 58) consente ai soggetti coinvolti nella gestione del patrimonio edilizio di accedere direttamente al modello e alla documentazione associata, con i permessi e i ruoli definiti dall'ente gestore.

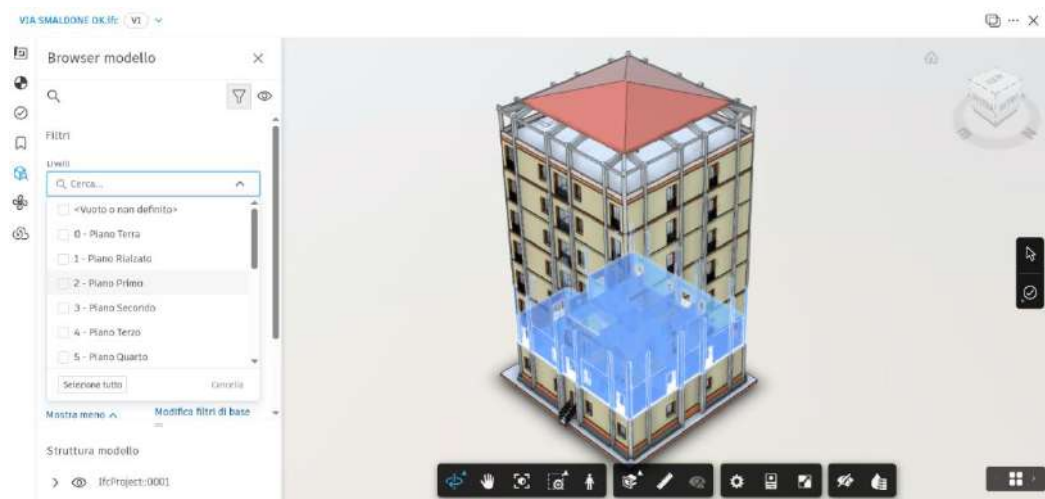


Fig. 58 - Visualizzazione del modello BIM all'interno del CDE Autodesk Forma.

Il formato di riferimento per l'interoperabilità BIM è l'Industry Foundation Classes (IFC), lo standard aperto sviluppato da buildingSMART International per consentire lo scambio di dati tra piattaforme software diverse. L'esportazione da Autodesk Revit in formato IFC è supportata nativamente dalla piattaforma, ma comporta una riclassificazione degli elementi secondo lo schema semantico IFC che non sempre coincide con la struttura delle famiglie e delle categorie definite nell'ambiente di modellazione. Le famiglie di sistema (muri, solai, coperture) trovano generalmente una corrispondenza diretta nelle classi IFC (*IfcWall*, *IfcSlab*, *IfcRoof*), mentre le famiglie caricabili personalizzate e le famiglie locali possono essere mappate in modo meno preciso, con il rischio di una perdita di classificazione semantica. I parametri condivisi vengono esportati come property set personalizzati (*IfcPropertySet*), ma la loro leggibilità da parte dei software riceventi dipende dalla capacità di ciascuna piattaforma di interpretare i set di proprietà non standard. Le geometrie complesse, in particolare quelle modellate esternamente e importate nel progetto, possono subire semplificazioni nella conversione e devono essere verificate attraverso un confronto visivo tra il modello nativo e il file IFC esportato. Sul piano della resa visiva, il formato IFC non conserva le texture applicate ai materiali nell'ambiente di modellazione; l'assegnazione di colori realistici ai materiali

consente tuttavia di mantenere un livello di caratterizzazione materica sufficiente alla lettura dell'edificio. È inoltre opportuno considerare che i collegamenti URL ai documenti archiviati nel CDE, descritti nella fase di *data integration*, si configurano come riferimenti interni alla piattaforma cloud e non come parametri incorporati nel file IFC; in caso di download del modello al di fuori dell'ambiente CDE, i collegamenti alla documentazione d'archivio non risultano disponibili.

L'integrazione tra modelli BIM e sistemi informativi geografici costituisce una dimensione rilevante dell'interoperabilità, in particolare per un workflow destinato alla gestione patrimoniale di edifici distribuiti sul territorio. La georeferenziazione del modello, descritta operativamente nella fase di *data coordination*, predispone il prodotto digitale al dialogo con ambienti GIS. Il passaggio dal formato IFC ai formati propri dell'ambiente GIS comporta problematiche legate alla differenza tra i due modelli semantici, poiché il livello di dettaglio architettonico del BIM, fino al singolo componente edilizio, non trova corrispondenza diretta nella struttura a livelli di dettaglio tipica degli ambienti geospaziali; la conversione richiede strumenti di mediazione dedicati e presenta criticità sia sul piano geometrico, nella trasformazione da modelli solidi a modelli di superficie, sia sul piano semantico, nella corrispondenza tra classi IFC e entità CityGML (Matrone et al., 2019; Tan et al., 2023). Il workflow tiene conto di questa prospettiva e struttura il modello in modo da rendere possibile, in fase di sviluppo successivo, l'integrazione con software GIS a scala territoriale.

La piattaforma CDE prevista dal workflow per la gestione e la condivisione del modello è Autodesk Forma Data Management, ambiente cloud-based che funziona come Common Data Environment conformemente alla norma ISO 19650-1:2018 e consente ai soggetti autorizzati di accedere al modello, alla documentazione associata e agli elaborati estratti direttamente dal browser, senza necessità di software di modellazione. La scelta di questa piattaforma è coerente con l'ecosistema software già adottato per la modellazione, ma il workflow è concepito con una struttura aperta, il modello esportato in formato IFC è importabile in qualsiasi CDE conforme agli standard

buildingSMART (Trimble Connect, usBIM o soluzioni equivalenti), e la georeferenziazione del modello lo rende compatibile con ambienti GIS per analisi a scala urbana e territoriale. Questa apertura non vincola l'ente gestore a un unico fornitore e consente l'adozione progressiva di strumenti più avanzati in funzione dell'evoluzione delle competenze digitali e delle infrastrutture informatiche disponibili.

8. CASI STUDIO E APPLICAZIONE DEL WORKFLOW

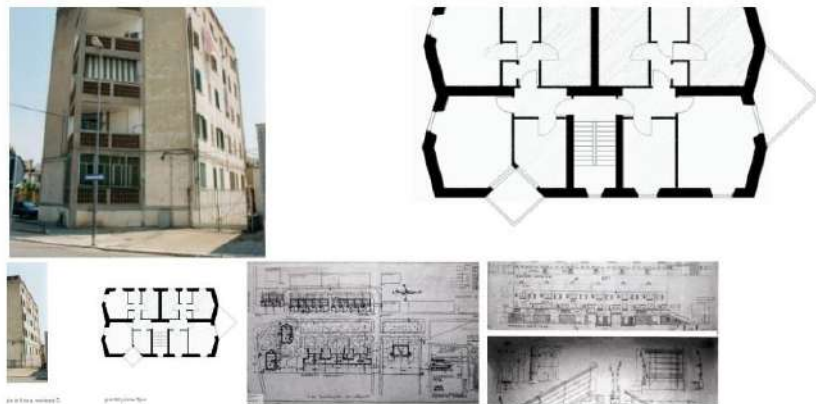
8.1 Criteri di selezione dei casi studio

La scelta dei casi studio su cui applicare il workflow Archive+Scan-to-BIM ha risposto a un insieme di criteri convergenti, definiti in modo da garantire la significatività scientifica della sperimentazione e la sua replicabilità in contesti analoghi. Tali criteri intrecciano la rilevanza patrimoniale degli edifici, la loro rappresentatività tipologica, l'accessibilità delle fonti archivistiche e la possibilità di un confronto nazionale. Di seguito si illustra come ciascuno di essi abbia orientato la selezione dei quattro edifici oggetto di studio.

Un primo requisito è stato il riconoscimento istituzionale del valore architettonico degli edifici candidati. Per i casi italiani, il punto di partenza è stato il “Censimento delle Architetture italiane dal 1945 ad oggi”, promosso dalla Direzione Generale Creatività Contemporanea del Ministero della Cultura, che cataloga opere ritenute significative per qualità progettuale, rilevanza nel contesto urbano e rappresentatività delle correnti architettoniche del secondo Novecento. La consultazione delle schede relative alla provincia di Foggia ha consentito di individuare un numero circoscritto di architetture censite, tra le quali figurano il complesso ISES di via Smaldone a Foggia e interventi nel territorio di Cerignola, entrambi caratterizzati dalla firma di progettisti di rilievo nazionale (Fig. 59). Va osservato che, tra i capoluoghi pugliesi, Foggia presenta appena dieci architetture censite, un numero esiguo se confrontato con Bari (78), Taranto (35) o Lecce (31), e che l'ultimo edificio schedato risale ai primi anni Ottanta, circostanza che rende ancora più urgente l'attività di documentazione sugli edifici già riconosciuti.

[Home](#) > [Ricerca Opere](#) > [CANTIERE INA-CASA/1 CLEONIA](#)

Scheda Opera



Data: 1953 - 1955
Tipologia: bollo a rotondele pubblica
Autori principale: Mario Wolff

[illegible]

Per il caso spagnolo, un ruolo analogo è stato svolto dalla classificazione del Conjunto Balsas de Ebro Viejo come "Conjunto Urbano de Interés"⁵⁵ all'interno del Plan General de Ordenación Urbana di Saragozza del 2002, che ne ha sancito il valore urbanistico e

230

architettonico a livello municipale (Ruiz Palomeque & Rubio del Val, 2006). Tale classificazione ha costituito la base per i successivi programmi di riabilitazione promossi dalla Sociedad Municipal Zaragoza Vivienda, confermando l'interesse istituzionale per la conservazione del complesso.

Al riconoscimento istituzionale si lega strettamente il criterio della firma progettuale. I casi italiani portano la firma di Mario Ridolfi e Wolfgang Frankl, figure centrali dell'architettura italiana del secondo dopoguerra il cui sodalizio professionale, durato oltre quarant'anni, ha prodotto opere riconosciute nell'ambito dell'edilizia residenziale pubblica, della progettazione urbana e dell'architettura civile (Cellini & D'Amato, 2005). Il complesso ISES di Foggia (Fig. 60), realizzato tra il 1964 e il 1969, è composto da sei torri raggruppate in due terzine disposte attorno a un cortile ellittico originariamente attrezzato con sedute, alberi e giochi per bambini.



Fig. 60 - Fotografie del complesso ISES di Foggia scattate durante il sopralluogo effettuato ad aprile 2024.

L'intervento presenta soluzioni compositive e strutturali ricorrenti nella produzione della coppia Ridolfi-Frankl. Elementi come il telaio in calcestruzzo armato a vista, le rastremature dei pilastri e il loggiato di coronamento si ritrovano sia nelle Torri INA-Casa di Viale Etiopia a Roma sia nel Complesso Polifunzionale Fratelli Fontana a Terni. Questa ripetizione di soluzioni formali e tecniche testimonia un linguaggio architettonico coerente e chiaramente riconoscibile all'interno della loro opera. Ridolfi, del resto, ha svolto un ruolo di primo piano anche nella redazione dei manuali INA-Casa e nella definizione delle linee guida progettuali del Piano Fanfani, contribuendo a orientare l'intera produzione dell'edilizia pubblica italiana del dopoguerra (Di Biagi, 2001). Il quartiere INA-Casa di Cerignola (Fig. 61), opera del medesimo gruppo di progettazione, consente di estendere il confronto all'interno della produzione pugliese dei due architetti. Questa produzione è stata oggetto di studi che ne hanno evidenziato la qualità costruttiva e la modernità delle soluzioni adottate nel contesto locale (Faccitondo & Panzini, 2023).



Fig. 61 - Fotografie del Tipo C del quartiere INA-Casa di Cerignola scattate durante il sopralluogo effettuato a settembre 2025.

Per il caso spagnolo, il Conjunto Balsas de Ebro Viejo (1964) è opera di un gruppo di architetti coordinato da García Marco e rappresenta l'intervento di maggiore dimensione e complessità tra quelli realizzati dalla *Obra Sindical del Hogar y Arquitectura*⁵⁶ a

⁵⁶ La Obra Sindical del Hogar y Arquitectura (OSH) fu l'organismo del sindacato verticale franchista incaricato della promozione e costruzione di alloggi a renta limitada in tutta la Spagna tra il 1939 e il 1977. Funzionò come ente

Saragozza, comprendente torri, blocchi lineari e edifici di servizio organizzati secondo i principi dell'urbanistica moderna degli anni Cinquanta e Sessanta (Cervero Sánchez, 2017).

La selezione ha tenuto conto anche della rappresentatività tipologica casi studio. La ricerca, infatti, intende verificare l'applicabilità del workflow su configurazioni edilizie differenti, in particolare la torre e il blocco lineare, che costituiscono le due tipologie ricorrenti nell'edilizia residenziale pubblica del secondo Novecento tanto in Italia quanto in Spagna. Le torri, con la loro complessità volumetrica e la ripetitività dei piani, presentano problemi specifici di rilievo per le facciate con elementi aggettanti e rastremature, mentre i blocchi lineari presentano sviluppi longitudinali che richiedono un numero elevato di stazioni di scansione e una gestione attenta della registrazione delle nuvole di punti. I quattro casi selezionati coprono entrambe le tipologie in entrambi i contesti nazionali, rendendo possibile un confronto incrociato sia tipologico sia geografico. Questa scelta è coerente con quanto proposto per il quartiere "La Martella" a Matera, dove l'applicazione di piattaforme digitali GIS-BIM è stata calibrata sulle diverse tipologie edilizie presenti nell'insediamento neorealista (Pontrandolfi, 2020).

Un criterio di rilievo per la ricerca è la condizione di accessibilità limitata, poiché la presenza degli inquilini nel patrimonio residenziale pubblico impedisce un rilievo integrale degli interni. Il workflow proposto affronta tale lacuna conoscitiva come problema centrale. A differenza degli edifici monumentali, generalmente accessibili nella loro interezza con le opportune autorizzazioni, gli edifici di edilizia residenziale pubblica sono soggetti a vincoli legati alla privacy e alla disponibilità dei residenti, per cui le operazioni di acquisizione risultano parziali. Questa condizione strutturale giustifica l'approccio ibrido Archive+Scan-to-BIM, in cui le porzioni rilevabili vengono documentate tramite scansione laser e le porzioni inaccessibili vengono ricostruite a

attuatore delle politiche abitative statali, operando con fondi pubblici e avvalendosi di architetti inquadrati nei propri uffici tecnici regionali. L'OSH fu responsabile della costruzione di oltre 400.000 alloggi su scala nazionale, e rappresentò in Spagna il corrispettivo funzionale dell'INA-Casa italiana, pur all'interno di un quadro istituzionale autoritario profondamente diverso. Per un inquadramento più ampio si rimanda al par.2.4.

partire dalla documentazione d'archivio. La selezione dei casi ha pertanto privilegiato edifici in cui la parzialità dell'accesso è stata verificata in sede di sopralluogo preliminare e confermata dai tecnici degli enti gestori. L'entità della limitazione è misurabile in termini pratici, infatti nel caso del quartiere INA-Casa di Cerignola, un edificio di cinque piani con due alloggi per piano, il rilievo strumentale ha interessato esclusivamente l'involucro esterno e gli spazi comuni di distribuzione. Tale perimetro d'azione ha circoscritto l'acquisizione metrica diretta alle superfici di facciata e ai vani scala, escludendo la quasi totalità degli ambienti privati, senza alcuna possibilità di accesso alle unità abitative; per il complesso ISES di Foggia, una torre di otto piani con due alloggi per piano, è stato possibile rilevare un solo appartamento campione oltre agli spazi comuni e alla copertura, su un totale di sedici unità abitative; per la torre del Conjunto Balsas de Ebro Viejo (Fig. 62), undici piani con quattro alloggi per piano, il rilievo ha interessato i soli spazi comuni; per i blocchi lineari del medesimo complesso, articolati in sei corpi di fabbrica da cinque piani ciascuno, l'accesso è stato limitato agli spazi esterni e comuni, senza ingresso in alcun alloggio.



Fig. 62 - Fotografie del Tipo a Torre (sinistra) e del Tipo Lineare (destra) del Conjunto Balsas de Ebro Viejo a Saragozza scattate durante i sopralluoghi effettuati a febbraio e marzo 2025.

Il rilievo strumentale degli interni ha interessato un'unità abitativa rappresentativa, scelta come caso studio per la validazione delle informazioni documentali. Tale approccio ha permesso di testare il workflow su una porzione controllata dell'edificio, estendendo poi le logiche costruttive e distributive dedotte dai disegni d'archivio alla restante parte del patrimonio analizzato. Questa proporzione conferma la condizione di accessibilità strutturalmente parziale che il workflow Archive+Scan-to-BIM è concepito per affrontare, e che la letteratura sull'HBIM applicato al patrimonio esistente ha raramente considerato come dato di partenza del processo, concentrandosi piuttosto su edifici integralmente rilevabili.

8.1.1 Data collection

L'applicabilità del workflow dipende quindi dalla disponibilità della documentazione d'archivio, che si integra necessariamente al dato di rilievo. La raccolta delle fonti ha seguito percorsi differenziati per i casi italiani e spagnoli, in funzione del contesto istituzionale e dell'organizzazione degli archivi.

Per i casi italiani, la collaborazione con A.R.C.A. Capitanata si è sviluppata tra settembre 2023 e settembre 2024, distribuita in sei mesi di presenza fisica negli uffici dell'Ente. L'attività ha comportato la consultazione dell'archivio dell'Area Tecnica e dell'archivio dell'Area Patrimonio, il confronto continuativo con il personale tecnico per l'orientamento della ricerca all'interno di fondi privi di inventario sistematico e la definizione congiunta delle priorità di intervento. Sono stati reperiti elaborati grafici originali di progetto (Fig. 63), relazioni tecniche e fotografie di cantiere, seppure in condizioni di conservazione eterogenee e con un'organizzazione prevalentemente cartacea e frammentaria.

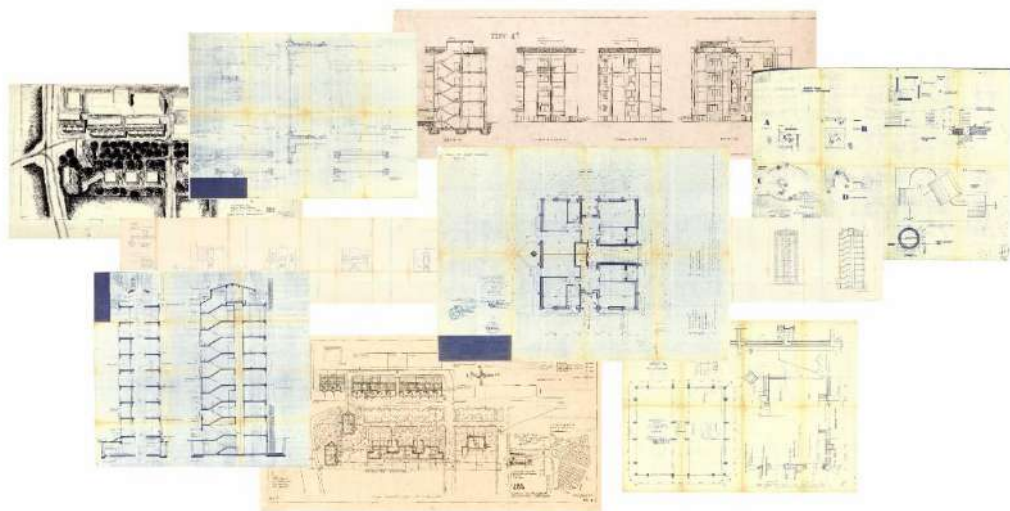


Fig. 63 - Elaborati grafici derivanti dalla collaborazione con A.R.C.A. Capitanata.

La verifica delle fonti è stata estesa anche all'Archivio di Stato di Foggia, che tuttavia non ha restituito documentazione pertinente ai casi studio della ricerca. Lo stato degli archivi di A.R.C.A. riflette una condizione diffusa tra gli enti gestori del patrimonio residenziale pubblico italiano, dove le difficoltà nel censire e gestire il patrimonio immobiliare si sommano a una cronica carenza di risorse dedicate alla digitalizzazione documentale. Un riferimento complementare per lo studio del linguaggio progettuale di Ridolfi e Frankl è costituito dal Fondo Ridolfi-Frankl-Malagricci, conservato presso l'Accademia Nazionale di San Luca⁵⁷, le cui risorse digitali accessibili attraverso il portale online hanno consentito di approfondire la conoscenza della produzione dei due progettisti e di collocare i casi pugliesi all'interno del più ampio repertorio dello studio. La collaborazione con A.R.C.A. ha inoltre svolto un ruolo di mediazione nell'accesso

⁵⁷ Il Fondo Ridolfi-Frankl-Malagricci, conservato presso l'Accademia Nazionale di San Luca, comprende circa 4.450 disegni, 1.400 documenti tra corrispondenza, appunti e relazioni, e circa 4.000 pezzi tra fotografie, negativi e lastre, per un totale di circa 10.000 items relativi ai circa 200 progetti dello studio (1923–1984). Il nucleo è pervenuto all'Accademia in fasi successive a partire dalla fine degli anni Settanta, con atti di donazione formalizzati nel 1980 e nel 1984, ed è stato dichiarato di notevole interesse storico il 30 settembre 1995. L'edizione critica del corpus è in Cellini & D'Amato (2003); il fondo è parzialmente consultabile online all'indirizzo www.fondoridolfi.org.

agli edifici, facilitando il contatto con i residenti e la pianificazione delle campagne di rilievo.

Per i casi spagnoli, la documentazione grafica originale è stata resa disponibile attraverso la collaborazione scientifica con il Dipartimento di Architettura dell'Università di Saragozza, avviata nell'ottobre 2024 e protrattasi fino all'aprile 2025. Il Dipartimento aveva già condotto studi approfonditi sul polígono di Balsas de Ebro Viejo nell'ambito di ricerche sulla rigenerazione urbana dei grandi complessi residenziali degli anni Sessanta e Settanta, e disponeva di elaborati grafici raccolti nel corso di quelle indagini (Fig. 64) (Cervero Sánchez, 2017; Cervero Sánchez, 2022; Díez & Lampreave, 2015).

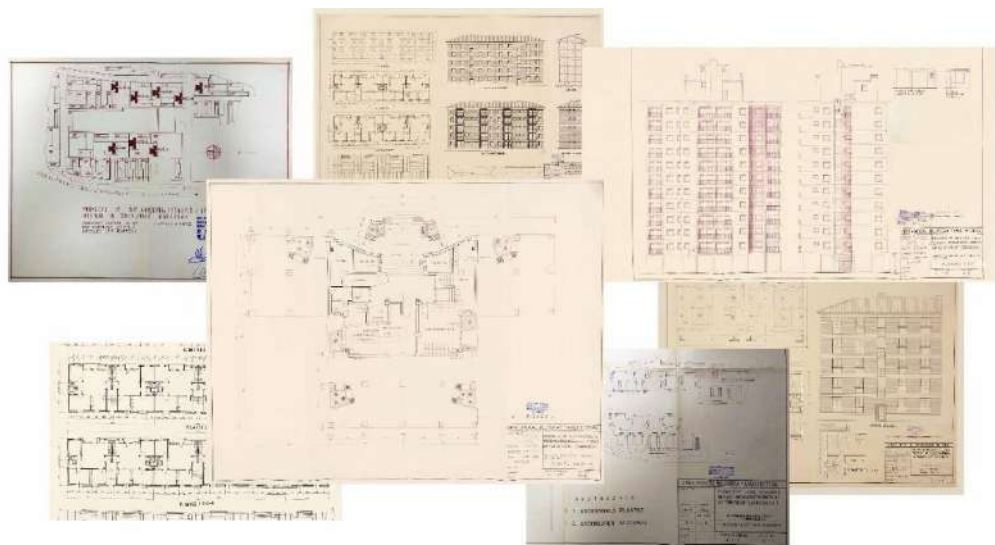


Fig. 64 - Elaborati grafici derivanti dalla collaborazione con l'Universidad de Zaragoza.

La ricerca si inserisce in un orizzonte comparativo Italia-Spagna che attraversa l'intera tesi, dalla ricostruzione storica dei rispettivi quadri normativi sull'edilizia residenziale pubblica fino alla valutazione dei risultati del workflow. I quattro casi condividono una matrice temporale comune, risalendo tutti alla prima metà degli anni Sessanta, e

rispondono a politiche abitative nazionali analoghe, pur all'interno di quadri istituzionali differenti: il piano INA-Casa e i programmi ISES in Italia, la *Obra Sindical del Hogar* in Spagna. In entrambi i contesti, la produzione residenziale pubblica di quel periodo ha generato quartieri oggi interessati da processi di obsolescenza funzionale, invecchiamento demografico della popolazione residente e carenza di manutenzione. Per il caso foggiano, è stata documentata una condizione di forte tensione abitativa, aggravata da fenomeni di occupazione abusiva e sfratti (Annese et al., 2024); per il caso aragonese, l'assenza di ascensori, l'inadeguatezza dell'isolamento termico e la vetustà degli impianti hanno reso necessari interventi di riabilitazione energetica e strutturale, accompagnati da un progressivo spopolamento dei residenti più anziani. L'applicazione del workflow Archive+Scan-to-BIM al patrimonio residenziale pubblico richiede un accordo istituzionale che costituisce il punto di partenza dell'intera attività. Si tratta di un requisito metodologico fondamentale da considerare in vista di future applicazioni in altri contesti territoriali.

8.2 Digitalizzazione e modellazione BIM dei casi studio

Superata la fase preliminare di analisi documentale e di definizione degli scopi del modello, la sperimentazione del workflow Archive+Scan-to-BIM si è concentrata sulla traduzione dei dati acquisiti in geometrie parametriche. Nei passaggi che seguono vengono analizzate le scelte tecniche compiute dalla terza alla decima fase, con particolare attenzione alle strategie di risoluzione delle criticità incontrate durante la modellazione e alla validazione dei dati quantitativi ottenuti.

8.2.1 Analysis and structuring of archival data

Gli elaborati grafici relativi ai quattro casi studio erano già disponibili in formato digitale al momento dell'avvio delle attività di modellazione, in quanto riprodotti nell'ambito di precedenti attività degli enti gestori o di ricerche pregresse condotte dalle istituzioni universitarie coinvolte. L'operazione condotta in questa fase non ha riguardato pertanto la digitalizzazione primaria dei documenti, ma la loro standardizzazione e verifica. I file originali presentavano formati, risoluzioni, rese cromatiche e dimensioni eterogenee, e sono stati sottoposti a un processo di uniformazione che ha riguardato il formato di archiviazione (TIFF per gli elaborati grafici, PDF per le relazioni tecniche), la calibrazione dell'esposizione e del contrasto, la verifica della corrispondenza tra scala dichiarata e scala effettiva, e il controllo della leggibilità delle quotature e dei cartigli. La verifica della scala ha costituito il presupposto per la successiva calibrazione degli elaborati nell'ambiente di lavoro, operazione descritta nel paragrafo 7.2.3, attraverso la quale ciascun disegno viene reso metricamente interrogabile e utilizzabile come fonte dimensionale diretta per la modellazione delle zone d'ombra (Fig. 65).



Fig. 65 - Elaborato grafico calibrato e misurabile all'interno di Autodesk Forma.

Il corpus documentale strutturato al termine della fase comprende trentotto elaborati grafici, la cui distribuzione tra i casi studio riflette la diversa disponibilità di fonti originali. Nello specifico, sono state prodotte nove tavole per il quartiere INA-Casa di Cerignola e tredici per il complesso ISES di Foggia, mentre il Conjunto Balsas de Ebro Viejo conta sette tavole per la torre e nove per i blocchi lineari. La consistenza del materiale riflette sia la complessità degli edifici sia la disponibilità effettiva delle fonti archivistiche, e in nessun caso un singolo fondo è risultato completo per la totalità degli elaborati necessari alla modellazione. Per i casi italiani, l'integrazione tra riproduzioni provenienti dall'archivio dell'Area Tecnica e dall'archivio dell'Area Patrimonio di A.R.C.A. Capitanata ha richiesto un lavoro di confronto tra copie di diversa generazione, alcune delle quali presentavano una grana di fondo marcata e una resa cromatica alterata con il tratto tendente al blu, condizione che in alcuni casi riduceva la leggibilità delle quotature. Per i casi spagnoli, la documentazione proveniente da un'unica fonte istituzionale ha garantito una maggiore omogeneità qualitativa.

L'archivio digitale è stato organizzato all'interno della piattaforma Autodesk Forma Data Management secondo una struttura gerarchica conforme alle indicazioni del par. 7.2.3. Una cartella di progetto comprende quattro sottocartelle, una per ciascun caso studio, ciascuna delle quali è articolata in ulteriori sottocartelle dedicate agli elaborati grafici, alle fotografie (suddivise in fotografie di cantiere e fotografie di sopralluogo, con relative date), al modello BIM, ai progetti di interventi successivi, alle pubblicazioni di riferimento e alle relazioni tecniche. A ciascun elaborato grafico sono stati associati gli attributi personalizzati previsti dal workflow (denominazione, descrizione del contenuto, provenienza archivistica, scala, data, formato originale ecc.) (Fig. 66), garantendo così una catalogazione sistematica della documentazione raccolta. In alcuni casi studio singole sottocartelle sono rimaste prive di contenuto (ad esempio le fotografie di cantiere per i casi spagnoli o le relazioni tecniche per il quartiere INA-Casa di Cerignola) ma la struttura è stata mantenuta nella sua completezza per garantire la disponibilità dell'archivio ad accogliere materiali futuri, coerentemente con il principio di aggiornabilità incrementale descritto nel capitolo 7.

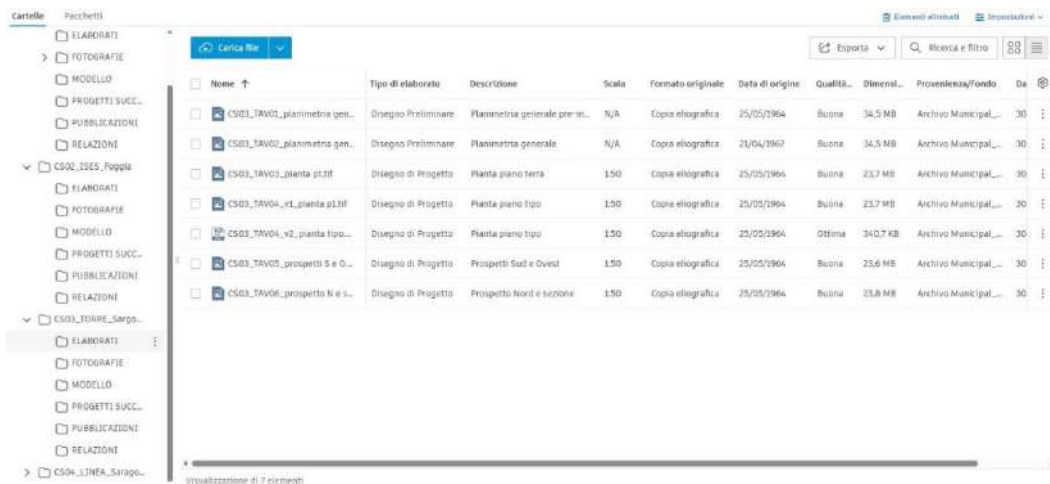


Fig. 66 - Strutturazione degli attributi degli elaborati grafici in Autodesk Forma.

8.2.2 Survey

Le campagne di rilievo⁵⁸ sono state condotte mediante laser scanning terrestre a differenza di fase, impiegando un laser FARO Focus 3D 120 per i casi studio italiani e un laser FARO Focus S70 per i casi spagnoli⁵⁹. La risoluzione di acquisizione è stata fissata a 4 mm a 10 m di distanza per tutte le campagne, parametro derivato dai requisiti geometrici dei LOIN dichiarati nella fase di *analysis of model uses*. L'impiego di target artificiali è stato escluso a favore di una registrazione basata sull'individuazione di punti omologhi naturali, quali spigoli murari, intersezioni tra partizioni o elementi architettonici

⁵⁸ Per un approfondimento sulle metodologie di rilievo laser e sulle caratteristiche tecnologiche della strumentazione impiegata, si rimanda alla descrizione metodologica contenuta nel par.5.2.

⁵⁹ Si riportano di seguito i principali dati tecnici relativi ai due laser scanner utilizzati;

FARO Focus 3D S 120 (casi studio italiani): accuratezza nominale ± 2 mm a 10 e 25 m; range di misura 0,6–120 m; velocità di acquisizione fino a 976.000 punti/secondo; campo visivo 300° (verticale) $\times$ 360° (orizzontale); fotocamera integrata fino a 70 megapixel; sensori integrati: bussola elettronica, altimetro barometrico, compensatore biassiale.

FARO Focus S70 (casi studio spagnoli): accuratezza nominale ± 1 mm; range di misura 0,6–70 m; velocità di acquisizione fino a 976.000 punti/secondo; campo visivo 360° (verticale) $\times$ 360° (orizzontale); fotocamera integrata fino a 165 megapixel; sensori integrati: GPS/GLONASS, bussola, altimetro, compensatore biassiale a doppio asse; compensazione on-site disponibile in campo. Fonte: specifiche tecniche ufficiali FARO Technologies.

distintivi. Tale scelta è stata determinata dalle condizioni operative dei casi studio, in cui la necessità di ridurre i tempi di permanenza negli ambienti interni e di non interferire con gli spazi abitati rendeva poco agevole il posizionamento e il successivo recupero di riferimenti fisici.

La pianificazione delle stazioni è stata impostata secondo il principio descritto nel par. 7.2.4, utilizzando le piante d'archivio già analizzate per stimare la configurazione degli ambienti. Tale approccio ha permesso di individuare preventivamente i punti critici soggetti a occlusioni e di definire una strategia di acquisizione calibrata sulle porzioni effettivamente accessibili. Le condizioni operative sono tuttavia variate in modo significativo tra i casi studio, in funzione della tipologia edilizia, del contesto urbano e della disponibilità dei residenti.

Per il quartiere INA-Casa di Cerignola (Fig. 67) il rilievo ha riguardato esclusivamente l'involucro esterno e i vani comuni di distribuzione, senza accesso ad alcun alloggio.



Fig. 67 - Operazioni di rilievo laser scanner presso il quartiere INA-Casa di Cerignola.

La campagna è stata completata in una giornata con ventinove stazioni di scansione. Le principali criticità sono emerse a causa del contesto urbano, poiché la presenza di veicoli parcheggiati a ridosso dei prospetti e l'aggiunta di corpi edilizi in epoca successiva hanno limitato la libertà di posizionamento delle stazioni, causando occlusioni parziali su alcuni tratti delle facciate.

Per il complesso ISES di Foggia (Fig. 68) il rilievo ha interessato l'esterno di una delle sei torri, il vano scala, la copertura e un appartamento campione situato al sesto piano.



Fig. 68 - Operazioni di rilievo laser scanner presso il complesso ISES di Foggia.

Le ventinove stazioni complessive sono state ripartite tra gli spazi esterni, che ne hanno richieste quindici, l'alloggio campione con otto posizionamenti e il terrazzo di copertura, dove sono state effettuate le restanti sei scansioni. L'accesso all'appartamento è stato possibile grazie alla mediazione di A.R.C.A. Capitanata con il proprietario dell'alloggio, che ha messo a disposizione un tempo limitato per le operazioni. La ridotta permanenza ha imposto un rilievo speditivo, con scansioni acquisite in modalità senza colore per abbreviare i tempi di acquisizione; la componente colorimetrica RGB è stata acquisita per le sole scansioni esterne. L'alloggio era abitato e arredato, e il rilievo è stato condotto senza spostamento di arredi, circostanza che ha prodotto occlusioni localizzate su porzioni di pavimento e di pareti interne basse, compensate dal confronto

con la documentazione d'archivio nella fase di *data coordination*. Il contesto urbano ha posto problematiche minori rispetto a Cerignola, ma la distribuzione tridimensionale delle sei torri del complesso attorno alla piazzetta ellittica ha richiesto attenzione nella gestione della transizione tra le scansioni esterne, condotte a distanze di circa 10 metri, e quelle degli spazi interni, acquisite a circa 3 metri.

Per la torre del Conjunto Balsas de Ebro Viejo (Fig. 69) il rilievo ha compreso gli spazi esterni e i vani comuni interni, senza accesso ad alcun alloggio, per un totale di quarantaquattro stazioni, di cui otto interne.



Fig. 69 - Operazioni di rilievo laser scanner presso il Conjunto Balsas de Ebro Viejo a Saragozza.

L'altezza dell'edificio (undici piani) e la presenza di alberature ad alto fusto a ridosso del prospetto principale hanno costituito le criticità principali, aggravate dalla ristrettezza degli spazi su due dei quattro lati dell'edificio, che impediva un arretramento sufficiente per evitare inquadrature di scorcio. A titolo precauzionale è stata eseguita anche un'acquisizione fotogrammetrica della porzione sommitale dell'edificio, che in fase di registrazione non è risultata necessaria poiché la copertura del dato laser si è rivelata adeguata. Una delle strade che lambisce l'edificio è ad alto scorrimento veicolare, circostanza che ha richiesto attenzione nella gestione delle scansioni esposte al traffico. Condizioni di vento forte durante la campagna non hanno prodotto effetti rilevabili sulla qualità delle scansioni.

Per i blocchi lineari del medesimo complesso (Fig. 70) il rilievo ha interessato l'intero sviluppo longitudinale dei sei corpi di fabbrica, con settanta stazioni complessive di cui sei per gli spazi comuni interni.



Fig. 70 - Operazioni di rilievo laser scanner presso il Conjunto Balsas de Ebro Viejo a Saragozza.

Il numero elevato di stazioni è conseguenza diretta dello sviluppo planimetrico dei blocchi e della necessità di garantire una sovrapposizione sufficiente tra scansioni adiacenti lungo facciate di considerevole lunghezza. La vegetazione ha prodotto occlusioni parziali nelle porzioni alte di alcuni blocchi, ma la serialità tipologica degli edifici ha consentito di compensare le lacune locali attraverso il confronto con i tratti adiacenti del medesimo fronte. Anche in questo caso le condizioni di vento non hanno inciso sulla qualità dei dati.

La tabella seguente sintetizza i dati quantitativi delle quattro campagne di rilievo:

Caso studio	Scansioni	Durata rilievo	N° di punti nuvola	Errore medio
CS01_INA-Casa Cerignola	29	10:38-13:49 (3h 11min)	163.348.303	5,3 mm
CS02 _ ISES Foggia	27	10:19-13:43 (3h 24min)	251.577.897	3,7 mm
CS03_ Torre Balsas	44	10:37-15:22 (4h 45min)	243.513.246	7,2 mm
CS04_ Lineare Balsas	70	10:34-16:38 (6h 04min)	301.028.684	3,2 mm

8.2.3 Post-processing

L'elaborazione delle nuvole di punti grezze è stata condotta secondo la sequenza operativa descritta nel paragrafo 7.2.5: registrazione delle scansioni, pulizia degli artefatti, decimazione e preparazione per l'importazione nell'ambiente di modellazione.

Il primo passo, la registrazione è stata eseguita nel software proprietario FARO Scene per tutti e quattro i casi studio. La procedura ha combinato due approcci: una prima

fase di allineamento mediante individuazione di punti omologhi naturali tra coppie di scansioni adiacenti, seguita da un affinamento basato sull'algoritmo ICP per minimizzare i residui nelle zone di sovrapposizione. Il ricorso alla registrazione manuale come primo passaggio, anziché l'impiego diretto dell'algoritmo automatico, è stato reso necessario dalla sovrapposizione limitata tra alcune scansioni, conseguenza diretta dei vincoli di permanenza negli alloggi e delle condizioni di rilievo in contesti urbani con occlusioni. Come anticipato nel par. 7.2.5, l'algoritmo ICP presuppone una sovrapposizione minima del 20-30% per convergere correttamente; nei casi in esame questa soglia non è stata sempre raggiunta, in particolare nella transizione tra scansioni esterne e interne. Nel caso del complesso ISES di Foggia, il passaggio dalle scansioni degli spazi esterni (acquisite a distanze di circa 10 metri) a quelle dell'alloggio campione (condotte a circa 3 metri) ha richiesto una gestione attenta dell'allineamento per mantenere la coerenza del sistema di riferimento in condizioni di acquisizione molto diverse. L'errore medio di registrazione è stato contenuto entro valori compatibili con le tolleranze dichiarate nella fase di *analysis of model uses* e va da 3,7 mm per il caso CS02 a 7,2 mm per il caso CS03.

La pulizia delle nuvole di punti è stata eseguita manualmente attraverso gli strumenti di selezione dell'ambiente di registrazione, così da rimuovere gli elementi estranei all'architettura in esame (Fig. 71).



Fig. 71 - Comparazione tra nuvola di punti grezza, ritagliata manualmente e decimata.

Questa operazione ha riguardato in particolare la vegetazione, l'arredo urbano, i veicoli e le porzioni degli edifici circostanti non funzionali agli obiettivi della ricerca. Questa operazione è stata eseguita in misura variabile su tutti i casi studio, con un impegno maggiore per i casi urbani di Cerignola e Saragozza, dove la prossimità della sede stradale ai prospetti ha prodotto una maggiore presenza di elementi di disturbo nelle scansioni. Non sono stati riscontrati problemi significativi legati a superfici riflettenti come rivestimenti lucidi o vetri, né particolari criticità legate ad elementi metallici come ringhiere.

La decimazione è stata eseguita in CloudCompare attraverso il ricampionamento spaziale (*subsampling*), impostando una distanza minima tra i punti pari a 0.01 m. La scelta del passo di campionamento è stata fatta cercando un compromesso tra la riduzione della densità del dataset e la conservazione della leggibilità geometrica degli elementi architettonici, in particolare in vista della modellazione parametrica in Revit. Prima della decimazione, le nuvole sono state sottoposte a un filtraggio del rumore residuo mediante il Noise Filter di CloudCompare, basato su un criterio geometrico locale con raggio di vicinato $r = 0.05$ m e soglia di errore relativo $\tau = 1.0$. Questo filtro è stato preferito al filtro Statistical Outlier Removal (SOR), testato in via preliminare sul caso ISES di Foggia con parametri $k = 10$ vicini e moltiplicatore $\alpha = 1.0$ dal momento che il SOR, pur efficace nella rimozione del rumore diffuso, ha evidenziato una perdita di dettagli geometrici nelle strutture a scala ridotta ed elementi più distanti dalle stazioni di acquisizione, che il Noise Filter ha invece preservato con maggiore affidabilità (Fig. 72).

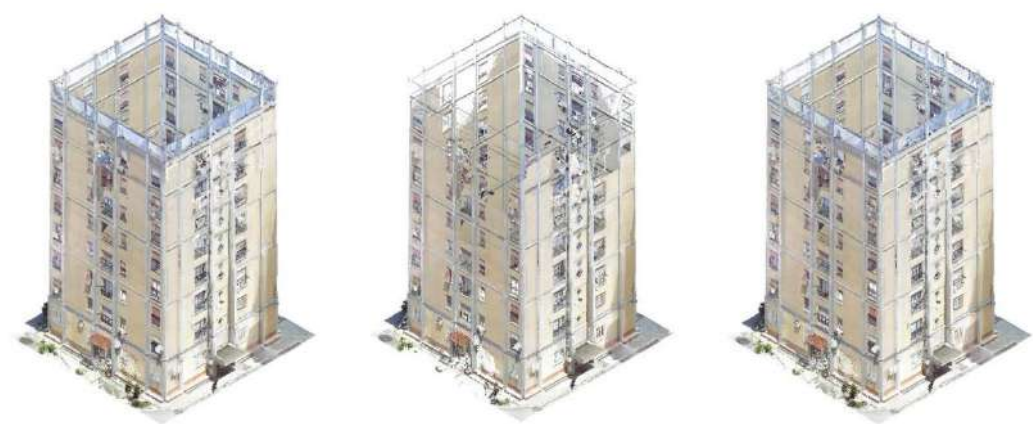


Fig. 72 - Comparazione tra nuvola di punti ritagliata manualmente, trattata con filtro SOR e decimata con subsampling.

La tabella seguente riporta l’effetto delle operazioni di pulizia e decimazione sulla consistenza dei dataset:

Caso studio	Nuvola di punti	Nuvola di punti decimata	Peso	Peso decimazione dopo
CS01-INA-Casa Cerignola	163.348.303	4.406.043	2,35 GB	63,3 MB
CS02 - ISES Foggia	251.577.897	6.785.886	3,61 GB	97,4 MB
CS03 - Torre Balsas	243.513.246	6.568.356	3,50 GB	94,3 MB
CS04 - Lineare Balsas	301.028.684	8.119.737	4,32 GB	116,6 MB

La segmentazione semantica della nuvola di punti, prevista dal workflow come fase opzionale, non è stata applicata all’intero dataset relativo ai quattro casi studio. La geometria prevalentemente rettilinea degli edifici esaminati ha consentito un’identificazione visiva efficace delle componenti architettoniche già in fase di

modellazione, rendendo l'investimento di tempo richiesto da una segmentazione estesa non giustificato dagli obiettivi della ricerca. È stata tuttavia condotta una sperimentazione esplorativa sul caso ISES di Foggia

(Fig. 73), applicando un approccio di segmentazione automatica basato sull'algoritmo RANSAC (*Random Sample Consensus*) implementato in ambiente Python attraverso la libreria open-source Open3D (**Buldo et al., 2025**).

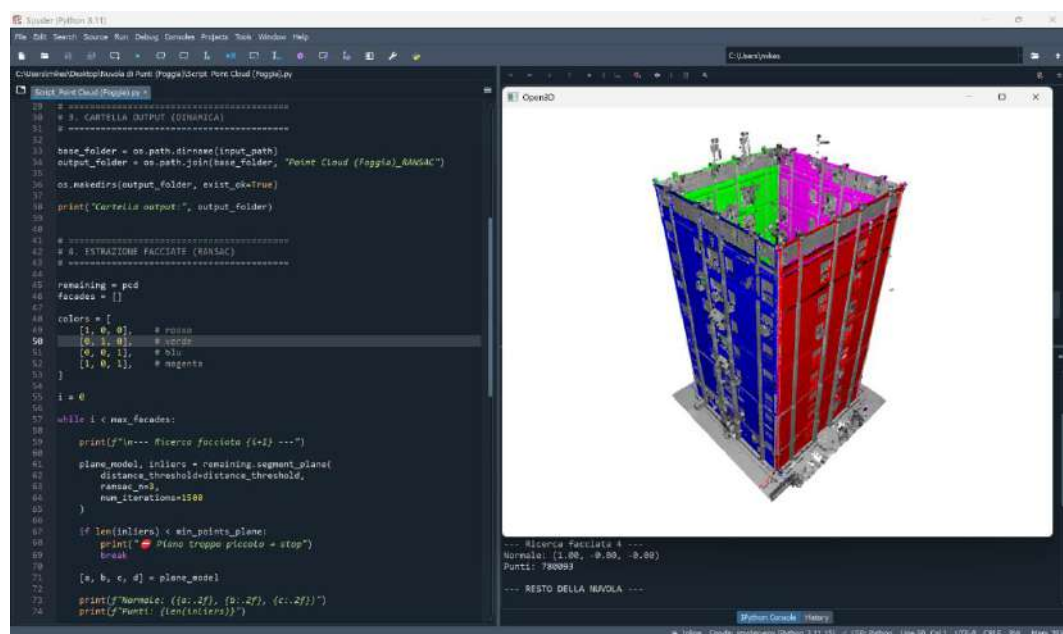


Fig. 73 - Segmentazione della nuvola di punti attraverso superfici planari in Python.

La procedura ha estratto iterativamente le superfici planari dominanti dell'involucro edilizio ovvero le quattro facciate verticali principali, imponendo una soglia di tolleranza geometrica di 0.05 m e un vincolo sull'orientamento delle normali per escludere le superfici orizzontali. Gli elementi non appartenenti ai piani dominanti (aperture, balconi, ringhiere, elementi decorativi aggettanti) sono rimasti nella nuvola residua, consentendo una distinzione efficace tra componenti planari principali ed elementi secondari. La sperimentazione ha confermato la fattibilità dell'approccio e la sua

potenziale utilità per isolare porzioni geometricamente complesse prima della modellazione, pur evidenziando che l'impiego di strumenti di programmazione può costituire un limite tecnico per l'adozione immediata nel contesto operativo degli enti gestori. Le nuvole elaborate sono state esportate in formato .e57 e successivamente convertite nel formato indicizzato .rcp attraverso Autodesk ReCap, che ha consentito le ultime operazioni di rifinitura prima dell'importazione in Autodesk Revit per la fase di *data coordination*.

8.2.4 Data coordination

L'allineamento tra nuvola di punti e documentazione d'archivio è stato condotto in Autodesk Revit, importando gli elaborati grafici digitalizzati in formato TIFF nello spazio di lavoro in sovrapposizione alla nuvola già caricata. Il posizionamento dei disegni è stato eseguito facendo coincidere i punti di riferimento comuni a entrambe le fonti, quali gli spigoli dei muri perimetrali, le intersezioni tra le partizioni o la posizione dei pilastri (Fig. 74). Questa operazione ha seguito la procedura metodologica già descritta nel paragrafo 7.2.6, garantendo la corretta sovrapposizione tra la documentazione d'archivio e il rilievo strumentale.

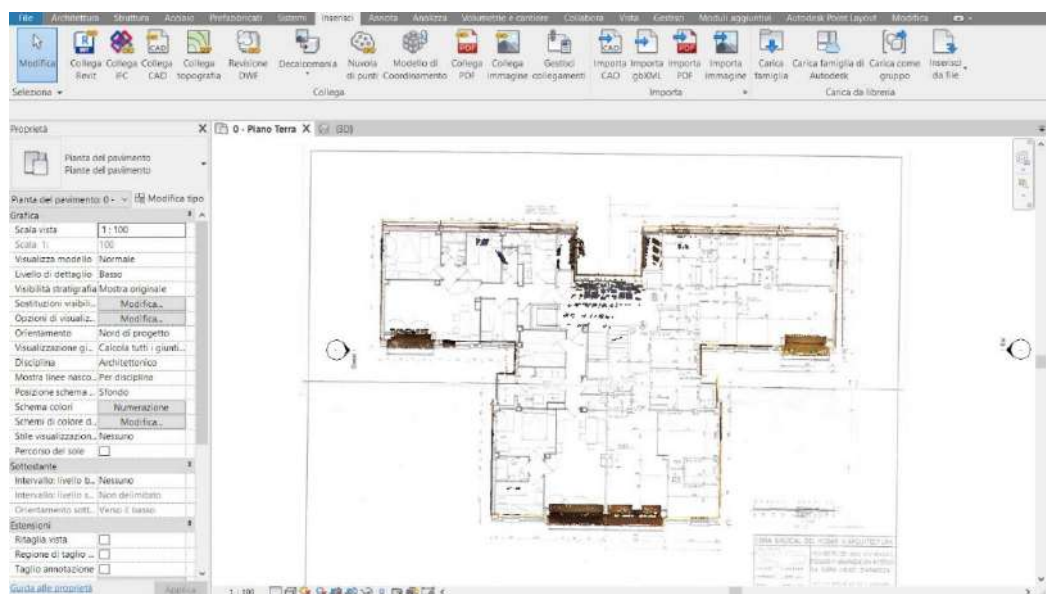


Fig. 74 - La nuvola di punti e una pianta d'archivio sovrapposte in Revit.

Il confronto tra le due fonti ha evidenziato difformità riconducibili prevalentemente a modifiche esecutive e trasformazioni successive, piuttosto che a variazioni sostanziali dell'impianto planimetrico o del sistema costruttivo. Nel caso di Cerignola, le principali discrepanze riguardano la chiusura di numerose verande e la sostituzione delle balaustre originali in elementi di cotto con parapetti di fattura diversa, mentre il portone d'ingresso conserva la configurazione originale. Nel complesso ISES di Foggia le difformità presentano un carattere più articolato, evidenziando come la sistemazione della piazzetta ellittica prevista nel progetto originale non sia stata portata a compimento; le finestre romboidali del vano scala presentano dimensioni e configurazione diverse dal progetto originale (Fig. 75), che prevedeva coppie simmetriche di aperture romboidali alte 1 m e larghe 60 cm, sostituite nella realizzazione da coppie asimmetriche con una finestra da 1x1 m dotata della cornice prevista in progetto e una da 80x80 cm priva di cornice; le balaustre del terrazzo sono state

sostituite con un grigliato metallico e alcune canne fumarie a sezione romboidale del vano tecnico sono state eliminate.

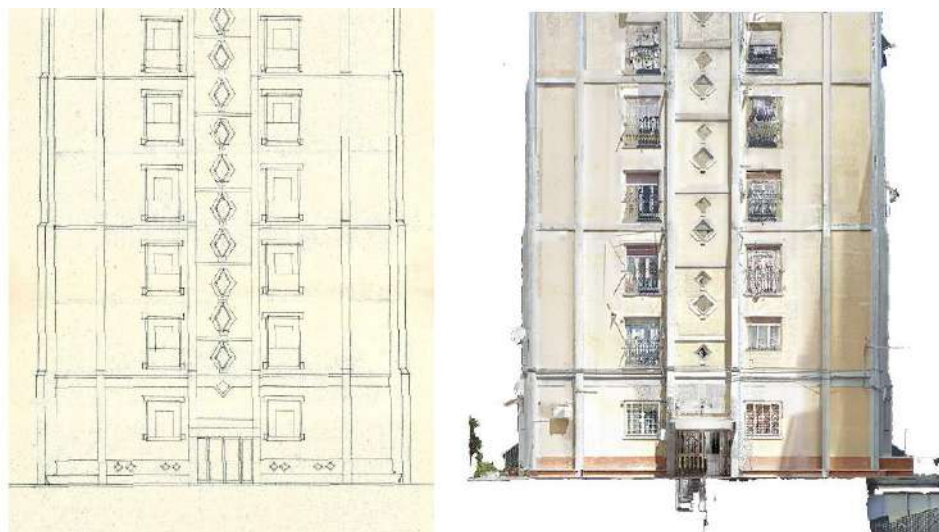


Fig. 75 - Discordanza tra i documenti d'archivio e la nuvola di punti nel caso studio delle Torri ISES a Foggia.

In entrambi i casi italiani gli infissi sono stati integralmente sostituiti nel corso dei decenni. Per l'unico alloggio campione accessibile (ISES Foggia, sesto piano), la disposizione interna è risultata alterata rispetto al progetto, con tramezzi spostati e nuove partizioni introdotte dagli occupanti. Per la torre di Saragozza non sono state riscontrate incongruenze significative e molti degli infissi originali risultano conservati. Per i blocchi lineari le difformità si limitano a variazioni dimensionali delle finestre al piano rialzato e ad alcuni rivestimenti applicati successivamente.

Queste discrepanze, documentate nel registro delle difformità previsto dal workflow, non hanno invalidato l'impiego della documentazione d'archivio per la ricostruzione delle zone d'ombra, ma hanno orientato le scelte di modellazione nella fase successiva, imponendo correzioni puntuali dove il dato di rilievo prevaleva sul disegno originale.

La georeferenziazione dei modelli è stata eseguita inserendo in Revit un “punto di rilevamento” a coordinate note, ricavate da Google Earth, nel sistema di coordinate WGS 84 Web Mercator, secondo la procedura descritta nel par. 7.2.6.

8.2.5 BIM authoring

La modellazione è stata condotta in Autodesk Revit operando simultaneamente sulla nuvola di punti e sugli elaborati d'archivio posizionati nella fase precedente, secondo il procedimento descritto nel paragrafo 7.2.7. Per ciascun caso studio sono stati impostati livelli corrispondenti a ogni quota di pavimento, a ogni pianerottolo intermedio del vano scala, alla copertura e, dove presenti, alla base e al colmo dei tetti a falde (ISES Foggia e blocchi lineari di Saragozza).

Le scelte di modellazione sono variate in funzione della complessità architettonica di ciascun edificio. Per i casi spagnoli la modellazione è stata condotta esclusivamente attraverso le famiglie di sistema di Revit. Questa scelta è stata resa possibile dal repertorio costruttivo dei blocchi, caratterizzato da una struttura a telai in calcestruzzo armato con tamponamenti in laterizi, aperture seriali e coperture piane, elementi che per la loro natura non hanno richiesto lo sviluppo di componenti personalizzati. Per il quartiere INA-Casa di Cerignola la modellazione ha impiegato prevalentemente famiglie di sistema (Fig. 76), fatta eccezione per la tettoia dell'ingresso principale e per le balaustre in cotto dalla trama decorativa.

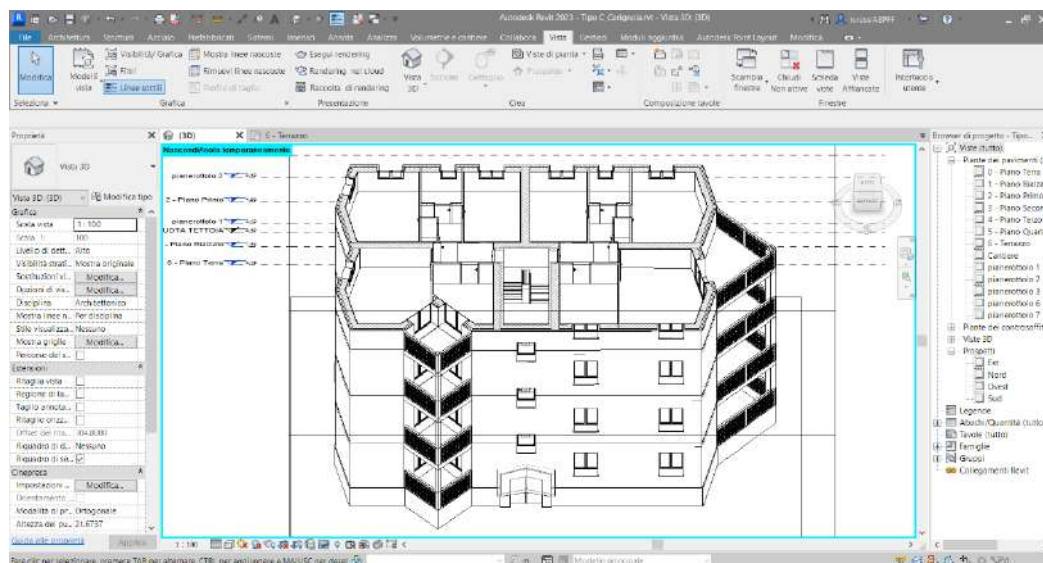


Fig. 76 - Assonometria del modello BIM del caso studio CS01.

Questi specifici elementi sono stati modellati in Rhinoceros e successivamente importati all'interno del progetto Revit come componenti non parametrici. La scelta di ricorrere a un ambiente di modellazione esterno per le balaustre è stata motivata dalla complessità geometrica dei singoli elementi, caratterizzati da dimensioni ridotte, profili curvi e una tessitura ripetitiva. Poiché tali caratteristiche eccedevano le possibilità della modellazione parametrica nativa, questo approccio ha permesso di sperimentare l'integrazione di mesh esterne all'interno del workflow complessivo. Per il complesso ISSES di Foggia il linguaggio architettonico di Ridolfi e Frankl ha richiesto la creazione ex novo di cinque famiglie caricabili: i pilastri rastremati del telaio strutturale, le travi del sistema di copertura, la tettoia d'ingresso, la panchina perimetrale esterna e le finestre romboidali del vano scala. In ciascun caso la semantica dell'elemento è stata preservata attraverso l'assegnazione dei parametri condivisi alla famiglia, mantenendo la coerenza con il sistema informativo del progetto.

Il parametro Fonte_Dati è stato applicato a tutti gli elementi modellati, con il valore "Rilievo" per le parti la cui geometria deriva dalla nuvola di punti e "Archivio" per quelle ricostruite dalla documentazione grafica (Fig. 77).

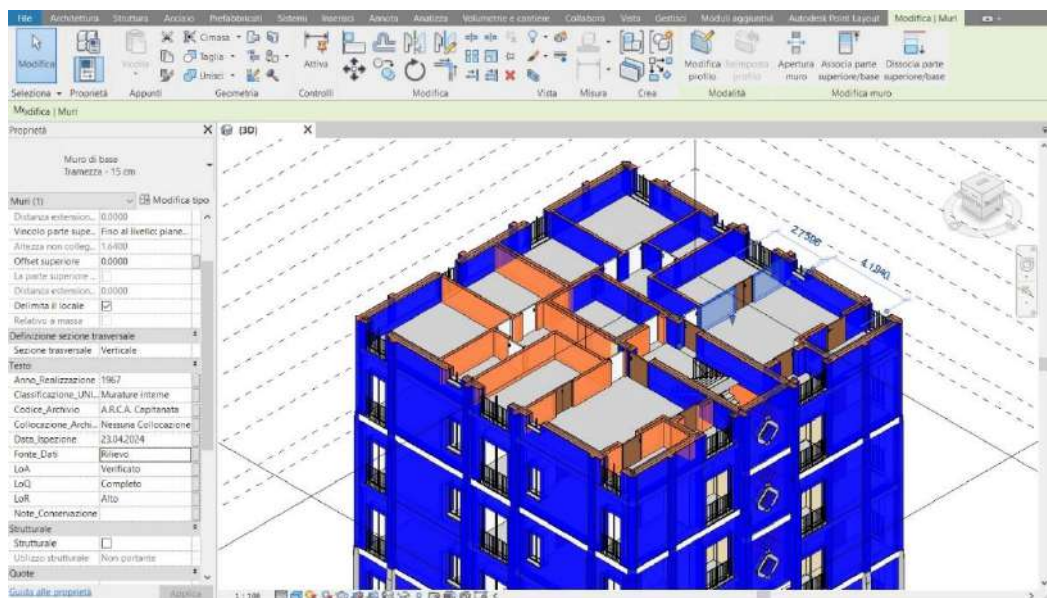


Fig. 77 - Visualizzazione del modello attraverso filtri che permettono di distinguere chiaramente gli elementi modellati da dati del rilievo (blu) e da dati d'archivio (arancione).

La proporzione tra le due classi risulta bilanciata in tutti i casi studio. Gli elementi dell'involucro esterno, seppur numericamente prevalenti e derivanti dal rilievo strumentale, hanno spesso integrato informazioni dimensionali ricavate dai disegni d'archivio, come nel caso delle stratigrafie murarie o delle quote di elementi non raggiungibili dal laser. Si è configurata così una condizione ibrida in cui il dato metrico e quello archivistico hanno operato congiuntamente sulla medesima porzione dell'edificio.

8.2.6 Data integration

L'arricchimento semantico dei modelli è stato condotto attraverso i sedici parametri condivisi previsti dal workflow (par. 7.2.8), di cui dodici compilati e quattro predisposti per il popolamento futuro da parte dell'ente gestore (Materiale_Prevalente,

Tecnica_Costruttiva, Intervento_Precedente, Data_Intervento). Il parametro Note_Conservazione invece è stato compilato solo dove l'ispezione diretta ha restituito osservazioni pertinenti, restando vuoto per gli elementi privi di annotazioni specifiche.

La compilazione è stata eseguita manualmente, senza ricorso a script Dynamo. Il workflow prevede la possibilità di automatizzare le operazioni ripetitive di popolamento parametrico attraverso visual programming (par. 7.2.8), ma la scala della sperimentazione (quattro casi studio) non ha reso necessaria l'adozione di strumenti di automazione. In prospettiva, l'applicazione del workflow a patrimoni più estesi renderebbe l'automazione una condizione operativa rilevante per la sostenibilità del processo.

Il collegamento tra gli elementi del modello e la documentazione archiviata nel CDE è stato realizzato attraverso i parametri URL, che puntano ai file ospitati sulla piattaforma Autodesk Forma Data Management (Fig. 78). La consultazione avviene all'interno della piattaforma CDE, dove la selezione di un elemento nel visualizzatore del modello consente di accedere direttamente all'elaborato d'archivio corrispondente.

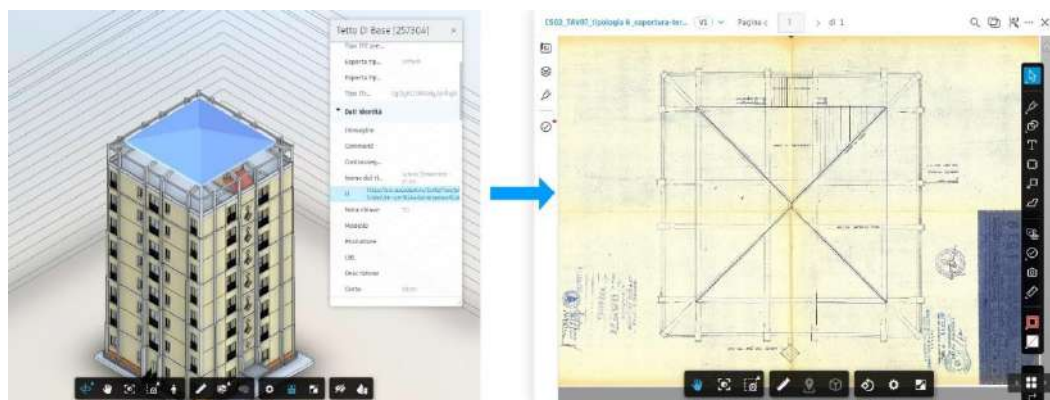


Fig. 78 - Ispezione di un elemento del modello e collegamento URL al documento d'archivio afferente.

Il collegamento è stato impostato seguendo il criterio di pertinenza descritto nel paragrafo 7.2.8. Seguendo questa logica, i dettagli costruttivi specifici sono stati

Workflow digitali integrati per la conoscenza e la rappresentazione del patrimonio residenziale pubblico:
un approccio Archive+Scan-to-BIM con casi studio in Capitanata (Italia) e Aragna (Spagna)

relazionati al singolo elemento o alla famiglia corrispondente, mentre le tavole di carattere generale sono state associate al livello o al gruppo di elementi che descrivono.

8.2.7 Quality control

La verifica della coerenza geometrica e informativa dei modelli è stata condotta secondo il framework a tre dimensioni descritto nel par. 7.2.9, articolato in Level of Accuracy (LoA), Level of Quality (LoQ) e Level of Reliability (LoR).

Il LoA degli elementi reality-based è stato valutato attraverso Autodesk Point Layout (Fig. 79), che ha consentito l'analisi delle deviazioni tra la nuvola di punti e le superfici degli elementi modellati.

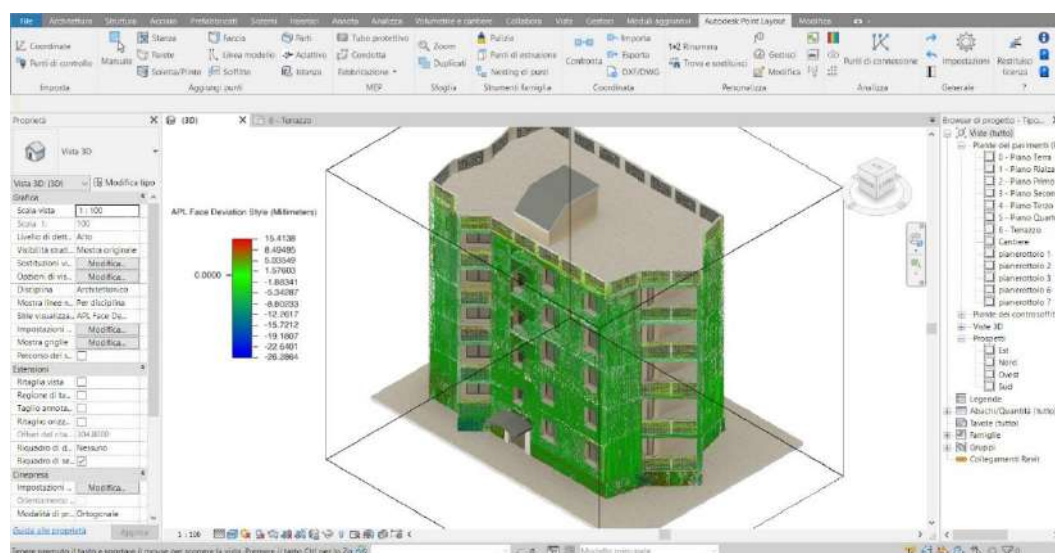


Fig. 79 - Analisi della deviazione effettuata tramite Autodesk Point Layout.

Le soglie degli intervalli cromatici sono state configurate in coerenza con le tolleranze dichiarate nella fase di *analysis of model uses*: ± 10 mm per gli elementi strutturali verticali, ± 20 mm per le murature, i solai, le coperture e gli elementi marcapiano, ± 30

mm per le aperture. Il LoA è stato espresso come valore numerico della deviazione media in millimetri, ricavato dalla deviation analysis e confrontato con le tolleranze dichiarate. Per gli elementi model-based, il LoA non è calcolabile direttamente in assenza di dati di rilievo di confronto. La valutazione è stata condotta indirettamente, attraverso il confronto realizzato nella fase di *data coordination* tra i disegni d'archivio e la nuvola di punti nelle zone di sovrapposizione. Dove tale confronto ha confermato la coerenza dimensionale tra le due fonti, gli elementi ricostruiti dalla medesima documentazione sono stati classificati come "verificato indirettamente"; dove il confronto non è stato possibile, la classificazione è stata "non verificabile". Il LoQ è stato valutato attraverso gli abachi di Revit, che hanno consentito di controllare la compilazione dei parametri obbligatori, la corretta attribuzione della classificazione UNI 8290 e la funzionalità dei collegamenti URL alla documentazione nel CDE. Il LoR, sintesi delle due dimensioni precedenti, è stato attribuito a ciascun elemento distinguendo tra affidabilità alta (geometria verificata entro le tolleranze e corredo informativo completo), media (una delle due dimensioni parzialmente soddisfatta) e bassa (geometria non verificabile o corredo minimo). Le tre dimensioni sono state registrate nei parametri condivisi di ciascun elemento e risultano interrogabili attraverso filtri vista e abachi.

Le tabelle seguenti sintetizzano, per ciascun caso studio, la valutazione del Level of Reliability (LoR) articolato nelle sue componenti di accuratezza geometrica (LoA) e completezza informativa (LoQ).

CS01 - INA-Casa Cerignola				
Categoria elemento (UNI 8290)	Fonte dati	LoA Deviazione (mm)	LoQ Parametri	LoR
Pilastri	Rilievo	~ 2 mm	verificato	Alto
Travi	Archivio	n.c.	parz. verificato	Medio
Solai	Archivio	n.c.	verificato	Medio
Muri esterni	Rilievo	~ 2 mm	verificato	Alto

Muri interni	Archivio	<i>n.c.</i>	verificato	Medio
Aperture (porte e finestre)	Rilievo	~ -8 mm	verificato	Alto

CS02 - ISES Foggia

Categoria elemento (UNI 8290)	Fonte dati	LoA Deviazione (mm)	LoQ Parametri	LoR
Pilastrì	Rilievo	~ 2 mm	verificato	Alto
Travi	Archivio	<i>n.c.</i>	verificato	Medio
Solai	Archivio	~ 5 mm	verificato	Alto
Muri esterni	Rilievo	~ 5 mm	verificato	Alto
Muri interni	Archivio	~ 4 mm	verificato	Alto
Aperture (porte e finestre)	Rilievo	~ -8 mm	verificato	Alto

CS03 - Balsas Tower Zaragoza

Categoria elemento (UNI 8290)	Fonte dati	LoA Deviazione (mm)	LoQ Parametri	LoR
Pilastrì	Rilievo	~ 5 mm	parz. verificato	Medio
Travi	Archivio	<i>n.c.</i>	parz. verificato	Medio
Solai	Archivio	<i>n.c.</i>	parz. verificato	Medio
Muri esterni	Rilievo	~ 3 mm	verificato	Alto
Muri interni	Archivio	<i>n.c.</i>	parz. verificato	Medio
Aperture (porte e finestre)	Rilievo	~ 6 mm	parz. verificato	Medio

CS04 - Balsas Linear Block Zaragoza

Categoria elemento (UNI 8290)	Fonte dati	LoA Deviazione (mm)	LoQ Parametri	LoR
Pilastrì	Rilievo	<i>n.c.</i>	parz. verificato	Medio
Travi	Archivio	<i>n.c.</i>	parz. verificato	Medio
Solai	Archivio	<i>n.c.</i>	parz. verificato	Medio

Muri esterni	Rilievo	~ 2 mm	verificato	Alto
Muri interni	Archivio	n.c.	parz. verificato	Medio
Aperture (porte e finestre)	Rilievo	~ 8 mm	verificato	Alto

8.2.8 openBIM export

I modelli sono stati esportati in formato IFC da Autodesk Revit. La mappatura delle famiglie di sistema nelle classi IFC corrispondenti (IfcWall, IfcSlab, IfcRoof, IfcColumn) non ha presentato criticità, e le famiglie caricabili personalizzate, inclusi i pilastri rastremati e le finestre romboidali del caso ISES, sono state correttamente classificate. I sedici parametri condivisi sono stati esportati come property set personalizzati e risultano leggibili nei viewer IFC testati. Le geometrie importate da ambienti esterni (come ad esempio le balaustre del caso studio di Cerignola) non hanno subito semplificazioni nella conversione, anche se essendo abbastanza dettagliate la loro leggibilità risulta limitata.

I modelli e la documentazione associata sono stati caricati sulla piattaforma Autodesk Forma Data Management, che funge da Common Data Environment conforme alla norma ISO 19650-1:2018. Il viewer integrato consente la consultazione del modello e l'interrogazione delle proprietà dei singoli elementi senza necessità di software di modellazione

(Fig. 80).

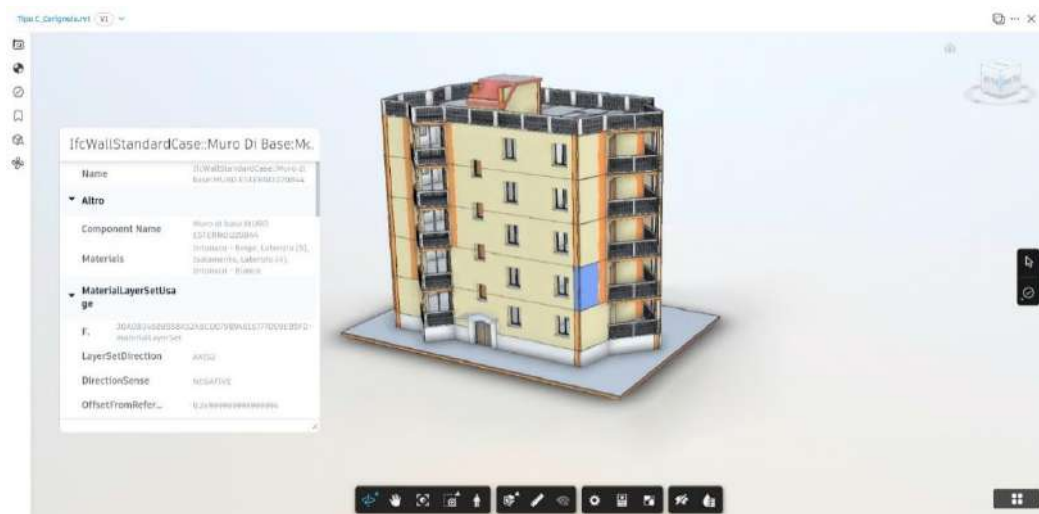


Fig. 80 - Visualizzazione ed interrogazione del modello all'interno di Autodesk Forma

I filtri di visualizzazione impostati nell'ambiente di authoring, in particolare il codice cromatico basato sul parametro `Fonte_Dati`, vengono correttamente ereditati dalla piattaforma, rendendo immediatamente visibile la distinzione tra componenti reality-based e model-based. questa visualizzazione risulta tuttavia statica, poiché all'interno del visualizzatore di Autodesk Forma non è possibile gestire o modificare dinamicamente i filtri, la cui configurazione grafica rimane vincolata alle impostazioni definite durante la fase di caricamento del file .rvt.

I collegamenti URL inseriti nei parametri degli elementi puntano ai documenti archiviati nella medesima piattaforma, garantendo la continuità tra modello e documentazione d'archivio all'interno di un unico ambiente di consultazione. In caso di esportazione del file IFC al di fuori del CDE, i collegamenti alla documentazione non risultano accessibili, condizione già segnalata nel paragrafo 7.2.10 come limite intrinseco dell'architettura informativa adottata.

Il formato IFC ha consentito inoltre l'importazione dei modelli in ambiente GIS (ArcGIS Pro), confermando la predisposizione del workflow all'integrazione con infrastrutture informative esterne all'ambiente BIM, secondo quanto anticipato nel par. 7.2.6

(Fig. 81).

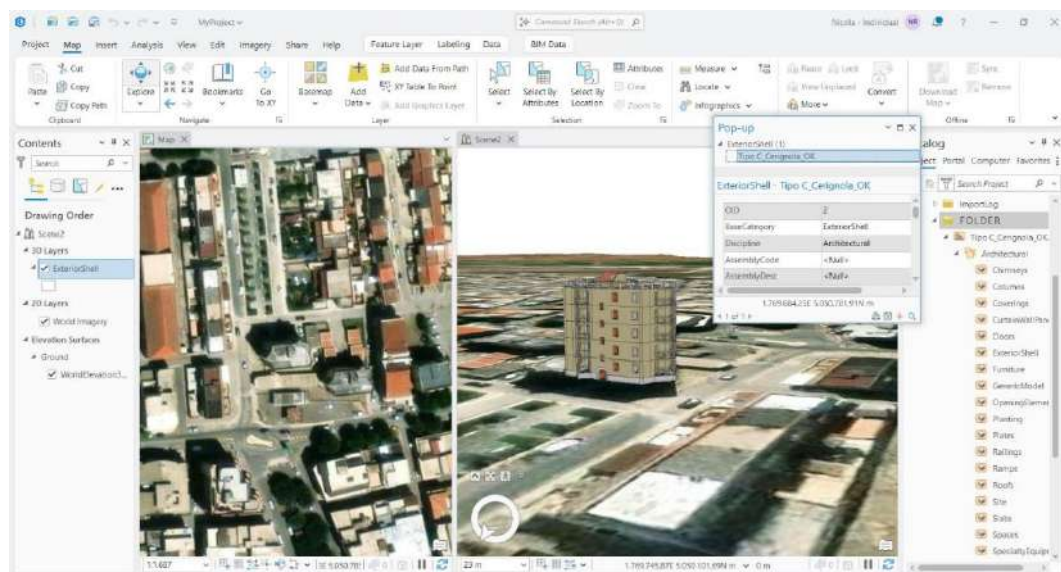


Fig. 81 - Integrazione del modello BIM in ambiente ArcGis Pro

8.3 Applicazione del workflow e valutazione dell'efficacia

L'applicazione del workflow Archive+Scan-to-BIM ai quattro casi studio ha consentito di verificarne la tenuta operativa su edifici con caratteristiche tipologiche, condizioni di accessibilità e contesti archivistici differenti. La sperimentazione ha restituito modelli BIM geometricamente coerenti con i dati di rilievo nelle porzioni reality-based e dimensionalmente fondati sulla documentazione d'archivio nelle porzioni model-based, con un apparato informativo strutturato secondo i requisiti dichiarati nella

fase di *analysis of model uses*. Il risultato complessivo conferma la praticabilità dell'approccio ibrido come risposta al problema dell'accessibilità limitata, pur facendo emergere criticità e squilibri tra le fasi che meritano di essere registrati prima della discussione analitica del capitolo 9.

Le dieci fasi del workflow non hanno richiesto lo stesso impegno operativo. La raccolta e la strutturazione dei dati archivistici (fasi 1 e 3) hanno rappresentato le attività di più difficile pianificazione, poiché il reperimento della documentazione presso archivi privi di inventario sistematico non è riducibile a una procedura standardizzata e dipende dalla disponibilità delle istituzioni coinvolte e dalla capacità del ricercatore di orientarsi in fondi eterogenei. L'organizzazione del materiale nel CDE ha richiesto diversi tentativi con piattaforme e soluzioni differenti prima di convergere sulla struttura adottata. La definizione dei model uses (fase 2) è risultata relativamente immediata, consolidatasi nel confronto con le diverse figure istituzionali e accademiche coinvolte nella ricerca; la declinazione operativa dei LOIN ha richiesto invece un approfondimento bibliografico e normativo più impegnativo.

Il rilievo strumentale (fase 4) è stato, paradossalmente, la fase più speditiva una volta definito il progetto di acquisizione sulla base delle piante d'archivio. La criticità principale non è stata di natura tecnica ma organizzativa: ottenere l'accesso agli alloggi e gestire la ridotta permanenza concessa dai residenti ha condizionato la campagna più di qualsiasi parametro strumentale. Il *post-processing* (fase 5) ha richiesto un impegno significativo sia in termini di tempo sia di risorse computazionali, a causa della gestione di dataset molto voluminosi con i limiti dell'hardware a disposizione. Le operazioni di registrazione, conversione, ritaglio, decimazione e importazione tra i diversi software hanno comportato una sequenza di passaggi complessa. Questo costo operativo non deve essere sottovalutato qualora si prevedano applicazioni su scala più ampia in futuro. Le sperimentazioni esplorative di segmentazione automatizzata, condotte su nuvole alla scala dell'intero edificio, hanno confermato il potenziale degli approcci descritti nel par. 7.2.5 ma anche la loro onerosità computazionale allo stato attuale.

La *data coordination* (fase 6) non ha presentato difficoltà significative una volta che le nuvole di punti sono state rese disponibili in formato .rcp e gli elaborati grafici sono stati standardizzati. L'allineamento all'interno di Revit è risultato un'operazione gestibile, poiché è stato agevolato dal lavoro di preparazione condotto nelle fasi precedenti. Questo passaggio ha confermato l'importanza di una corretta impostazione dei file per garantire la fluidità del processo di coordinamento. La modellazione BIM (fase 7) è stata una delle fasi più complesse e quella in cui le differenze tra i casi studio si sono manifestate con maggiore evidenza. I casi spagnoli, caratterizzati da un repertorio costruttivo più regolare, hanno consentito una modellazione interamente basata su famiglie di sistema; i casi italiani, e in particolare il complesso ISES di Foggia con i suoi elementi architettonici distintivi, hanno richiesto la creazione di famiglie personalizzate e un controllo più attento delle stratigrafie e dei materiali nel confronto continuo tra nuvola di punti e disegni d'archivio.

La *data integration* (fase 8) ha svolto il ruolo di mettere a sistema le fasi precedenti, collegando geometria, parametri informativi e documentazione d'archivio in un apparato coerente. L'operazione è stata impegnativa ma prevalentemente procedurale una volta definita la struttura parametrica; la parte concettualmente più onerosa ha riguardato la progettazione dei parametri in funzione non solo delle informazioni disponibili al momento della sperimentazione, ma anche di quelle che l'ente gestore potrà inserire nel tempo. Il *quality control* (fase 9) ha fornito la validazione quantitativa dell'intero processo, con un impegno computazionale significativo per il confronto tra nuvole di punti e modelli BIM. L'esportazione e la condivisione (fase 10) sono risultate le fasi operativamente più lineari, con la piattaforma Autodesk Forma che ha consentito la pubblicazione dei modelli e della documentazione in un ambiente consultabile senza software di modellazione.

Nel complesso, il workflow ha prodotto risultati più approfonditi dove la qualità e la quantità dei dati di partenza erano superiori. Il caso del complesso ISES di Foggia, che ha beneficiato della documentazione più ricca, dell'accesso a un alloggio campione e della maggiore complessità architettonica come stimolo alla modellazione, ha restituito

il modello più articolato e informativamente più denso. Questo esito suggerisce che l'efficacia del workflow Archive+Scan-to-BIM sia direttamente proporzionale alla consistenza del corpus archivistico disponibile e alla possibilità, anche minima, di accedere a porzioni interne dell'edificio per validare le fonti documentarie. Si tratta di un'evidenza che apre la strada a una riflessione più ampia sulla portata dei risultati ottenuti e sulla scalabilità del metodo proposto, temi che verranno approfonditi nei paragrafi successivi.

9. ANALISI DEI RISULTATI

9.1 Benefici e criticità riscontrate

Il lavoro svolto sui quattro casi studio permette di capire come il workflow risponda concretamente ai problemi di documentazione e gestione dei quartieri popolari. I benefici e le criticità emerse dalla sperimentazione sono strettamente intrecciati, poichè alcune delle qualità più significative del workflow derivano dalle soluzioni adottate per affrontare i vincoli che lo hanno condizionato, e alcune delle criticità più rilevanti rappresentano il compromesso per ottenere quei benefici.

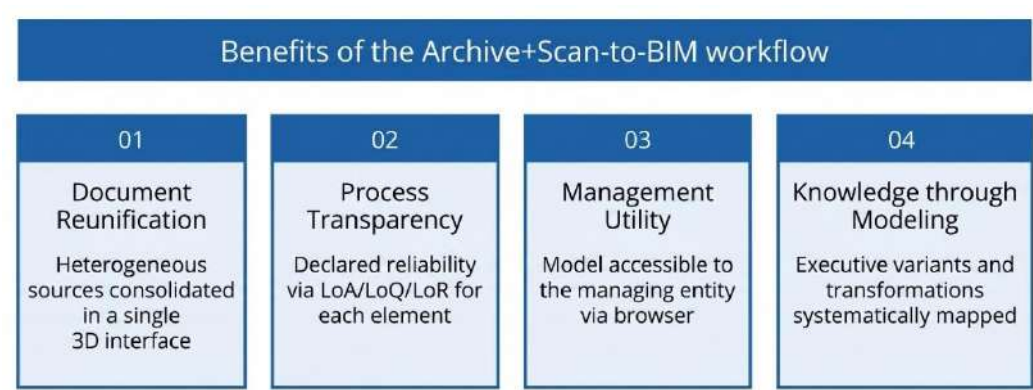


Fig. 82 - Diagramma riassuntivo dei benefici del workflow proposto

Riunificazione documentale

Il primo beneficio riguarda la capacità del workflow di produrre una base conoscitiva unitaria a partire da fonti eterogenee, frammentate e distribuite tra archivi con

organizzazioni diverse. La collaborazione con A.R.C.A. Capitanata ha messo in evidenza una condizione documentale che rispecchia lo stato generale degli archivi del patrimonio ERP italiano, caratterizzata da materiali dispersi tra uffici diversi, supporti cartacei deteriorati, assenza di inventari digitali e transizioni istituzionali che hanno prodotto discontinuità nella gestione dei fondi. Il modello BIM risponde a questa frammentazione riunendo in un'unica interfaccia tridimensionale i dati metrici derivati dal rilievo, i disegni d'archivio, le fotografie storiche e le relazioni tecniche.

Il corpus documentale strutturato nell'archivio digitale del CDE ammonta complessivamente a trentotto tavole d'archivio, distribuite tra i quattro casi studio secondo il dettaglio riportato nel paragrafo 8.2.1. L'archivio è stato organizzato all'interno della piattaforma Autodesk Forma Data Management secondo la struttura gerarchica definita nel par. 7.2.3, con attributi personalizzati associati a ciascun elaborato e convenzioni di denominazione univoche che consentono a ogni documento di disporre di un collegamento URL stabile all'interno della piattaforma. Il collegamento tra gli elementi del modello e la documentazione archiviata nel CDE è stato realizzato attraverso i parametri URL che puntano ai file ospitati sulla piattaforma cloud, così che la selezione di un elemento nel visualizzatore del modello consenta di accedere direttamente all'elaborato d'archivio corrispondente, secondo il criterio di pertinenza descritto nel par. 8.2.6. La struttura informativa dei modelli organizzata in gruppi tematici di parametri condivisi fa sì che ogni elemento geometrico sia simultaneamente un nodo di un database relazionale interrogabile attraverso abachi e filtri parametrici, realizzando quella convergenza di dati eterogenei in un unico ambiente parametrico che la letteratura riconosce come condizione necessaria per superare la frammentazione nella gestione del patrimonio non monumentale (Maietti & Tasselli, 2020).

Trasparenza del processo conoscitivo

Il secondo beneficio riguarda la dichiarazione esplicita dei livelli di affidabilità all'interno del modello, garantita dai concetti di LoA/LoQ/LoR che differenzia le porzioni reality-based dalle porzioni model-based (Maiezza & Tata, 2021). Questa differenziazione distingue la ricerca dalla maggior parte delle applicazioni scan-to-BIM, dove il modello

è derivato per intero da un'unica fonte metrica e il problema dell'affidabilità si pone in termini di scostamento globale dalla nuvola di punti, non di coesistenza di fonti con gradi di attendibilità strutturalmente diversi.

La distinzione è stata resa operativa attraverso il parametro condiviso "Fonte_Dati" con filtri vista a codice colore che rendono leggibile la provenienza del dato in qualsiasi elaborato estratto dal modello (par. 7.2.7). Come documentato nel par. 8.2.8, i filtri di visualizzazione impostati nell'ambiente di authoring vengono correttamente ereditati dalla piattaforma Autodesk Forma, rendendo la differenziazione cromatica immediatamente visibile anche nella consultazione web-based senza interventi dell'utente, sebbene la visualizzazione risulti statica, poiché il viewer non consente la gestione dinamica dei filtri. Il sistema è di utilizzo immediato e rende efficacemente leggibile la provenienza del dato.

La gestione esplicita dell'incertezza è riconosciuta come priorità metodologica irrinunciabile nei processi HBIM, poiché il controllo e l'organizzazione del livello di incertezza costituiscono la premessa per qualsiasi utilizzo affidabile del modello nel tempo (Mazzei et al., 2024). Il principio operativo che ne deriva è convergente con quello adottato nella presente ricerca, dove la modellazione parametrica è concepita come uno strumento dinamico in cui l'incertezza non viene occultata ma dichiarata e il modello risulta strutturato per accogliere integrazioni successive. La differenza tra il caso dell'ERP abitata e quello di edifici inaccessibili per ragioni occasionali, risiede nella natura dell'inaccessibilità che diventa sociale e amministrativa nel primo caso. In entrambi i casi, tuttavia, la parametrizzazione consente di gestire le lacune informative senza rinunciare alla produzione del modello né rimandarne la realizzazione a una completezza informativa che, nel caso dell'ERP occupata, potrebbe non verificarsi mai.

La distribuzione del LoR nei modelli riflette la condizione strutturale del workflow ibrido. Gli elementi dell'involucro esterno e degli spazi comuni, modellati a partire dalla nuvola di punti, presentano un LoR Alto in tutti e quattro i casi studio; fanno eccezione i pilastri e le aperture del Conjunto Balsas de Ebro Viejo, per i quali la compilazione parziale dei

parametri ha determinato un LoR Medio. Gli interni degli alloggi non accessibili, ricostruiti dalla documentazione d'archivio, presentano un LoR Medio in tutti i casi, a conferma che la validazione indiretta condotta nella fase di *data coordination* costituisce una base sufficiente per attestare la plausibilità della ricostruzione, pur in assenza di un riscontro metrico diretto. Nessun elemento ha ricevuto un LoR Basso, circostanza che riflette la disponibilità di documentazione archivistica sufficiente in tutti e quattro i casi. Il framework è stato applicato uniformemente a tutti i modelli, dimostrando la capacità del workflow di produrre risultati strutturalmente omogenei e confrontabili indipendentemente dal contesto.

Utilità gestionale

Il terzo beneficio concerne la funzione del modello come strumento operativo per l'ente gestore. I modelli sono stati esportati in formato IFC e caricati sulla piattaforma Autodesk Forma Data Management, che funge da CDE conforme alla norma ISO 19650-1:2018 e consente la navigazione tridimensionale e l'interrogazione dei parametri senza software di modellazione. L'esportazione IFC non ha presentato criticità nella mappatura delle famiglie di sistema, e le famiglie caricabili personalizzate sono state correttamente classificate, con i sedici parametri condivisi esportati come property set leggibili nei viewer testati. I collegamenti URL inseriti nei parametri garantiscono la continuità tra modello e documentazione d'archivio all'interno del medesimo ambiente di consultazione.

La struttura informativa è stata predisposta per consentire l'integrazione con i sistemi gestionali dell'ente, possibilità dimostrata nella letteratura sull'edilizia sociale spagnola. L'accessibilità della piattaforma web-based è stata concepita per ridurre la soglia tecnologica di ingresso, nella consapevolezza che la complessità eccessiva del prodotto finale avrebbe costituito un ostacolo all'adozione.

Conoscenza tramite modellazione

Il quarto beneficio riguarda il contributo alla conoscenza architettonica prodotto dal processo stesso di modellazione. La ricostruzione tridimensionale ha reso necessario

un confronto sistematico tra progetto originario e stato di fatto, portando alla luce varianti esecutive e trasformazioni successive, processo descritto in letteratura come decostruzione morfologica dell’architettura (Balzani et al., 2016). Le difformità riscontrate sono il prodotto del confronto tra le due fonti conoscitive del workflow e non sarebbero emerse con la stessa chiarezza da un approccio esclusivamente documentario o esclusivamente scan-to-BIM. L’approccio ibrido ha consentito di mappare queste difformità, inserirle nei parametri informativi del modello e produrre un documento che metta in relazione il progetto con lo stato di fatto, funzionando come strumento di conoscenza critica e di condivisione di questa conoscenza.

Accanto a questi benefici, la sperimentazione del processo ha evidenziato alcune criticità. Analizzare questi punti è fondamentale poiché è proprio nel confronto con le variabili del contesto reale che si misura la tenuta operativa di un workflow di questo tipo.

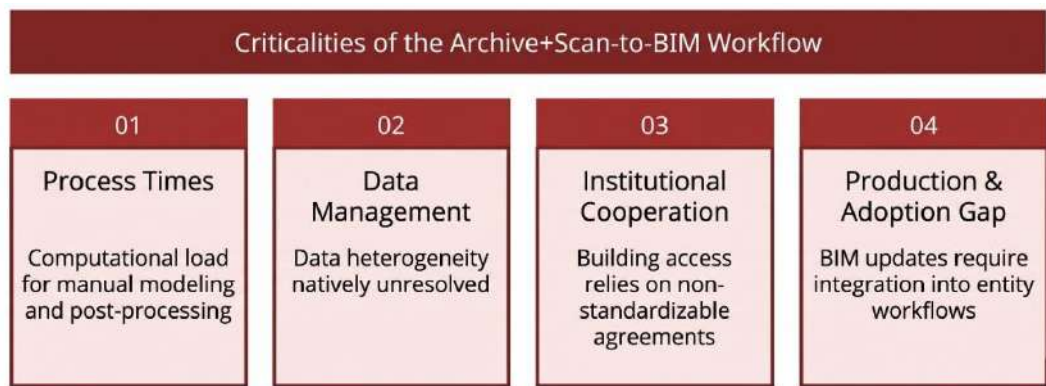


Fig. 83 - Diagramma riassuntivo delle criticità del workflow proposto

Tempi del processo

La modellazione manuale comporta tempi significativi, che aumentano in modo non lineare con la complessità geometrica degli elementi. Il bilanciamento tra accuratezza geometrica e comportamento parametrico è un nodo riconosciuto nella letteratura

HBIM (Martinelli et al., 2022). Come documentato nel paragrafo 8.3, le dieci fasi del workflow non hanno richiesto il medesimo impegno operativo: la raccolta e la strutturazione dei dati archivistici hanno rappresentato le attività di più difficile pianificazione; il *post-processing* ha richiesto un impegno significativo in termini di tempo e risorse computazionali; la modellazione BIM è stata la fase in cui le differenze tra i casi studio si sono manifestate con maggiore evidenza.

I casi spagnoli, con un repertorio costruttivo più regolare, hanno consentito una modellazione interamente basata su famiglie di sistema. I casi italiani hanno richiesto la creazione di famiglie caricabili personalizzate e componenti modellati in ambiente esterno. È possibile interpretare questa asimmetria alla luce delle diverse culture progettuali dell'epoca. I programmi italiani, infatti, appaiono maggiormente legati all'uso artigianale di materiali locali e a una certa ricerca architettonica, mentre il modello spagnolo della *Obra Sindical del Hogar* sembrerebbe rispondere a logiche di standardizzazione più marcate. La fase di raccolta della documentazione presso A.R.C.A. Capitanata ha assorbito alcuni mesi per la comprensione del contesto istituzionale e la navigazione degli archivi; per i casi spagnoli la fase preparatoria è stata più rapida grazie alla documentazione già disponibile in formato digitale.

Gestione dei dati

La quantità e l'eterogeneità delle informazioni associate a ciascun elemento pongono un problema di organizzazione che le proprietà native dei software BIM non risolvono in modo completo, limite riconosciuto nella letteratura, che raccomanda di definire a priori la distribuzione delle informazioni tra proprietà dell'oggetto e collegamenti a report esterni (Martinelli et al., 2022). Nella presente ricerca il limite è stato affrontato attraverso i parametri condivisi organizzati in gruppi tematici e i collegamenti URL al CDE cloud. La compilazione è stata eseguita manualmente, anche se il workflow prevede la possibilità di automatizzare le operazioni ripetitive tramite script Dynamo, ma la scala della sperimentazione non ha reso necessaria l'adozione di strumenti di automazione. In prospettiva, l'applicazione a patrimoni più estesi renderebbe l'automazione una condizione operativa rilevante per la sostenibilità del processo.

Dipendenza dalla cooperazione istituzionale

L'applicazione del workflow presuppone un accordo con l'ente gestore che condiziona l'intera attività di ricerca. Nel caso italiano, infatti, la collaborazione ha richiesto autorizzazioni formali che hanno comportato un allungamento dei tempi, senza raggiungere dimensioni critiche. L'identificazione degli inquilini disposti a consentire l'accesso per le operazioni di scansione è stata una fase non immediata, nella maggior parte dei casi il rifiuto è stato silenzioso e in altri esplicitamente negativo. Come osservato nel par. 8.3, la criticità principale del rilievo non è stata tanto di natura tecnica quanto organizzativa. Per il caso spagnolo, la preesistenza di studi accademici sul polígono ha reso il percorso più rapido ma meno capillare nella conoscenza delle fonti primarie. La replicabilità del workflow su scala più ampia richiede collaborazioni istituzionali analoghe, circostanza che dipende dal contesto politico-amministrativo più che dalla qualità del metodo.

Divario tra produzione e adozione

Nella letteratura HBIM è documentata una distanza significativa tra i modelli prodotti in ambito accademico e il loro utilizzo nella pratica gestionale, legata alla carenza di competenze BIM, all'assenza di standard per l'aggiornamento e alla mancanza di protocolli post-consegna (Lovell et al., 2023). Più che nei costi legati alle licenze software, l'ostacolo risiede nel necessario aggiornamento dei flussi di lavoro interni verso gli standard BIM, un obiettivo che l'ente ha dimostrato di voler perseguire attivamente; il rischio principale era che la complessità del prodotto generasse disinteresse, e per questa ragione il workflow è stato progettato con attenzione all'accessibilità del risultato. Un modello BIM non aggiornato perde progressivamente utilità, e la sostenibilità a lungo termine dipende dalla capacità dell'ente di integrarlo nei propri flussi di lavoro.

Il bilancio, quindi, restituisce un quadro in cui i benefici sono consistenti e verificabili, mentre le criticità non invalidano il metodo ma ne definiscono le condizioni di applicabilità. La tensione tra questi due poli si è manifestata in modo diverso per

ciascun caso studio, in funzione della complessità degli edifici, della qualità delle fonti archivistiche e del contesto istituzionale.

9.2 Limiti della ricerca

Il workflow Archive+Scan-to-BIM è stato pensato proprio per far fronte alle difficoltà di accesso agli alloggi; i limiti riscontrati nei risultati sono quindi una conseguenza diretta delle stesse criticità che hanno reso necessario l'approccio proposto. Questi limiti si articolano in tre ambiti: quelli che discendono dalla natura del patrimonio studiato, quelli legati alle tecnologie e ai software impiegati, e quelli che riguardano l'estensione della sperimentazione condotta.

Limiti legati alla natura del patrimonio

Il limite più caratterizzante coincide con il presupposto della ricerca, ovvero l'impossibilità fisica di accedere alla totalità degli spazi interni degli edifici. Le porzioni model-based dei modelli non possono essere verificate attraverso un confronto diretto con lo stato di fatto. La deviation analysis, applicata sistematicamente alle porzioni reality-based, non è estendibile alle zone d'ombra, per le quali l'unico riscontro possibile è la coerenza dimensionale tra i disegni d'archivio e i dati rilevati nelle porzioni accessibili adiacenti, verificata nella fase di *data coordination*. Questa verifica indiretta consente di valutare la plausibilità della ricostruzione, ma non la sua corrispondenza puntuale con la realtà costruita poiché, varianti esecutive, modifiche successive e interventi manutentivi non documentati, possono aver alterato la configurazione degli spazi interni rispetto ai disegni originali. L'incertezza che ne deriva è gestita attraverso la dichiarazione esplicita del Level of Reliability differenziato, ma non è eliminabile.

La questione si complica quando la documentazione d'archivio stessa presenta lacune o contraddizioni. Quando la documentazione è univoca e corrispondente, la ricostruzione model-based poggia su una base ragionevolmente solida; quando è contraddittoria, la scelta tra le fonti introduce un ulteriore livello interpretativo che resta non verificabile in assenza di accesso diretto. Il criterio adottato, ovvero quella della

prevalenza del dato metrico ove disponibile, ricorso al disegno d'archivio con verifica di coerenza nelle porzioni adiacenti, risolve operativamente le contraddizioni, ma la scelta tra due versioni di un disegno resta un atto interpretativo la cui fondatezza non è dimostrabile senza accesso allo spazio rappresentato.

Limiti legati alle tecnologie e ai software

Il workflow si fonda sulla piattaforma Autodesk Revit per la modellazione, ReCap per la gestione delle nuvole di punti, Point Layout per la deviation analysis, una scelta che garantisce coerenza interna ma vincola i risultati all'ecosistema di un unico produttore. Questa dipendenza da licenze software proprietarie potrebbe costituire un limite economico e operativo per gli enti gestori rendendo preferibile in prospettiva futura l'impiego di software liberi e open-source. L'esportazione in formato IFC mitiga questo vincolo, in quanto, come documentato nel par. 8.2.8, la mappatura delle famiglie di sistema nelle classi IFC non ha presentato criticità, le famiglie caricabili personalizzate sono state correttamente classificate e i sedici parametri condivisi risultano leggibili nei viewer testati (tra cui Autodesk Viewer e Trimble Connect, oltre alla piattaforma Autodesk Forma adottata per la condivisione). Il formato IFC non conserva tuttavia le texture applicate ai materiali e i collegamenti URL ai documenti nel CDE funzionano esclusivamente all'interno della piattaforma cloud. In caso di esportazione del file al di fuori dell'ambiente Forma, i collegamenti alla documentazione non risultano accessibili (par. 8.2.8). L'interoperabilità è dunque effettiva sul piano della geometria e dei parametri, ma parziale sul piano della resa visiva e della continuità documentale.

Un aspetto connesso riguarda la sostenibilità a lungo termine dei modelli prodotti. Il formato nativo .rvt è proprietario e soggetto all'evoluzione delle versioni del software, con possibili problemi di retrocompatibilità nel tempo. Per un modello concepito come strumento di gestione patrimoniale destinato a un utilizzo prolungato, questo rischio assume una rilevanza concreta. Il formato IFC, in quanto standard aperto, attenua il problema garantendo la leggibilità della geometria e dei parametri indipendentemente

dall'evoluzione del software di authoring. Inoltre, la struttura del CDE, in cui modello, documentazione d'archivio e fotografie coesistono in un unico ambiente, fa sì che le informazioni si supportino reciprocamente. Un dato eventualmente degradato nel modello può essere recuperato dalla documentazione originale archiviata nella medesima piattaforma.

Un limite specifico riguarda le librerie BIM standard, progettate per la costruzione del nuovo e basate su logiche di regolarità che spesso non si adattano al patrimonio esistente. Sebbene l'edilizia residenziale pubblica del Novecento presenti geometrie tendenzialmente lineari, la sperimentazione ha comunque fatto emergere diverse eccezioni critiche. Alcuni elementi dotati di caratteristiche meno "standardizzate" hanno infatti richiesto la creazione di famiglie personalizzate o l'importazione di componenti esterni. Questo sforzo di modellazione specifica richiede tempi e competenze che pesano sulla reale replicabilità del processo da parte di operatori non specializzati.

Sebbene l'efficacia della segmentazione automatizzata sia stata verificata in via sperimentale su una porzione limitata del rilievo, l'estrazione degli elementi costruttivi e la successiva modellazione sono state condotte manualmente. Questa scelta è stata dettata dalla volontà di garantire un controllo rigoroso sul confronto tra dati d'archivio e nuvola di punti, ma anche dalla necessità di testare un workflow che restasse sostenibile e attuabile con le risorse tecniche attualmente a disposizione di un ufficio tecnico. L'edilizia residenziale pubblica del Novecento, con la sua regolarità e serialità, costituirebbe un terreno favorevole per la sperimentazione sistematica di queste tecniche, che nella presente ricerca non è stata perseguita poiché la priorità era posta sull'integrazione tra fonti eterogenee e sulla gestione dell'incertezza.

Limiti legati all'ampiezza della sperimentazione

Il workflow è stato applicato a quattro edifici selezionati secondo criteri di rappresentatività tipologica, rilevanza architettonica e confrontabilità transnazionale. I casi italiani portano la firma di Ridolfi e Frankl, la cui produzione presenta un livello di

documentazione archivistica superiore alla media dell'edilizia pubblica del periodo; i casi spagnoli appartengono a un complesso già oggetto di studi accademici. Edifici meno documentati, progettati da tecnici anonimi, potrebbero non offrire le medesime condizioni archivistiche. In assenza di disegni d'archivio sufficientemente dettagliati, la componente model-based del workflow perde la sua base documentale e il modello si riduce alle sole porzioni reality-based, circostanza che non invalida il metodo ma ne restringe il campo di applicazione. Il termine "Archive" nel nome del workflow stabilisce una condizione a priori senza la quale la ricostruzione delle zone d'ombra non sarebbe praticabile.

Un ulteriore limite di scala riguarda il passaggio dall'edificio singolo al patrimonio immobiliare nel suo complesso. Il workflow è stato testato su singoli edifici e non su interi quartieri. L'integrazione BIM-GIS è stata avviata attraverso la georeferenziazione dei modelli in coordinate WGS 84 e la loro importazione in ArcGIS Pro, dove è stato possibile sovrapporre il modello a layer cartografici (ortofoto satellitari e mappe CTR) verificando il posizionamento con uno scarto compatibile con la precisione della fonte cartografica. In tale ambiente, come prospettiva di sviluppo per l'analisi urbana, risulterebbe di grande utilità l'integrazione delle planimetrie originali d'insieme o di cartografie storiche opportunamente georettificate, al fine di comprendere l'origine e l'evoluzione morfologica del complesso patrimoniale nel tempo (Sancho Mir et al., 2017). Il modello risulta interrogabile anche in ambiente GIS, sebbene con limitazioni rispetto all'interrogabilità completa disponibile nell'ambiente di authoring. Applicare questo metodo a tutto il patrimonio provinciale farebbe emergere problemi di scala che la tesi non ha affrontato, come la gestione di molti modelli contemporaneamente, la necessità di regole uguali per tutti gli operatori e l'integrazione definitiva tra i database. Questa prospettiva resta un orizzonte di sviluppo coerente con la predisposizione del workflow, ma non un risultato acquisito.

10. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il workflow Archive+Scan-to-BIM, sviluppato e validato attraverso la sperimentazione su quattro casi studio distribuiti tra la provincia di Foggia e la città di Saragozza, ha dimostrato che è possibile produrre modelli BIM geometricamente coerenti e informativamente strutturati anche quando il rilievo strumentale copre soltanto una frazione degli spazi dell'edificio. La chiave di questa possibilità risiede nell'integrazione disciplinata tra due fonti conoscitive di natura diversa, il dato metrico derivato dalla scansione laser e il dato dimensionale ricavato dalla documentazione d'archivio, all'interno di un processo che non nasconde la disomogeneità delle fonti ma la dichiara, la quantifica e la rende leggibile nel modello finale attraverso un apparato parametrico dedicato. Il risultato non è un modello che simula una conoscenza completa dell'edificio, ma un modello che rappresenta fedelmente lo stato della conoscenza disponibile, distinguendo ciò che è stato misurato da ciò che è stato ricostruito e ciò che resta incerto.

Questa impostazione segna un avanzamento rispetto allo stato dell'arte per più ragioni che convergono nella stessa direzione.

In primo luogo, la ricerca ha dimostrato che i metodi HBIM, sviluppati prevalentemente per il patrimonio storico-monumentale e per edifici integralmente accessibili, possono essere adattati con efficacia al patrimonio residenziale pubblico del Novecento, una categoria edilizia che la letteratura ha trattato marginalmente nonostante la sua rilevanza quantitativa, sociale e, in molti casi, architettonica. I quattro casi studio, ovvero il quartiere INA-Casa di Cerignola, il complesso ISES di Foggia, la torre e i blocchi lineari del Conjunto Balsas de Ebro Viejo a Saragozza; hanno dimostrato che l'edilizia ERP del secondo dopoguerra pone problemi specifici nonostante la relativa semplicità geometrica. Queste caratteristiche richiedono soluzioni metodologiche dedicate che

spaziano dalla gestione delle zone d'ombra alla sintesi di fonti archivistiche eterogenee, fino alla necessità di un sistema informativo aperto e interoperabile, progettato per offrire funzionalità avanzate nella gestione e condivisione dei dati.

In secondo luogo, l'approccio ibrido Archive+Scan-to-BIM ha introdotto nel processo HBIM la coesistenza esplicita di fonti con gradi di attendibilità diversi. Nella maggior parte delle applicazioni scan-to-BIM documentate in letteratura, il problema dell'affidabilità si pone in termini di scostamento tra il modello e un'unica fonte metrica omogenea. Nel workflow proposto il problema è più articolato, in quanto il modello integra porzioni derivate dal rilievo strumentale e porzioni ricostruite dalla documentazione grafica, la cui qualità dipende dalla completezza, dalla leggibilità e dalla coerenza dei disegni d'archivio reperiti, che possono presentare lacune, contraddizioni o alterazioni rispetto all'effettiva configurazione costruita. Il framework di controllo qualità a tre dimensioni (Level of Accuracy, Level of Quality, Level of Reliability) applicato uniformemente a tutti i casi studio, ha fornito lo strumento per governare questa complessità senza ridurla artificiosamente, rendendo ogni elemento del modello interrogabile non solo per le sue proprietà geometriche e materiche, ma anche per il grado di fiducia che è legittimo attribuirgli.

In terzo luogo, la comparazione transnazionale Italia-Spagna, condotta su edifici appartenenti alla stessa stagione costruttiva ma inseriti in quadri istituzionali e tradizioni progettuali differenti, ha consentito di verificare la tenuta del workflow al variare del contesto. Le differenze riscontrate nella complessità della modellazione, nella disponibilità e nell'organizzazione delle fonti archivistiche, nella cultura costruttiva degli edifici, non hanno richiesto modifiche alla struttura del workflow, ma soltanto adattamenti operativi all'interno delle singole fasi. Questa circostanza conferma che il metodo proposto non è calibrato su un caso specifico, ma possiede un grado di generalità sufficiente a sostenere applicazioni in contesti diversi, a condizione che sussista il prerequisito archivistico dichiarato nel nome stesso del workflow.

La sperimentazione ha inoltre prodotto un risultato che trascende il piano strettamente metodologico e investe la relazione tra ricerca e gestione del patrimonio. Nell'ambito della collaborazione con A.R.C.A. Capitanata, i modelli realizzati non sono rimasti prodotti accademici confinati al perimetro della tesi, ma hanno funzionato come strumento di interlocuzione con l'ente gestore, dimostrando concretamente le potenzialità della documentazione digitale per un'amministrazione che gestisce un patrimonio immobiliare vasto, frammentato nella documentazione e soggetto a tensioni abitative significative. Il workflow è stato concepito per essere replicabile e adottabile come pratica ricorrente, non come operazione una tantum vincolata alla presenza del ricercatore. La struttura aperta del modello, predisposta per accogliere dati futuri attraverso parametri compilabili dall'ente, e la scelta di una piattaforma di condivisione accessibile via browser senza software specialistico, rispondono a questa intenzione progettuale. Si tratta di un passaggio rilevante, perché la distanza tra modelli BIM prodotti in ambito accademico e la loro effettiva adozione nella pratica gestionale è un problema ricorrente nella letteratura HBIM, e la ricerca ha tentato di affrontarlo non a posteriori, ma come criterio di progettazione del workflow stesso.

Un aspetto che merita di essere evidenziato riguarda il potenziale "circolo virtuoso" tra documentazione e accessibilità. Il limite dell'inaccessibilità degli interni è reale e strutturale, ma non è immutabile. La creazione di modelli che rendono visibile il valore architettonico di edifici finora percepiti come patrimonio residuale, "patrimonio grigio", sospeso tra funzione abitativa e riconoscimento culturale, può contribuire a modificare la percezione che gli stessi abitanti hanno dell'edificio in cui vivono. Un inquilino o un "vicino" che comprende di abitare in un'architettura riconosciuta, documentata e studiata potrebbe essere più disponibile a consentire l'accesso per le operazioni di rilievo, alimentando un processo incrementale in cui ogni nuova acquisizione arricchisce il modello e riduce progressivamente l'estensione delle zone d'ombra. Questa dinamica non è verificabile all'interno del perimetro temporale della presente ricerca, ma è coerente con la logica di aggiornabilità su cui il workflow è stato costruito e rappresenta una prospettiva concreta per le applicazioni future.

Per quanto riguarda gli sviluppi della ricerca, è possibile distinguere tra direzioni di lavoro praticabili nel breve periodo e orizzonti di più ampio respiro. Nel breve termine, l'estensione del workflow a un numero maggiore di casi studio costituisce la prosecuzione naturale della sperimentazione, con l'obiettivo di costruire progressivamente una mappatura digitale del patrimonio ERP a scala provinciale. L'applicazione a edifici progettati da tecnici meno documentati rispetto a Ridolfi e Frankl permetterebbe di verificare la tenuta del metodo in condizioni archivistiche meno favorevoli, chiarendo il confine operativo oltre il quale la componente "Archive" del workflow non dispone di materiale sufficiente per alimentare la ricostruzione delle zone d'ombra. Parallelamente, l'evoluzione delle tecnologie di acquisizione e di elaborazione potrebbe rendere più efficienti alcune fasi del processo, grazie a strumenti di rilievo portatili più rapidi nel posizionamento, algoritmi di registrazione più robusti in condizioni di sovrapposizione limitata, procedure di segmentazione semantica delle nuvole di punti assistite da approcci di apprendimento automatico. La regolarità e la serialità tipologica dell'edilizia residenziale pubblica del Novecento costituiscono un terreno particolarmente favorevole per l'applicazione di queste tecniche, come la sperimentazione esplorativa condotta su uno dei casi studio ha confermato.

In una prospettiva di più lungo periodo, lo sviluppo più rilevante è rappresentato dall'integrazione sistematica tra modelli BIM e sistemi informativi geografici a scala patrimoniale. La georeferenziazione dei modelli, già realizzata nella presente sperimentazione e verificata in ambiente GIS, predispone il passaggio dalla scala dell'edificio singolo alla scala del patrimonio immobiliare nel suo complesso. Un sistema in cui i modelli BIM dei singoli edifici dialoghino con una piattaforma GIS che gestisce l'intero parco immobiliare dell'ente consentirebbe di incrociare i dati architettonici contenuti nei modelli con informazioni di natura catastale, demografica, manutentiva ed energetica, producendo uno strumento di pianificazione degli interventi fondato su una conoscenza strutturata e aggiornabile. Questa prospettiva richiede la definizione di protocolli di interoperabilità tra i due ambienti, la standardizzazione delle procedure di conversione tra formati BIM e formati geospaziali e, soprattutto, la

formazione del personale tecnico degli enti gestori all'uso di strumenti che attualmente non rientrano nelle loro prassi operative. Il workflow proposto, con la sua architettura aperta e la predisposizione all'esportazione in standard interoperabili, è stato concepito per rendere possibile questa evoluzione senza richiedere una ridefinizione dell'impianto metodologico.

Un terreno complementare di sviluppo riguarda l'automazione delle operazioni ripetitive di popolamento parametrico attraverso strumenti di visual programming (VPL). Nella sperimentazione condotta, la compilazione manuale dei sedici parametri condivisi per ciascun elemento è risultata gestibile alla scala dei quattro casi studio, ma potrebbe diventare insostenibile in applicazioni su patrimoni più estesi. L'automazione di queste operazioni, pur presentando complessità implementative legate alla variabilità delle condizioni riscontrabili nei diversi edifici, rappresenta una condizione operativa necessaria per la scalabilità del processo.

Al termine di questo percorso, è opportuno collocare i risultati ottenuti all'interno della riflessione disciplinare che li ha generati. La ricerca si è mossa all'interno del campo del Disegno e della Rappresentazione, e i suoi strumenti, il rilievo, la modellazione, la restituzione grafica, l'organizzazione delle informazioni spaziali, appartengono al nucleo consolidato della disciplina. Ciò che la tesi ha proposto è un'estensione del perimetro di applicazione di questi strumenti verso un patrimonio che la cultura architettonica ha talvolta considerato al di sotto della soglia di interesse per la documentazione scientifica. L'edilizia residenziale pubblica del secondo Novecento non è un monumento, ma non è nemmeno un edificio qualunque, poiché rappresenta il prodotto di politiche pubbliche, di competenze progettuali spesso elevate e di scelte costruttive che riflettono le culture materiali locali, costituendo soprattutto lo spazio in cui vive una parte significativa della popolazione. Rappresentare questo patrimonio, nel senso tecnico e disciplinare del termine, ovvero rilevarlo, misurarlo, modellarlo e restituirlo in forma interrogabile, significa riconoscerne il valore e predisporre le condizioni per la sua conservazione consapevole.

Il disegno d'archivio assume così un ruolo che va oltre quello di fonte ausiliaria per colmare le lacune del rilievo. I disegni originali reperiti negli archivi sono documenti che testimoniano un'intenzione progettuale, una cultura tecnica, un rapporto con i materiali e con il contesto. Il confronto tra questi disegni e lo stato attuale degli edifici, reso sistematico dal workflow attraverso la fase di *data coordination*, non produce soltanto una verifica dimensionale, ma una lettura critica delle trasformazioni subite dall'architettura nel tempo, ciò che la letteratura descrive come decostruzione morfologica. La rappresentazione digitale, in questa prospettiva, va oltre la semplice sostituzione del disegno d'archivio e si pone l'obiettivo di interrogarlo e di verificarne la corrispondenza con la realtà costruita, per poi integrarlo in un ambiente tridimensionale e informativo capace di amplificarne la leggibilità e la condivisibilità. È in questo passaggio dal disegno come traccia storica alla rappresentazione come strumento di conoscenza attiva, che la ricerca individua il proprio contributo alla disciplina. Il modello BIM prodotto dal workflow non è una semplice digitalizzazione dell'esistente, ma un atto di interpretazione e di sintesi che appartiene pienamente alla tradizione del rilevamento architettonico e della restituzione critica, declinata con gli strumenti e le esigenze del presente.

RICONOSCIMENTI

Desidero ringraziare il prof. Cesare Verdoscia per la guida scientifica e la fiducia accordatami nel corso di questo percorso dottorale, l'ing. Riccardo Tavolare per il confronto costante e il prof. Luis Agustín-Hernández e tutto il gruppo di ricerca dell'Universidad de Zaragoza per l'accoglienza e la collaborazione durante il periodo di cotutela. Un ringraziamento particolare va a Michele Buldo e Antonella Musicco, colleghi e amici, per il continuo supporto scientifico e umano di questi anni. Ringrazio i coordinatori del corso di dottorato, il prof. Vito Iacobellis e il prof. Francesco Fiorito, per la disponibilità dimostrata durante l'intero percorso. Ringrazio inoltre tutto il personale di A.R.C.A. Capitanata, in particolare l'Amministratore Unico dott. Giuseppe Liscio, l'ing. Vincenzo Devitiis, l'arch. Annamaria Tomasulo e l'ing. Stefano Salvemini, il cui supporto è stato determinante per l'accesso agli edifici e il reperimento della documentazione d'archivio nonché per la definizione dell'intero lavoro di ricerca.

BIBLIOGRAFIA

Aicardi, I., Chiabro, F., Lingua, A. M., Noardo, F. (2018) 'Recent trends in cultural heritage 3D *survey*: the photogrammetric computer vision approach', Journal of Cultural Heritage, 32, pp. 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.006>

Albani, F. Di Biase, C. (2013) Architettura minore del XX secolo. Strategie di tutela e intervento. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore.

Alshawabkeh, Y. Baik, A. (2023) 'Integration of photogrammetry laser scanning for enhancing scan-to-HBIM modeling of Al Ula heritage site', Heritage Science, 11, p. 147. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00997-2>

Anaclerio, F. P., Ariola, L., Gabrieli, R., Mezzapesa, I. L., Roberto, N., Tafuni, C., Villasmunta, M. E. (2023) Rigenerare l'abitare urbano. Strategie per la definizione di nuovi modelli dell'abitare. Tesi di laurea magistrale. Coordinatore: Prof. Nicola Martinelli. Bari: Politecnico di Bari, DICAR, A.A. 2022/2023.

Andriasyan, M., Moyano, J., Nieto-Julian, J. E., Anton, D. (2020) 'From Point Cloud Data to Building Information Modelling: An Automatic Parametric Workflow for Heritage', Remote Sensing, 12(7), p. 1094. <https://doi.org/10.3390/rs12071094>

Angeloni, R., Calvano, M., Carnevali, L. (2023) 'Enabling Scan-to-BIM workflow for heritage conservation management process', Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-M-2-2023, pp. 79-86. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-79-2023>

Anil, E. B., Tang, P., Akinci, B., Huber, D. (2013) 'Deviation analysis method for the assessment of the quality of the as-is Building Information Models generated from point cloud data', *Automation in Construction*, 35, pp. 507-516.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.06.003>

Annese, M., M., Ariola, L., Mezzapesa, I.L., Roberto, N.. (2024) 'The regeneration policy housing issue. The Italian case read through the history of Foggia (IT)', *City, Territory Architecture*, 11(5).
<https://doi.org/10.1186/s40410-024-00225-9>

Apollonio, F. I., Gaiani, M., Sun, Z. (2013) '3D Modeling Data Enrichment in Digital Reconstruction of Architectural Heritage', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W2, pp. 43-48.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-43-2013>

Apollonio, F. I. (2016) 'Classification schemes for visualization of uncertainty in digital hypothetical reconstruction', in Munster, S. et al. (eds.) *3D Research Challenges in Cultural Heritage II*. Cham: Springer, pp. 173-197.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-47647-6_9

Apollonio, F. I., Fallavollita, F., Giovannini, E. C. (2017) 'The reconstruction of drawn architecture', *Studies in Digital Heritage*, 1(2), pp. 380-395.
<https://doi.org/10.14434/sdh.v1i2.23243>

A.R.C.A. Capitanata (2025) *Linee di Indirizzo Generali - Triennio 2025-2027*. Foggia: A.R.C.A. Capitanata.

Attenni, M., Rossi, M. L. (2022) *HBIM come processo di conoscenza. Modellazione e sviluppo del tipo architettonico*, FrancoAngeli, Milano (Collana: Forme del disegno).

Attenni, M., Calvano, M., Salvalai, G., et al. (2025) 'Integrating Building Information Modeling for Enhanced Efficiency Sustainability in Public Construction: The Sapienza University Protocol', *Heritage*, 8(4), p. 114. <https://doi.org/10.3390/heritage8040114>

Balzani, M., Maietti, F., Medici, M. (2016) 'La rappresentazione BIM per la documentazione e l'analisi storico-critica del patrimonio modernista', *DisegnareCon*, 9(16), pp. 8.1-8.7. <https://doi.org/10.6092/issn.1828-5961/6595>

Banfi, F. (2017) 'BIM orientation: Grades of generation information for different type of analysis management process', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W5, pp. 57-64. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-57-2017>

Banfi, F. Liu, W. (2026) 'The State of HBIM in Digital Heritage: A Critical Bibliometric Assessment of Six Emerging Frontiers (2015-2025)', *Applied Sciences*, 16(2), p. 906. <https://doi.org/10.3390/app16020906>

Bassier, M., Mattheuwsen, L., Vergauwen, M. (2019) 'BIM Reconstruction: Automated Procedural Modeling from Point Cloud Data', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W17, pp. 53-60. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-53-2019>

Besl, P. J. McKay, N. D. (1992) 'A method for registration of 3-D shapes', *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 14(2), pp. 239-256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>

Bianchini, C. (2014) 'Survey, Modeling, Interpretation as Multidisciplinary Components of a Knowledge System', *SCientific RESearch Information Technology*, 4(1), pp. 15-24. <https://doi.org/10.2423/i22394303v4n1p15>

Bianchini, C., Attenni, M., Potesta, G. (2021) 'Regenerative Design Tools for the Existing City: HBIM Potentials', in Andreucci, M. B. et al. (eds.) *Rethinking Sustainability Towards a Regenerative Economy*. Cham: Springer International Publishing, pp. 23-43. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71819-0_2

Bianchini, C. Nicastro, S. (2018) 'La definizione del Level of Reliability: un contributo alla trasparenza dei processi di Historic-BIM', *Building Information Modeling, Data & Semantics*, 2, pp. 45-59.

Block, M. Rossi-Schwarzenbeck, M. (2021) 'Strategie Social openBIM per gli enti gestori dell'edilizia residenziale pubblica', *TECHNE - Journal of Technology for Architecture Environment*, 21, pp. 236-248. <https://doi.org/10.36253/techne-9842>

Bonduel, M., Bassier, M., Vergauwen, M., Pauwels, P., Klein, R. (2017) 'Scan-to-BIM output validation: Towards a stardized geometric quality assessment of building information models based on point clouds', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W8, pp. 45-52. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-45-2017>

Borkowski, A. S. Kubrat, A. (2024) 'Integration of laser scanning, digital photogrammetry BIM technology: a review case studies', *Eng - Advances in Engineering*, 5(4), pp. 2395-2409. <https://doi.org/10.3390/eng5040125>

Bottini, F. (2001) 'Gli obiettivi sociali: un'alfabetizzazione alla modernita', in Di Biagi, P. (ed.) *La gre ricostruzione. Il piano INA-Casa e l'Italia degli anni '50*. Roma: Donzelli Editore, pp. 63-76.

Brumana, R., Banfi, F., Cantini, L., Previtali, M., Della Torre, S. (2018) 'Generative HBIM modelling to embody complexity (LOD, LOG, LOA, LOI): *surveying, preservation, site intervention* - the Basilica di Collemaggio

(L'Aquila)', *Applied Geomatics*, 10(4), pp. 545-567.
<https://doi.org/10.1007/s12518-018-0233-3>

Bruno, N., Roncella, R., Zerbi, A. (2022) 'Integrated processing of photogrammetric laser scanning data for frescoes restoration', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-2/W1-2022, pp. 105-112.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-105-2022>

Bruno, N. Roncella, R. (2018) 'A restoration oriented HBIM system for cultural heritage documentation: the case study of Parma Cathedral', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, pp. 171-178.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-171-2018>

Brusaporci, S., Ruggieri, G., Maiezza, P., Tata, A. (2023) 'Scan-to-HBIM Reliability', *Drones*, 7(7), p. 426. <https://doi.org/10.3390/drones7070426>

Buldo, M., Agustin-Hernez, L., Tavolare, R. Verdoscia, C. (2023) 'A Scan-to-BIM workflow proposal for Cultural Heritage: Automatic point cloud segmentation parametric-adaptive modelling of vaulted systems', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-2-2023, pp. 333-340.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-333-2023>

Buldo, M. (2024) *Scan-to-BIM for Architectural Heritage Enhancement Preservation. Leading Techniques Advanced Automation Processes*. Tesi di Dottorato, Politecnico di Bari.

Buldo, M., Rossi, N., Tavolare, R., Verdoscia, C. (2025) 'Point Cloud Segmentation Using Model-Fitting, Artificial Intelligence, Local Curvature Techniques', in *Ekphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione*. Atti del 46 Convegno Internazionale UID. Milano: FrancoAngeli.
<https://doi.org/10.3280/oa-1430-c939>

Capomolla, R. Vittorini, R. (eds.) (2003) *L'architettura INA Casa (1949-1963). Aspetti e problemi di conservazione e recupero*. Roma: Gangemi.

Carughi, U. Visone, M. (eds.) (2017) *Time Frames. Conservation Policies for Twentieth-Century Architectural Heritage*. London-New York: Routledge.

Casciato, M. (2001) 'L'invenzione della realta: realismo e neo-realismo nell'Italia degli anni cinquanta', in Di Biagi, P. (ed.) *La gre ricostruzione. Il piano INA-Casa e l'Italia degli anni '50*. Roma: Donzelli Editore, pp. 205-222.

Castellano-Roman, M., Garcia-Martinez, A., Lopez, M. L. P. (2022) 'Social Housing Life Cycle Management: Workflow for the Enhancement of Digital Management Based on Building Information Modelling (BIM)', *Sustainability*, 14(12), p. 7488. <https://doi.org/10.3390/su14127488>

Cellini, F. D'Amato, C. (2005) *Le architetture di Ridolfi e Frankl*. Milano: Electa.

Cera, S., Argiolas, R., Bagnolo, V. (2024) 'HBIM as an Active Tool for the Study of On-Paper Architecture: The Case of the Unbuilt Project for a Maritime School in Cagliari', in *Graphic Horizons. Volume 2 - Graphics for Education Production*. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-57575-4>

Cervero Sanchez, N. (2017) *Las huellas de la vivienda protegida en Zaragoza 1939-1959*. Zaragoza: Rolde de Estudios Aragoneses / Prensas de la Universidad de Zaragoza.

Cervero Sanchez, N. (2022) *Atlas tipologico. Vivienda publica en Zaragoza*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza / Catedra Zaragoza Vivienda.

Charlton, J., Sakhakarmi, S., Liu, X. (2021) 'The complexities of managing historic buildings with BIM', *Engineering, Construction Architectural*

Management, 28(2), pp. 570-583. <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2019-0621>

Chiabro, F., Sammartano, G., Spano, A. (2016) 'Historical buildings models their hling via 3D *survey*: From point clouds to user-oriented HBIM', Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B5, pp. 633-640. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-633-2016>

Chiarantoni, C. (2022) 'Social housing as a response to housing needs; the case of Biccari neighborhood in Foggia', in Proceedings International Conference on Construction Research, pp. 97-104. <https://doi.org/10.1201/9781003260554-14>

Cignoni, P., Rocchini, C., Scopigno, R. (1998) 'Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces', Computer Graphics Forum, 17(2), pp. 167-174. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00236>

Conte, S. (2020) Dal progetto di Adriano Olivetti: Eduardo Vittoria. Ricerca, disegno e design. Nuovi sistemi di rappresentazione per la valorizzazione dell'architettura moderna. Tesi di Dottorato. Milano: Politecnico di Milano.

Conte, S. Rossi, M. (2019) 'Il modello BIM per la valorizzazione dell'architettura moderna. Il caso Olivetti', Building Information Modeling, Data & Semantics, 4, pp. 15-26.

Cortesi, M. (2024) 'From Research to Application of HBIM for Conservation Management Plan: The Experience of the School of Mathematics by Gio Ponti in Rome', in Proceedings of HEDIT 2024. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de Valencia. <https://doi.org/10.4995/HEDIT2024.2024.17728>

Croce, V., Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L., Veron, P. (2023) 'H-BIM Artificial Intelligence: Classification of Architectural Heritage for Semi-

Automatic Scan-to-BIM Reconstruction', *Sensors*, 23(5), p. 2497.
<https://doi.org/10.3390/s23052497>

Cundari, C. (2012) *Il rilievo architettonico. Ragioni, fondamenti, applicazioni*. Roma: Aracne.

Cursi, S., Simeone, D., Fioravanti, A., Trillo, C. (2022) 'Linking external knowledge to heritage BIM', *Automation in Construction*, 141, p. 104444.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104444>

D'Auria, S. (2013) *Un nuovo approccio di analisi, gestione e controllo del processo edilizio sul patrimonio storico*. Tesi di Dottorato, XII Ciclo (Nuova Serie), Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture e del Recupero Edilizio ed Urbano. Salerno: Università degli Studi di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Civile. Tutor: Prof. E. Sicignano; Co-tutor: Prof. S. Barba.

De Luca, L. (2011) *La photomodelisation architecturale. Releve, modelisation et representation d'edifices a partir de photographies*. Paris: Eyrolles.

DGCC - Direzione Generale Creatività Contemporanea (2024) *Il Censimento delle architetture italiane dal 1945 ad oggi*. Ministero della Cultura.
<https://architetturecontemporanee.cultura.gov.it>

Di Biagi, P. (ed.) (2001) *La gre ricostruzione. Il piano INA-Casa e l'Italia degli anni cinquanta*. Roma: Donzelli Editore.

Docci, M. Maestri, D. (2001) *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*. Roma-Bari: Laterza.

Docci, M., Maestri, D., Gaiani, M. (2011) *Scienza del disegno*. Torino: CittaStudi.

DOCOMOMO Italia (2024) Registro DOCOMOMO Italia.
<https://www.docomomoitalia.it>

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K. (2011) BIM Hbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers Contractors. 2nd edn. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Escudero, D. (2023a) Neorealist Architecture. Aesthetics of Dwelling in Postwar Italy. London-New York: Routledge.

Escudero, P. A. (2023b) 'Scan-to-HBIM: automated transformation of point clouds into 3D BIM models for the digitization preservation of historic buildings', VITRUVIO - International Journal of Architecture Technology Sustainability, 8(2), pp. 52-63. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20413>

Escudero, P. A., Moyano, J., Anton, D., et al. (2024) 'Optimising Floor Plan Extraction: Applying DBSCAN K-Means in Point Cloud Analysis of Valencia Cathedral', Heritage, 7(10), pp. 5787-5799. <https://doi.org/10.3390/heritage7100272>

Faccitondo, L. Panzini, F. (2023) 'INA-Casa in Puglia: modernità costruttiva di Mario Ridolfi e Volfango Frankl', Bollettino del Centro di Studi per la Storia dell'Architettura, n.s. 7, pp. 57-78.

FADGI - Federal Agencies Digital Guidelines Initiative (2023) Technical Guidelines for Digitizing Cultural Heritage Materials. 3rd Edition. Washington, D.C.: Library of Congress. <https://www.digitizationguidelines.gov>

Fai, S., Graham, K., Duckworth, T., Wood, N., Ouimet, C. (2011) 'Building Information Modeling Heritage Documentation', in Proceedings of the XXIIIrd International CIPA Symposium. Prague: CIPA.

Federcasa (2023) Dati sul patrimonio ERP. Roma: Federcasa.
<https://www.federcasa.it>

Gabellini, P. (2001) 'I manuali: una strategia normativa', in Di Biagi, P. (ed.) *La gre ricostruzione. Il piano INA-Casa e l'Italia degli anni '50*. Roma: Donzelli Editore, pp. 99-127.

Gabellone, F. (2012) 'La trasparenza scientifica in archeologia virtuale: una lettura critica al principio N.7 della Carta di Siviglia', *SCIRES-IT - SCientific RESearch Information Technology*, 2(2), pp. 99-124.
<https://doi.org/10.2423/i22394303v2n2p99>

Gherardini, F. Sirocchi, S. (2022) 'Systematic integration of 2D 3D sources for the virtual reconstruction of lost heritage artefacts', *Heritage Science*, 10(1), p. 96. <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00711-8>

Giannattasio, C., Cundari, M. R., Deiana, C., Porceddu, P. R. (2020) 'The BIM Model for Existing Building Heritage', in *Graphical Heritage*. Vol. 1. Cham: Springer, pp. 311-322.

Grussenmeyer, P., Alby, E., Les, T., Koehl, M., Guillemain, S., Hullo, J.-F., Assali, P., Smigiel, E. (2012) 'Recording approach of heritage sites based on merging point clouds from high resolution photogrammetry Terrestrial Laser Scanning', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXIX-B5, pp. 553-558.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-553-2012>

Holz, D., Ichim, A. E., Tombari, F., Rusu, R. B., Behnke, S. (2015) 'Registration with the point cloud library: a modular framework for aligning in 3-D', *IEEE Robotics Automation Magazine*, 22(4), pp. 110-124.
<https://doi.org/10.1109/MRA.2015.2432331>

Housing Europe (2021) The State of Housing in the EU 2021. Brussels: Housing Europe - The European Federation of Public, Cooperative & Social Housing. <https://www.housingeurope.eu>

Hu, L. Zou, Y. (2022) 'Research hotspots trends in heritage building information modeling: a review based on CiteSpace analysis', Humanities Social Sciences Communications, 9, p. 374. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01414-y>

Istituto Centrale per la Digitalizzazione del Patrimonio Culturale - ICDP (2022) Piano Nazionale di Digitalizzazione del Patrimonio Culturale (PND): Linee guida. Roma: Ministero della Cultura. <https://digitallibrary.cultura.gov.it/il-piano-nazionale-di-digitalizzazione-del-patrimonio-culturale>

Inzerillo, L., Nigrelli, G., Nigrelli, M., Lo Turco, M. (2016) 'BIM e beni architettonici: verso una metodologia operativa per la conoscenza e la gestione del patrimonio culturale', DisegnareCon, 9(16), pp. 16.1-16.9. <https://doi.org/10.6092/issn.1828-5961/6605>

Liu, J., Willems, B., Lombaert, G. (2023) 'Static Terrestrial Laser Scanning (TLS) for Heritage Building Information Modeling (HBIM): A Systematic Review', Virtual Worlds, 2(2), pp. 90-114. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds2020006>

Lo Turco, M. (2015) 'Rappresentare e gestire patrimoni immobiliari: il BIM per il Facility Management', Techne - Journal of Technology for Architecture Environment, 2(15), pp. 33-48.

Lopez, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gomez-Garcia-Bermejo, J., Zalama, E. (2017) 'A framework for using point cloud data of heritage buildings toward geometry modeling in a BIM context: a case study on Santa Maria La Real De

Mave Church', *International Journal of Architectural Heritage*, 11(7), pp. 965-986. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1325541>

Lopez, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gomez-Garcia-Bermejo, J., Zalama, E. (2018) 'A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)', *Multimodal Technologies Interaction*, 2(2), p. 21. <https://doi.org/10.3390/mti2020021>

Lovell, L. J., Davies, R. J., Hunt, D. V. L. (2023) 'The application of Historic Building Information Modelling (HBIM) to cultural heritage: a review', *Heritage*, 6(10), p. 350. <https://doi.org/10.3390/heritage6100350>

Maddaluno, R. (2007) *Il quartiere INA-Casa di Mario Ridolfi e Wolfgang Frankl a Cerignola. Tesi di Dottorato, XIX Ciclo, Dottorato di Ricerca in Ingegneria Edile.* Roma: Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Facoltà di Ingegneria.

Maietti, F. Tasselli, N. (2020) 'Connessioni digitali. Integrazione dati in ambiente BIM per l'intervento sul patrimonio esistente', in Arena, A. et al. (eds.) *Connettere. Atti del 42 Convegno Internazionale UID.* Milano: FrancoAngeli, pp. 585-598. <https://doi.org/10.3280/oa-548.34>

Maiezza, P. (2019) 'As-Built Reliability in Architectural HBIM Modeling', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W9, pp. 461-466. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-461-2019>

Maiezza, P. Tata, A. (2021) 'Stard for geometric informative reliabilities in HBIM models', *DisegnareCon*, 14(27), pp. 15.1-15.10. <https://doi.org/10.6092/issn.1828-5961/13087>

Martinelli, L., Calcerano, F., Gigliarelli, E. (2022) 'Methodology for an HBIM workflow focused on the representation of construction systems of built

heritage', *Journal of Cultural Heritage*, 55, pp. 277-289.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.03.016>

Marti Nasarre, A. (1994) *La vivienda obrera en Zaragoza 1939-1947* (Cuadernos de Zaragoza, n. 64). Zaragoza: Ayuntamiento de Zaragoza.

Matrone, F., Lingua, A., Pierdicca, R., Malinverni, E. S., Paolanti, M., Grilli, E., Remondino, F., Murtiyoso, A., Les, T. (2019) 'HBIM in a Semantic 3D GIS Database', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, pp. 857-865. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-857-2019>

Matrone, F., Grilli, E., Lingua, A., Rinaudo, F. (2023) 'The HBIM-GIS Main10ance Platform to Enhance the Maintenance Conservation of Historical Built Heritage', *Sensors*, 23(19), p. 8112. <https://doi.org/10.3390/s23198112>

Mazzei, A., Martinelli, L., Empler, T., Cessari, L., Gigliarelli, E. (2024) 'Modelling for uncertainty in HBIM processes', *VITRUVIO - International Journal of Architecture Technology Sustainability*, 9(2), p. 22093. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2024.22093>

Monclus, J. Diez Medina, C. (2016) 'Modernist housing estates in European cities of the Western Eastern Blocs', *Planning Perspectives*, 31(4), pp. 533-562. <https://doi.org/10.1080/02665433.2015.1102642>

Monclus, J., Labarta, C., Diez Medina, C. (eds.) (2015) *Regeneracion urbana (II). Propuestas para el poligono Balsas de Ebro Viejo*. Zaragoza. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.

Moreno Bazan, A., Castellano-Roman, M., Farias, P. A. (2021) 'BIM-Based Methodology for the Management of Public Heritage. CASE Study: Algeciras Market Hall', *Applied Sciences*, 11(24), p. 11899. <https://doi.org/10.3390/app112411899>

Moyano, J., Anton, D., Nieto-Julian, J. E., Escudero, P. A. (2023) 'Integration of dynamic information on energy parameters in HBIM models', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-2-2023, pp. 1089-1096. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1089-2023>

Murphy, M., McGovern, E., Pavia, S. (2009) 'Historic building information modelling (HBIM)', *Structural Survey*, 27(4), pp. 311-327. <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>

Murphy, M., McGovern, E., Pavia, S. (2013) 'Historic building information modelling - Adding intelligence to laser image-based surveys of European classical architecture', *ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing*, 76, pp. 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006>

Musicco, A., Verdoscia, C., Tavolare, R., Buldo, M. (2021) 'Evaluation of the Geometric Reliability in the Scan to BIM Process: The Case Study of Santa Croce Monastery', in Portoghesi, P. (ed.) *Abitare la Terra - Dwelling on Earth*. Quaderni. Supplemento alla Rivista di Geoarchitettura, vol. 6. Roma: Gangemi Editore.

Musicco, A. (2022). *Novel digital paradigms to support the Architectural Heritage knowledge process* (Tesi di dottorato, Politecnico di Bari). UNitesi.

Musicco, A., Buldo, M., Rossi, N., Tavolare, R., Verdoscia, C. (2024) 'Enhancing 3D Modeling Efficiency via Semi-Automatic Point Cloud Segmentation Multi-LoD Mesh Reconstruction', *SCIRES-IT - SCientific REsearch Information Technology*.

Nicoloso, P. (2001) 'Gli architetti: il rilancio di una professione', in Di Biagi, P. (ed.) *La gre ricostruzione. Il piano INA-Casa e l'Italia degli anni Cinquanta*. Roma: Donzelli Editore, pp. 77-98.

Nomisma - Federcasa (2020) Dimensione del disagio abitativo pre e post emergenza Covid-19. Roma: Nomisma / Federcasa, maggio 2020.

Nonveiller, A. (2024) Il Building Information Modelling da metodo a processo. La realizzazione della nuova metro di Doha. Tesi di Dottorato, Ciclo XXXI, Dottorato in Architettura, Città e Design - Nuove Tecnologie per la Città, il Territorio e l'Ambiente. Venezia: IUAV.

Palmieri, V. (2001) 'Il neorealismo di Ridolfi e Frankl a Cerignola', in Di Biagi, P. (ed.) La gre ricostruzione. Il piano INA-Casa e l'Italia degli anni Cinquanta. Roma: Donzelli Editore, pp. 445-454.

Paris, S. Bianchi, R. (2015) 'La riqualificazione architettonica e ambientale dei quartieri moderni di edilizia residenziale pubblica: una opportunità per la città contempocittà. Un caso di studio a Roma', in Atti del Convegno Nazionale SITdA. Roma: Sapienza Università di Roma.

Paris, S. Bianchi, R. (2018) Ri-abitare il moderno. Il progetto per il rinnovo dell'housing. Roma: Dipartimento di Architettura e Progetto, Sapienza Università di Roma.

Pepe, M., Prezioso, G., Santamaria, R. (2024) 'Toward to Combination of GIS-HBIM Models for Multiscale Representation Management of Historic Center', Heritage, 7(12), pp. 6966-6980. <https://doi.org/10.3390/heritage7120272>

Pietropaolo, L. (2022) Architettura moderna in abbono. Riflessioni per il suo riconoscimento e la sua risignificazione. Il caso della Puglia e alcune prospettive internazionali. Bari: Politecnico di Bari.

Pontrolfi, R. (2020) 'Multiscale GIS-BIM methodological approaches digital systems for the knowledge of the modern architectural heritage in Italy. The rural Village La Martella in Matera', Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.

Spatial Inf. Sci., XLIV-M-1-2020, pp. 279-286. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-279-2020>

Poretti, S. (2003) 'Dal piano al patrimonio INA Casa', in Capomolla, R. Vittorini, R. (eds.) L'architettura INA Casa (1949-1963). Aspetti e problemi di conservazione e recupero. Roma: Gangemi, pp. 8-17.

Potesta, G. (2020) Architettura Monumentale ed HBIM. Il Bel San Giovanni come paradigma per la modellazione del patrimonio storico costruito. Tesi di Dottorato. Roma: Sapienza Università di Roma.

Puccini, E. Tomassi, F. (2019) 'La condizione abitativa delle case popolari a Roma', in Adorni, D. Tabor, D. (eds.) Inchieste sulla casa in Italia. La condizione abitativa nelle città italiane nel secondo dopoguerra. Roma: Viella.

Raco, F., Balzani, M., Medici, M., Maietti, F. (2022) 'Modellazione semantica HBIM per la rappresentazione digitale dell'intervento sul patrimonio esistente', in Battini, C. Bistagnino, E. (eds.) Dialoghi. Visioni e visualità. Atti del 43 Convegno Internazionale UID. Milano: FrancoAngeli, pp. 2789-2804. <https://doi.org/10.3280/oa-832-c173>

Remondino, F. (2011) 'Heritage recording 3D modeling with photogrammetry 3D scanning', Remote Sensing, 3(6), pp. 1104-1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104>

Ridolfi, M. (1952) 'Nuovi quartieri dell'INA-Casa. Il complesso edilizio di Cerignola', Prospettive, 3, pp. 9-10.

Rocha, G., Mateus, L., Fernez, J., Ferreira, V. (2020) 'A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings', Heritage, 3(1), pp. 47-67. <https://doi.org/10.3390/heritage3010004>

Rossi, N. Strano, M. (2026, in corso di stampa) 'Patrimoni Grigi. Edilizia residenziale pubblica del secondo Novecento tra conoscenza digitale e tutela', in Giambruno, M., Oteri, A. M., Pistidda, S. (eds.) Patrimoni Grigi. Riflessioni ed esperienze per le architetture, i paesaggi e i tessuti urbani ai margini della tutela. Milano: Politecnico di Milano / FrancoAngeli.

Rossi, N., Buldo, M., Musicco, A., Tavolare, R., Verdoscia, C. (2024) 'Applications of BIM for the Enhancement of Contemporary Architectural Heritage', in Ippolito, A. et al. (eds.) 3D Modeling & BIM. Nuove Evoluzioni, X Edizione. Roma: Università degli Studi di Roma La Sapienza, Facoltà di Architettura Valle Giulia, pp. 108-121.

Russo, M., Manferdini, A. M., Spallone, R. (2024) 'A Tailored Workflow for the Valorization Projects of Industrial Heritage Through a BIM-Based VR Experience', SCIRES-IT, 14(2), pp. 1-12.
<https://doi.org/10.2423/i22394303v14n2p1>

Ruiz Palomeque, G. Rubio del Val, J. (2006) Nuevas propuestas de rehabilitación urbana en Zaragoza. Estudio de Conjuntos Urbanos de Interés. Zaragoza: Ayuntamiento de Zaragoza.

Salzano, A., Asprone, D., Prota, A., Manfredi, G., Cosenza, E. (2023) 'Existing assets maintenance management: Optimizing maintenance procedures costs through BIM tools', Automation in Construction, 149, p. 104788.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104788>

Sambricio, C. (2020) 'Política de vivienda en el primer franquismo: 1936-1949', TEMPORANEA. Revista de Historia de la Arquitectura, 1, pp. 59-96.
<https://doi.org/10.12795/TEMPORANEA.2020.01.03>

Sancho Mir, M., Agustín Hernández, L. y Llopis Verdú, J. (2017). *Análisis y generación de cartografías historiográficas en el estudio de la evolución de la*

forma urbana: el caso de la ciudad de Teruel, EGA Expresión Gráfica Arquitectónica, 22(30), pp. 180–189. doi: 10.4995/ega.2017.7845.

SDA Bocconi School of Management - CERGAS (2021) Management dei servizi abitativi pubblici. Il valore pubblico delle Aziende Casa. Milano: Rapporto di ricerca in collaborazione con Federcasa.

Schonberger, J. L. Frahm, J. M. (2016) 'Structure-from-motion revisited', in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV: IEEE, pp. 4104-4113. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>

Talamona, M. (2001) 'Dieci anni di politica dell'UNRRA-Casas: dalle case ai senzatetto ai borghi rurali nel Mezzogiorno d'Italia (1945-1955)', in Costruire la città dell'uomo. Adriano Olivetti e l'urbanistica. Torino: Edizioni di Comunita, pp. 173-204.

Tan, Y., Liang, Y., Zhu, J. (2023) 'CityGML in the Integration of BIM the GIS: Challenges Opportunities', Buildings, 13(7), p. 1758. <https://doi.org/10.3390/buildings13071758>

Vacca, G., Dessi, A., Sacco, A. (2018a) 'The Use of HBIM Virtual Reality in the Dissemination of the Nuragic Civilization', Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2, pp. 1129-1135. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-1129-2018>

Vacca, G., Quaquero, E., Pili, D., Brolini, M. (2018b) 'GIS-HBIM integration for the management of historical buildings', Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-4, pp. 647-653. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-647-2018>

Vittorini, R. (2022) 'Presentazione', in Fondazione Scuola dei beni e delle attività culturali (ed.) *Conoscenza e tutela del patrimonio architettonico moderno e contemporaneo: esperienze a confronto. Atti del seminario*. Roma: Gangemi Editore.

Volk, R., Stengel, J., Schultmann, F. (2014) 'Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review future needs', *Automation in Construction*, 38, pp. 109-127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>

Yeste Navarro, I. (1999) 'Desarrollo industrial y crecimiento urbano: la vivienda barata en Zaragoza (1860-1936)', *Artigrama*, 14, pp. 135-155. https://doi.org/10.26754/ojs_artigrama/artigrama.1999148482

Yeste Navarro, I. (2008) 'Arquitectura y urbanismo en Zaragoza. Transformaciones en la distribución espacial de la arquitectura doméstica (1900-1949)', *Artigrama*, 23, pp. 701-725. https://doi.org/10.26754/ojs_artigrama/artigrama.2008237821

ISO 19650-1:2018 (2018) *Organization digitization of information about buildings civil engineering works, including building information modelling (BIM). Part 1: Concepts principles*. Geneva: ISO.

ISO 19650-2:2018 (2018) *Organization digitization of information about buildings civil engineering works, including building information modelling (BIM). Part 2: Delivery phase of the assets*. Geneva: ISO.

L. n. 43, 28 febbraio 1949. *Provvedimenti per incrementare l'occupazione operaia, agevole la costruzione di case per lavoratori*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.

Ley de 12 de junio de 1911 sobre construccion de Casas Baratas. *Gaceta de Madrid*.

Ley de 10 de diciembre de 1921 de Casas Baratas. Gaceta de Madrid.

Ley de 19 de abril de 1939 estableciendo un regimen de proteccion a la vivienda de renta reducida y creo un Instituto Nacional de la Vivienda. BOE.

Ley de 25 de noviembre de 1944 de Viviendas Bonificadas. BOE.

Ley de 7 de julio de 1946 sobre obligacion de alojamiento para empresas con mas de 50 trabajadores. BOE.

Ley de 15 de julio de 1954 sobre proteccion de Viviendas de Renta Limitada. BOE, n. 197.

Decreto-Ley de 26 de febrero de 1957 por el que se crea el Ministerio de la Vivienda. BOE, n. 57.

Decreto de 24 de enero de 1958 de extension del Plan de Urgencia Social de Madrid a todo el territorio nacional. BOE.

Decreto-Ley de 21 de julio de 1959 de Ordenacion Economica (Plan Nacional de Estabilizacion). BOE.

Regione Puglia (2014) Legge Regionale 20 maggio 2014, n. 22. Riordino delle funzioni amministrative in materia di edilizia residenziale pubblica e sociale.

Regione Puglia (2024) Legge Regionale 31 dicembre 2024, n. 42 (art. 121, Modifiche alla L.R. 22/2014).

UNI 11337-5:2017 (2017) Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni - Parte 5: Flussi informativi nei processi digitalizzati. Milano: UNI.

UNI EN 17412-1:2020 (2020) Building Information Modelling. Level of Information Need. Concepts principles. Milano: UNI.