COLLANA
3D MODELING & BIM



TRASFORMAZIONE DEI BENI CULTURALI

A CURA DI TOMMASO EMPLER,
ADRIANA CALDARONE, ALEXANDRA FUSINETTI

PVBLICA

ISBN 9791282811002

Finanziato dall'Unione europea NextGenerationEU
Ministero dell'Università e della Ricerca
Italiadomani PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA
SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA
Moving Italianness

PIANO NAZIONALE RIPRESA E RESILIENZA (PNRR), INIZIATIVE EDUCATIVE TRANSNAZIONALI (TNE), PREVISTE DALLA SOTTOMISURA T4 "INIZIATIVE TRANSNAZIONALI IN MATERIA DI ISTRUZIONE", INVESTIMENTO 3.4 "DIDATTICA UNIVERSITARIA E COMPETENZE AVANZATE" DEL PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA, MISSIONE 4 "ISTRUZIONE E RICERCA" – COMPONENTE 1 "POTENZIAMENTO DELL'OFFERTA DEI SERVIZI ALL'ISTRUZIONE: DAGLI ASILI NIDO ALL'UNIVERSITÀ"

Titolo del progetto

TNE AdvancedSkills

Comunicazione e Valorizzazione del Patrimonio Culturale

Finanziamento

Finanziato dall'Unione europea- Next Generation EU,
Missione 4 Componente 1

TNE23-00080 CUP F31I24000320006

Soggetto attuatore

Dipartimento di Storia Disegno e Restauro dell'Architettura
SAPIENZA UNIVERSITA' DI ROMA
Piazza Borghese, 9
CAP *00186*

Tommaso Empler, Adriana Caldarone, Alexandra Fusinetti (a cura di)
3D Modeling & BIM 2026 - Trasformazione dei Beni Culturali
© PUBLICA, Alghero, 2026
ISBN 9791282811002
Pubblicazione novembre 2026

Questa pubblicazione è distribuita in modalità Open Access.

La valutazione dei contributi pubblicati è avvenuta con la modalità del double blind review da parte di referee facenti parte di un apposito comitato scientifico.

The evaluation of the published contributions was carried out through a double-blind review process by referees belonging to a dedicated scientific committee.

Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura
Sapienza Università di Roma

DIPARTIMENTO DI STORIA
DISEGNO E RESTAURO
DELL'ARCHITETTURA

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Progetto grafico: Francesco Cocchi, Camilla Gizzi, Pasquale Micelli
Crediti immagine di copertina: Matteo Bigongiari, Andrea Lumini, Andrea Taglianini

PVBLICA
Dipartimenti di Architettura, Design e Urbanistica
Università degli Studi di Sassari
www.publicapress.it



A cura di:
Tommaso Empler, Adriana Caldarone, Alexandra Fusinetti

3D MODELING & BIM

TRASFORMAZIONE DEI BENI CULTURALI

Il volume raccoglie i contributi, dei relatori e degli studiosi, pervenuti in occasione del Workshop 3DModeling&BIM. Trasformazione dei Beni Culturali, che si è svolto a Roma in data 16-17 aprile 2026.

Il workshop e i presenti atti rientrano tra le attività previste dal progetto "Comunicazione e valorizzazione del Patrimonio Culturale" del PNRR , Iniziative Educative Transnazionali (TNE), Missione 4, Investimento 3.4, Sottomisura T4.

This book collects contributions, of speakers and scholars, received during the Workshop 3Dmodeling & BIM. Trasformazione dei Beni Culturali, which took place in Rome on April 16th-17th 2026.

The workshop and the present proceedings are part of the activities envisaged by the project "Communication and Enhancement of Cultural Heritage" within the framework of the National Recovery and Resilience Plan (PNRR), Transnational Educational Initiatives (TNE), Mission 4, Investment 3.4, Submeasure T4.

Organizing Committee

Director
- Tommaso Empler

Scientific Coordinator 3D Modeling
- Alexandra Fusinetti

Scientific Coordinator HBIM, Data and Semantics
- Adriana Caldarone

Leonardo Baglioni
Carlo Bianchini
Michele Calvano
Andrea Casale
Emanuela Chiavoni
Elena D'Angelo
Carlo Inglese
Elena Ippoliti
Alfonso Ippolito
Marta Salvatore
Graziano Mario Valenti

Scientific Committee

- Massimo Babudri, Ordine degli Ingegneri di Roma (Italy)
- Salvatore Barba, Università degli Studi di Salerno (Italy)
- Carlo Bianchini, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Fabio Bianconi, Università di Perugia (Italy)
- Cecilia Maria Bolognesi, Politecnico di Milano (Italy)
- Stefano Brusaporci, Università dell'Aquila (Italy)
- Adriana Caldarone, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Michele Calvano, Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale CNR (Italy)
- Maria Grazia Cianci, Università Roma Tre (Italy)
- Enrico Cicalò, Università degli Studi di Sassari (Italy)
- Tommaso Empler, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Marco Filippucci, Università di Perugia (Italy)
- Donatella Fiorani, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Alexandra Fusinetti, Università degli Studi di Sassari (Italy)
- Elena Gigliarelli, Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale CNR (Italy)
- Elena Ippoliti, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Massimiliano Lo Turco, Politecnico di Torino (Italy)
- Giovanna Massari, Università di Trento (Italy)
- Javier Nuñez, FADU - UBA (Argentina)
- Anna Osello, Politecnico di Torino (Italy)
- Ivan Paduano, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Leonardo Paris, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Sandro Parrinello, Università di Pavia (Italy)
- Bernardo Pérgamo, Universidad Nacional de Córdoba (Argentina)
- Fabio Quici, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Alberto Raimondi, Università Roma Tre (Italy)
- Manuel Ròdenas, UPCT Universidad Politécnica de Cartagena (Spain)
- Maria Laura Rossi, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Michela Rossi, Politecnico di Milano (Italy)
- Francesco Ruperto, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Mario Sacco, BIM Expert (Italy)
- Cettina Santagati, Università di Catania (Italy)
- Alberto Sdegno, Università degli studi di Udine (Italy)
- Graziano Mario Valenti, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Michele Valentino, Università degli Studi di Sassari (Italy)
- Valeria Zacchei, PhD BIM Expert (Italy)

Editorial Manager

- Pasquale Micelli, Sapienza Università di Roma (Italy)

Indice

INTRODUZIONE 14

Introduction
Tommaso Empler

SCAN-TO-HBIM: UNA LETTURA CRITICA DEL PROSPETTO EST DI PALAZZO BARBERINI 18

Scan-to-BIM: A Critical Reading of the East Elevation of Palazzo Barberini
Valeria Fiordimalva e Martina Casciola

RAPPRESENTARE DIGITALMENTE L'UTOPIA: UN ATLANTE HBIM PER L'ARCHITETTURA DISEGNATA NON COSTRUITA 32

Digitally representing utopia: an HBIM Atlas for the unbuilt drawn architecture
Fabrizio Farenga e Elisabetta Caterina Giovannini

RICOSTRUZIONE BIM DELLA MAISON DES ARTISANS: CASO DI STUDIO NEL CAMPUS RIZZI 44

BIM reconstruction of the Maison des Artisans: a case study at the Rizzi Campus
Alberto Sdegno e Ferdinand Rexhaj

BEYOND THE POINT CLOUD. A MULTI-LEVEL ASSESSMENT OF NERF, GAUSSIAN SPLATTING, LIDAR AND SFM 58

Beyond the Point Cloud. A Multi-Level Assessment of NeRF, Gaussian Splatting, LiDAR and SfM
Riccardo Tavolare, Giovanni Mongiello e Cesare Verdoscia

I PROCESSI POINTCLOUD TO BIM APPLICATI AL CASO STUDIO DEL KURSAAL DI MONTECATINI TERME. UNA RIFLESSIONE CRITICA 70

Pointcloud-to-BIM processes applied to the case study of the Kursaal in Montecatini Terme: A critical reflection
Carmenrita Scalone e Frank Ernesto Villarreal Quevedo

HBIM OPEN-SOURCE PER IL PATRIMONIO ARCHITETTONICO: IL CASO STUDIO DELL'ARCHIVIO DELLA CA' GRANDA 82

Open-Source HBIM for Architectural Heritage: The Ca' Granda Archive Case Study
Deida Bassorizzi e Vasili Manfredi

ALGORITMI VPL PER L'HBIM: AUTOMAZIONE E MODELLAZIONE PARAMETRICA DELLA KASBAH DI MEHDYA 96

VPL-Based Algorithms for HBIM: Automation and Parametric Modeling of the Kasbah of Mehdya
Chadi El Khoury, Elena Gigliarelli e Luciano Cessari

WORKFLOW AI-BASED PER LA DIGITALIZZAZIONE HBIM DEGLI APPARATI DECORATIVI 110

AI-based workflow for the HBIM digitization of decorative elements
Filippo Cornacchini, Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Andrea Migliosi e Claudia Cerbai

IA GENERATIVA PER L'ARCHITETTURA 3D: DAI NERF AL BIM 124

Generative AI for 3D Architecture: from NeRFs to BIM
Ivan Paduano

SFIDE DELLA GESTIONE INFORMATIVA: TRA DATABASE MUSEALI E MODELLI HBIM 132

Limits and challenges of information management: between museum databases and HBIM models
Andrea Tomalini e Melanie Nicole Giler Pinargote

AMBIENTI DIGITALI PER LA STIMA DEI COSTI NELL'AMBITO DI PROCESSI OPENBIM: VERSO UNA PROSPETTIVA ONTOLOGICA E INTEROPERABILE 146

Understanding of digital environments for cost estimation within open BIM processes: towards an ontological and interoperable perspective
Marco Ricciarini, Francesca Galasso, Elisabetta Caterina Giovannini e Andrea Tomalini

CAPITOLATO INFORMATIVO, HBIM, PUBBLICA AMMINISTRAZIONE. SCENEGGIATURA, FILM, REGIA 164

Exchange Information Requirements, HBIM, Public Administration. Script, Film, Direction
Michele Zucco, Giulia Renata Morra e Matteo Del Giudice

LA MODELLAZIONE INFORMATIVA DI PALAZZO CARCANO A TRANI. PROCESSO E METODOLOGIA BIM APPLICATA ALLA CONOSCENZA DELLA FABBRICA 178

Information Modelling of Palazzo Carcano in Trani. BIM Process and Methodology Applied to the Understanding of the Building Fabric
Annapaola Villano e Francesca Cremasco

PROCEDURE HBIM SU UN BORGO COLPITO DAL SISMA DEL 2016 188

HBIM process in a Village Affected by the 2016 Earthquake
Arianna Picci

SUPPORTO DECISIONALE HBIM PER LA CONSERVAZIONE DEL GAVIT DI NEGHUTS 198

HBIM-Based Conservation Decision Support for the Neghuts Gavit
Davit Zalinyan

METAMORFOSI DI UN COMPLESSO IN STILE LIBERTY VIENNESE 210

Metamorphosis of a Viennese Art Nouveau Complex
Dmitri Jilin

MODELLI INFORMATIVI PAESAGGISTICI. INTEGRAZIONE TRA HBIM E HGIS 222

Landscape Information Models. Integration between HBIM and HGIS
Andrea Sias

MINOR HERITAGE: INTEGRAZIONE TRA HBIM DIFFUSO E GEOBIM PER LA GESTIONE PROGRAMMATA 232

Minor Heritage: Integration of Distributed HBIM and GeoBIM for Scheduled Management
Davide Lorenzo Dino Aschieri

COMFORT TERMICO DI VILLA SAVOYE ATTRAVERSO UN WORKFLOW BIM-TO-BEM 244

Thermal Comfort of Villa Savoye through BIM-to-BEM Workflow
Alberto Sdegno, Michele Libralato e Selin Cengiz

STRUTTURE METALLICHE OFFSHORE NEL SETTORE ENERGY: STRATEGIE PER LA GENERAZIONE DI MODELLI INFORMATIVI 3D REALITY-BASED 258

Offshore metallic structures in the energy sector: strategies for the generation of reality-based 3D information models
Luca Chiavacci, Hangjung Fu e Anna Dell'Amico

LA FORMA COME RISORSA. COMPUTATIONAL REUSE: PROCESSI DIGITALI PER IL RIUTILIZZO 270

Form as a Resource. Computational Reuse: Digital Processes for Reuse
Giorgio Buratti, Attilio Nebuloni e Andrea Rossi

OLTRE IL MODELLO 3D. UN ECOSISTEMA DIGITALE IBRIDO PER LA FRUIZIONE VIRTUALE DEL COMPLESSO DI SAN LORENZO A FIRENZE 282

Beyond the 3D model. A hybrid digital ecosystem for the virtual fruition of the San Lorenzo complex in Florence
Matteo Bigongiari, Andrea Lumini e Andrea Taglianini

SEGNO, GESTO, CONOSCENZA: INTERAZIONE NATURALE PER LA DIVULGAZIONE DI COLLEZIONI STORICHE DI MODELLI LIGNEI PER L'INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI 296

Sign, gesture, knowledge: natural interaction for the dissemination of historical collections of wooden models for structural engineering
Maurizio Marco Bocconcino, Mariapaola Vozzola e Larisa Semis

AUGMENTED SOUNDSCAPE: NUOVE TECNOLOGIE PER IL CULTURAL HERITAGE 308

Augmented Soundscape: New Technologies for Cultural Heritage
Ida Zingariello, Romano Fistola, Rosa Anna La Rocca e Filippo Fabbri

Autori

Tommaso Empler[1]

[1] Sapienza Università di Roma

Email

tommaso.empler@uniroma1.it

Introduzione

Introduction

3D Modeling & BIM

La trasformazione dei beni culturali investe le modalità attraverso cui il patrimonio viene conosciuto, interpretato, conservato e reso accessibile. I contributi raccolti nel Workshop 2026 3D Modeling & BIM affrontano questo processo attraverso esperienze di ricerca e applicazioni professionali che collegano il rilievo digitale alla modellazione informativa, all'analisi delle prestazioni e alla costruzione di nuove forme di fruizione. Il modello tridimensionale assume, in questo quadro, il ruolo di ambiente nel quale organizzare evidenze, esplicitare ipotesi e sostenere decisioni, mantenendo riconoscibili le fonti e le condizioni che ne determinano l'affidabilità.

Il tema della trasformazione riguarda anzitutto la costruzione della conoscenza. La traduzione del patrimonio in un sistema digitale richiede di selezionare informazioni, interpretare geometrie irregolari e rappresentare stratificazioni che i consueti strumenti parametrici recepiscono con difficoltà. Il rapporto tra acquisizione metrica, astrazione geometrica e attribuzione semantica attraversa l'intera raccolta. La qualità del modello dipende dalla coerenza tra queste operazioni e dalle finalità per cui viene prodotto: ricerca storica, progetto di restauro, gestione, simulazione o comunicazione richiedono contenuti e livelli di approfondimento differenti.

Una dimensione storico-critica emerge nella lettura del prospetto orientale di Palazzo Barberini proposta da Fiordimalva e Casciola, dove l'HBIM accoglie le attribuzioni autoriali e ne rende rappresentabile l'incertezza. Farenga e Giovannini estendono la modellazione informativa all'architettura disegnata e non costruita, assumendo la Cesena utopica di Mauro Guidi come campo di confronto tra fonti e varianti compositive. Sdegno e Rexhaj sviluppano, attraverso la Maison des Artisans nel Campus Rizzi, un ambiente sperimentale che mette in relazione documentazione, ipotesi materiali e valutazioni energetiche preliminari. Queste ricerche riconoscono al modello una funzione interpretativa e richiedono di distinguere quanto è documentato da quanto deriva da una scelta ricostruttiva o progettuale.

Un secondo ambito riguarda i metodi di acquisizione e la traduzione del dato in componenti informativi. La riflessione di Scalone e Villarreal Quevedo sul Kursaal di Montecatini Terme affronta il delicato equilibrio tra accuratezza del rilievo e semplificazione parametrica. Il workflow open-source di Bassorizzi e Manfredi per l'Archivio della Ca' Granda pone al centro la classificazione IFC degli elementi storici, mentre El Khoury, Gigliarelli e Cessari sperimentano algoritmi di programmazione visuale per la Kasbah di Mehdya. L'automazione viene esaminata da Ibba attraverso sistemi esperti e classificazioni geometriche basate su regole, e da Bianconi e collaboratori attraverso la generazione di apparati decorativi da una singola immagine e la loro integrazione nell'HBIM.

Le tecniche emergenti rendono necessario un esame dei criteri con cui si valuta la rappresentazione digitale. Tavolare, Mongiello e Verdoscia confrontano LiDAR, fotogrammetria, NeRF e Gaussian Splatting considerando affidabilità geometrica, coerenza radiometrica e leggibilità semantica. Paduano discute le possibilità dell'intelligenza artificiale generativa e gli ostacoli topologici e informativi che ne condizionano l'ingresso nei processi BIM. Il confronto tra questi contributi evidenzia la necessità di verificare il passaggio dalla plausibilità visiva alla consis-

The transformation of cultural heritage affects how heritage is understood, interpreted, preserved, and made accessible. The contributions to the 2026 3D Modeling & BIM Workshop address this process through research and professional applications linking digital surveying to information modelling, performance analysis, and new forms of engagement. Within this framework, the 3D model becomes an environment to organise evidence, state hypotheses, and support decision-making, keeping recognizable the sources and conditions determining its reliability. Transformation primarily concerns knowledge construction. Translating heritage into a digital system requires selecting information, interpreting irregular geometries, and representing stratifications that standard parametric tools struggle to capture. The relationship between metric survey, geometric abstraction, and semantic attribution spans the entire volume. Model quality depends on the coherence among these operations and its intended purpose: historical research, restoration projects, facility management, simulation, or dissemination require different content and depth.

A historical-critical dimension emerges in Fiordimalva and Casciola's reading of Palazzo Barberini's eastern facade, where HBIM incorporates attributions of authorship while representing their uncertainty. Farenga and Giovannini extend information modelling to unbuilt, drawn architecture, using Mauro Guidi's utopian Cesena to compare sources and compositional variants. Through the Maison des Artisans on the Rizzi Campus, Sdegno and Rexhaj develop an experimental environment linking documentation, material hypotheses, and preliminary energy assessments. These studies grant the model an interpretive role, distinguishing documented data from reconstructive or design choices.

A second area addresses acquisition methods and data translation into informative components. Scalone and Villarreal Quevedo's study on the Montecatini Terme Kursaal tackles the balance between survey accuracy and parametric simplification. Bassorizzi and Manfredi's open-source workflow for the Ca' Granda Archive focuses on IFC historical element classification, while El Khoury, Gigliarelli, and Cessari test visual programming algorithms on the Kasbah of Mehdya. Automation is examined

tenza del modello utilizzabile, senza attribuire automaticamente alle ricostruzioni generate la stessa qualità documentaria di un rilievo metrico controllato.

La gestione informativa costituisce un ulteriore nodo della raccolta. Tomalini e Giler Pinargote analizzano il raccordo tra il database delle collezioni del Museo Egizio e l'HBIM, mostrando le difficoltà prodotte dall'eterogeneità dei dati. Ricciarini, Galasso, Giovannini e Tomalini affrontano l'interoperabilità dei prezzari regionali e della stima dei costi attraverso una prospettiva ontologica e semantica. Zucco, Morra e Del Giudice riportano la questione al ruolo della committenza pubblica e alla verifica della corrispondenza tra requisiti, consegne ed evidenze. La disponibilità di un modello richiede quindi strutture informative condivise e procedure capaci di controllarne completezza, coerenza e possibilità di riuso.

La conservazione introduce il rapporto tra conoscenza e intervento. Villano e Cremasco documentano, nel caso di Palazzo Carcano a Trani, l'integrazione di rilievi, indagini, dati materici e analisi del degrado a supporto delle attività progettuali e gestionali. Picci applica l'HBIM alla chiesa di San Giorgio Martire di Terracino nel contesto post-sismico del 2016, associando la documentazione del bene alla condivisione delle informazioni. Zalinyan propone per il gavit di Neghuts un workflow pilota che collega osservazione, diagnosi, vincoli conservativi e opzioni di intervento, rendendo tracciabile il ragionamento decisionale e mantenendo centrale il giudizio esperto. Jilin affronta la trasformazione dell'Otto Wagner Areal di Vienna, nel quale la modellazione informativa sostiene il restauro e il passaggio a nuove funzioni compatibili con la tutela.

La relazione tra bene e contesto amplia questa prospettiva alla scala territoriale. Sias indaga l'integrazione tra HBIM e HGIS per raccordare la descrizione del manufatto alla lettura del paesaggio. Aschieri propone l'accoppiamento tra HBIM diffuso e GeoBIM del sottosuolo per organizzare informazioni utili alla conservazione preventiva del patrimonio minore nelle aree interne. L'attenzione alle relazioni con suolo, acqua e condizioni territoriali porta a considerare la vulnerabilità come una proprietà che richiede letture su più scale, oltre alla documentazione del singolo oggetto.

La trasformazione riguarda anche le prestazioni e i cicli di impiego delle risorse. Sdegno, Libralato e Cengiz riesaminano il comfort termico di Villa Savoye attraverso un workflow BIM-to-BEM, introducendo la simulazione come strumento di lettura dell'architettura moderna. Chiavacci, Fu e Dell'Amico affrontano la documentazione delle strutture offshore in relazione alla gestione operativa, al decommissioning e alla conservazione della memoria tecnica. Buratti, Nebuloni e Rossi propongono il Computational Reuse per il reimpiego degli scarti industriali, assumendo la geometria esistente come risorsa progettuale. Questi lavori estendono il confronto ai rapporti tra modellazione, valutazione delle prestazioni e trasformazione materiale, con finalità diverse ma accomunate dall'attenzione al ciclo di vita.

La fruizione completa il percorso attraverso esperienze che mettono in relazione il patrimonio con i suoi pubblici. Bigongiari, Lumini e Taglianini integrano modelli tridimensionali, fotografie panoramiche e Gaussian Splatting in un ecosistema digitale per il complesso di San Lorenzo a Firenze. Bocconcino, Vozzola e Semis sperimentano interazioni naturali e Mixed Reality per la divulgazione delle collezioni storiche di modelli lignei del Politecnico di Torino. Zingariello, Fistola, La Rocca e Fabbri sviluppano l'Augmented Soundscape come modalità di restituzione delle memorie sonore e di attribuzione di significato ai luoghi. Le esperienze proposte mostrano come il progetto della rappresentazione comprenda anche le condizioni di accesso, i linguaggi narrativi e le modalità di interazione.

I contribute ricevuti delineano un campo nel quale la trasformazione digitale viene valutata rispetto alla qualità delle conoscenze prodotte e alla loro utilità per la conservazione e la trasmissione del patrimonio.

by Ibba via expert systems and rule-based geometric classification, and by Bianconi et al. through single-image decorative feature generation and HBIM integration. Emerging techniques demand reviewing digital representation evaluation criteria. Tavolare, Mongiello, and Verdoscia compare LiDAR, photogrammetry, NeRF, and Gaussian Splatting regarding geometric reliability, radiometric consistency, and semantic legibility. Paduano discusses generative AI capabilities alongside the topological and informational hurdles limiting its BIM adoption. Comparing these papers highlights the need to verify the transition from visual plausibility to usable model consistency, avoiding automatically granting generated models the documentary status of a verified metric survey. Information management is another key theme. Tomalini and Giler Pinargote analyze linking the Museo Egizio collections database to HBIM, illustrating challenges caused by data heterogeneity. Ricciarini, Galasso, Giovannini, and Tomalini address regional price list interoperability and cost estimation from an ontological and semantic stance. Zucco, Morra, and Del Giudice frame the issue around public clients and verifying compliance between requirements, submittals, and evidence. Model availability thus requires shared information structures and workflows to check completeness, consistency, and reusability. Conservation introduces the relationship between knowledge and intervention. For Palazzo Carcano in Trani, Villano and Cremasco document integrating surveys, investigations, material data, and decay analysis to support design and management. Picci applies HBIM to the church of San Giorgio Martire in Terracino post-2016 earthquake, coupling heritage documentation with data sharing. For the Neghuts gavit, Zalinyan proposes a pilot workflow linking observation, diagnosis, conservation constraints, and intervention options, tracing decision-making while preserving expert judgment. Jilin addresses Vienna's Otto Wagner Areal transformation, where information modelling guides restoration and adaptive reuse compatible with heritage preservation. The asset-context relationship broadens this view to the territorial scale. Sias investigates HBIM-HGIS integration to bridge artifact description with landscape analysis. Aschieri proposes coupling territorial HBIM with subsurface GeoBIM to structure data for preventive conservation of minor heritage in inland areas. Focusing on relationships with soil, water, and territorial conditions frames vulnerability as a multi-scale property beyond single-asset documentation. Transformation also involves performance and resource lifecycles. Sdegno, Libralato, and Cengiz re-evaluate Villa Savoye's thermal comfort via a BIM-to-BEM workflow, using simulation to interpret modern architecture. Chiavacci, Fu, and Dell'Amico address offshore structure documentation concerning operations, decommissioning, and technical memory preservation. Buratti, Nebuloni, and Rossi propose Computational Reuse for industrial waste repurposing, leveraging existing geometry as a design asset. These studies expand the debate to links among modelling, performance analysis, and material change, united by lifecycle awareness. Dissemination concludes the volume through projects connecting heritage with its audiences. Bigongiari, Lumini, and Taglianini integrate 3D models, panoramic views, and Gaussian Splatting into a digital ecosystem for Florence's San Lorenzo complex. Bocconcino, Vozzola, and Semis test natural interaction and Mixed Reality to present Politecnico di Torino's historical wooden model collections. Zingariello, Fistola, La Rocca, and Fabbri develop Augmented Soundscapes to convey sound memories and assign meaning to places. These cases show that representation design also encompasses access conditions, narrative registers, and interaction modes. The collected contributions outline a field where digital transformation is assessed by the quality of knowledge generated and its value for heritage conservation and transmission.

Autori

Valeria Fiordimalva[1]
Martina Casciola[1]

[1] Sapienza Università di Roma

Email

valeria.fiordimalva@uniroma1.it
martina.casciola@uniroma1.it

Keywords

SCAN-TO-HBIM
DIGITALIZATION
HISTORICAL-CRITICAL ANALYSIS
CULTURAL HERITAGE
BARBERINI PALACE

Scan-to-HBIM: una lettura critica del prospetto est di Palazzo Barberini

Scan-to-BIM: A Critical Reading of the East Elevation of Palazzo Barberini

Abstract

Il contributo illustra il processo *Scan-to-BIM* del prospetto est verso il giardino di Palazzo Barberini, concepito come database storico-critico. Per tradurre la complessità del cantiere barocco e i dubbi di attribuzione, il dato metrico è arricchito con parametri personalizzati e una LOR Autoriale (*Authorship Reliability Level*). I filtri visivi mappano l'incertezza storiografica, dimostrando come le informazioni associate all'HBIM possano configurare una modalità operativa per l'analisi storica.

This contribution illustrates the Scan-to-BIM process of the east garden facade of *Palazzo Barberini*, conceived as a historical-critical database. To translate the complexity of the Baroque construction site and the attributional doubts, the metric data is enriched with customized parameters and an Authorship Reliability Level. Visual filters map the historiographical uncertainty, demonstrating how the information associated with HBIM can establish an operational method for historical analysis.

Introduzione e obiettivi

La digitalizzazione del patrimonio architettonico tramite metodologie *Heritage Building Information Modeling* (HBIM) definisce oggi un ambito di convergenza tra rilievo metrico-morfologico, interpretazione archivistica e modellazione informativa. In tale contesto, l'ambiente *BIM* supera la funzione di mera restituzione geometrica 3D per configurarsi come un database relazionale, strutturato per organizzare i caratteri costruttivi, la stratificazione cronologica e la lettura critica del manufatto. Assumendo Palazzo Barberini come caso studio paradigmatico per la complessità del cantiere secentesco, il presente contributo illustra la transizione dal rilievo alla modellazione informativa del prospetto est[1] con l'obiettivo di strutturare di un flusso di lavoro *Scan-to-BIM* in cui il modello parametrico diventi lo strumento di sintesi di una lettura critica del fronte. Tale modello viene infatti configurato per mappare e rendere interrogabili le differenti fasi costruttive e le singole paternità autoriali, traducendo il complesso dibattito storiografico sull'evoluzione della fabbrica in specifici attributi parametrici e indici di affidabilità informativa.

Caso studio

Palazzo Barberini si trova sul versante settentrionale del colle Quirinale a Roma. La conformazione planivolumetrica del complesso deriva dallo sviluppo e dall'ampliamento di una preesistenza strutturale sul lotto. Sulla proprietà, acquistata da Maffeo Barberini nel 1625, sorgeva infatti il palazzo della famiglia Sforza, che si scelse di integrare nel nuovo assetto per costituire l'ossatura dell'ala nord. La successiva duplicazione speculare di questo volume sul lato meridionale determinò la configurazione di un impianto ad "H", caratterizzato da due ali parallele fortemente sporgenti [Waddy, 1976; 1990]. (Fig. 1).

Il nucleo centrale arretrato, interposto come blocco di collegamento tra i due corpi longitudinali, qualifica l'innovazione tipologica del palazzo poiché accoglie ed esprime due facciate principali contrapposte: mentre il fronte ovest d'ingresso su via delle Quattro Fontane è definito dal padiglione con la loggia a sette campate, il caso studio oggetto della presente ricerca si identifica specificamente con il prospetto est aperto direttamente verso l'area del giardino.

La gestione della fabbrica vide l'avvicendamento dei principali esponenti del barocco romano: come precisa Patricia Waddy, «Carlo Maderno fu incaricato del progetto effettivo e, nonostante le sue precarie condizioni di salute, supervisionò il suo sviluppo dettagliato fino all'inizio della costruzione» [Waddy, 1976], avvalendosi del contributo dei suoi due assistenti, Gian Lorenzo Bernini e Francesco Borromini, quest'ultimo autore materiale di gran parte dei disegni di cantiere; a seguito della morte di Maderno, avvenuta il 31 gennaio 1629, si registrò una transizione nella direzione dei lavori, fase in cui «Bernini fu la forza dominante» [Waddy, 1976], coadiuvato ancora da Borromini in qualità di assistente e con la partecipazione sussidiaria di Pietro da Cortona. Come evidenziato dai fondamentali studi di Anthony Blunt, questa transizione impresse un profondo cambio di registro formale [Blunt, 1958], riscontrabile nell'impaginato del prospetto est.

Introduction and objectives

The digitization of architectural heritage through Heritage Building Information Modeling (HBIM) methodologies currently defines an area of convergence among metric-morphological survey, archival interpretation, and information modeling. In the context of historical buildings, the BIM environment transcends the function of mere three-dimensional geometric restitution, acting instead as a relational database structured to organize construction features, chronological stratification, and the critical reading of the artifact. Within this methodological framework, Palazzo Barberini serves as a paradigmatic case study due to the complexity of its seventeenth-century construction site. This paper illustrates the transition from the survey to the information modeling of the east garden facade[1]. The main objective of the research is to structure a Scan-to-BIM workflow in which the parametric model becomes the synthesis tool for a critical reading of the facade. The model is configured to map and make the different construction phases and individual authorships queryable, translating the complex historiographical debate on the building's evolution into specific parametric attributes and Levels of Reliability (LOR).

Case study

Palazzo Barberini is located on the northern slope of the Quirinal Hill in Rome. The planimetric and volumetric configuration of the complex derives from the development and expansion of a pre-existing structure on the lot. The palace of the Sforza family stood on the property, purchased by Maffeo Barberini in 1625; it was decided to integrate this building into the new layout to form the structural framework of the north wing. The subsequent symmetrical duplication of this volume on the southern side determined the configuration of an "H"-shaped plan, characterized by two strongly projecting parallel wings [Waddy, 1976; 1990] (Fig. 1).

The recessed central core, interposed as a connecting block between the two longitudinal bodies, highlights the typological innovation of the palace, as it accommodates and expresses two opposing main facades. While the principal Western Front on Via delle Quattro Fontane is defined by

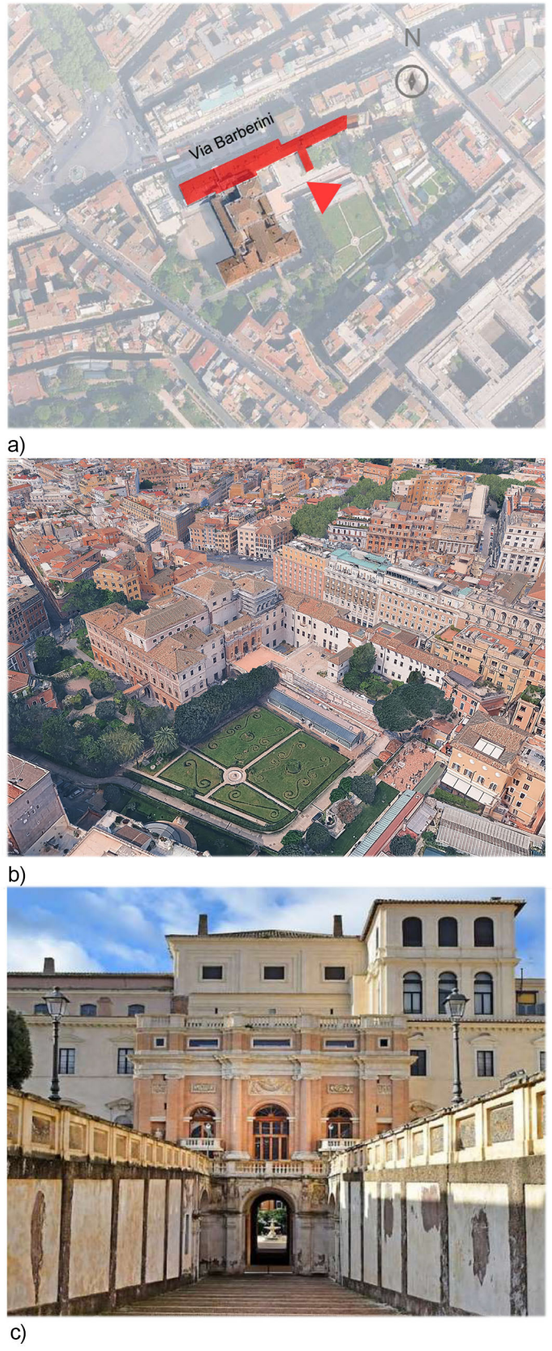


Fig. 1: Inquadramento del caso studio a) Planimetria di palazzo Barberini b) e c) vista tridimensionale e ortogonale del caso studio. (elaborazione degli autori).

Fig. 1: Case study framework a) Planimetry of Palazzo Barberini b) and c) three-dimensional and orthogonal views of the case study

the pavilion with a seven-bay loggia, the case study of the present research specifically focuses on the east garden facade. The management of the construction site saw the succession of the leading figures of the Roman Baroque. As Patricia Waddy specifies, "Carlo Maderno was in charge of the actual design and, in spite of his failing health, supervised its detailed development up until the beginning of construction" [Waddy, 1976], making use of the contribution of his two assistants, Gianlorenzo Bernini and Francesco Borromini, the latter being the principal draftsman of most of the working drawings. Following Maderno's death on January 31, 1629, a transition in the direction of the works occurred, a phase in which "Bernini was the dominant force" [Waddy, 1976], still assisted by Borromini and with the subsidiary participation of Pietro da Cortona. As highlighted by the fundamental studies of Anthony Blunt, this transition imprinted a profound change in the formal register [Blunt, 1958], which can be observed in the architectural composition of the east garden facade.

Archival and metric data acquisition

The research followed a rigorous methodology (Fig. 2). The cognitive phase of the artifact constituted the first level of the process and consisted of two parts: the acquisition of bibliographic and iconographic data, and the acquisition of metric data. The iconographic sources (Fig. 3) make it possible to follow the transformation of the site and compare the different compositional hypotheses of the east garden facade, from the early design phases to the consolidated layout of the eighteenth century. The morphometric survey[2] was conducted using a Z+F Imager 5010 laser scanner, through the acquisition of eighteen [vf1.1] scan stations. The instrumental data were processed to generate the three-dimensional point cloud, which, after filtering and cleaning, was subjected to decimation (0.05 m interval) to optimize computational management.

Segmentation

Data processing in Autodesk Recap Pro involved two levels of decomposition, aimed

Acquisizione del dato archivistico e metrico

La ricerca ha seguito una rigorosa metodologia (Fig. 2). La fase conoscitiva del manufatto ha costituito il primo livello del processo e si è composta di due parti: acquisizione del dato bibliografico e iconografico; acquisizione del dato metrico.

Le fonti iconografiche (Fig. 3) consentono di seguire la trasformazione del sito e confrontare le differenti ipotesi compositive del prospetto orientale verso il giardino, dalle prime fasi progettuali fino all'assetto consolidato del XVIII secolo.

Il rilievo morfometrico[2] è stato condotto con laser scanner Z+F Imager 5010, attraverso l'acquisizione di diciotto stazioni di scansione. I dati strumentali sono stati elaborati per la generazione della nuvola di punti tridimensionale che, dopo filtraggio e pulizia, è stata sottoposta a decimazione (intervallo di 0,01 m) per ottimizzare la gestione computazionale.

Segmentazione

Il processamento dei dati in Autodesk ReCap Pro ha previsto due livelli di scomposizione, finalizzati a una preventiva «segmentazione e semantizzazione delle masse e di dati acquisiti» [De Luca, 2011]. Per ottimizzare la gestione computazionale, la nuvola globale è stata frammentata in più file:

- Macrosegmentazione spaziale: la nuvola è stata divisa in sottoinsiemi indipendenti (padiglione centrale e ali). L'uso di nuvole alleggerite ha permesso l'integrazione in BIM tramite modelli collegati, caricabili all'occorrenza per non gravare sul file centrale [Chiavacci e Pettineo, 2025].
- Microsegmentazione semantica: sui file in Autodesk ReCap Pro si è operata un'ulteriore suddivisione per associare la morfologia alle classi semantiche native. Questa decodifica estende il significato dell'elemento oltre il dato metrico, supportando la modellazione parametrica HBIM [Tavolare e Cera, 2025] (Fig. 4).

Analisi compositiva e delle permanenze

Dal database spazialmente e semanticamente strutturato sono state estratte e restituite in proiezione ortogonale piante, prospetti e sezioni necessari per l'analisi compositiva. Tale indagine evidenzia una rigida scansione per livelli, riconducibile a tre ordini sovrapposti, e un reticolo di relazioni ortogonali che ne definisce il ritmo, le gerarchie visive e gli allineamenti, rendendo chiaro il rapporto tra elementi portanti, portati e apparato decorativo. L'analisi compositiva è stata verificata attraverso la lettura delle permanenze e delle trasformazioni, desunte dall'incrocio del dato metrico rilevato con le fonti documentarie e la fondamentale storiografia critica curata da Anthony Blunt e Patricia Waddy [Blunt, 1958; Waddy, 1976] (Fig. 5). L'evoluzione storico-costruttiva dell'intero complesso è stata schematizzata P. Waddy in cinque macro-fasi secentesche denominate Fase Barberini I-V [3], delle quali tre interessano direttamente il prospetto est.

Questa indagine incrociata ha chiarito quali relazioni geometriche dovessero essere strutturate nel modello e quali difformità dovessero essere parametrizzate come espressione diretta della stratificazione del manufatto. L'ambiente HBIM diviene così lo strumento d'elezione per porre in relazione la struttura generativa originaria delle forme con le alterazioni e le irregolarità che, nel corso del tempo, hanno reso lo specifico elemento architettonico unico [Chiavacci e Pettineo, 2025].

[1] La definizione è stata scelta in accordo con le fonti storiografiche esaminate durante la fase di documentazione.

[2] Il rilievo è stato effettuato nell'ambito delle attività formative del dottorato per riflessioni ed elaborazioni. A partire da questo primo nucleo di lavoro, lo studio è stato successivamente sviluppato e approfondito dalle autrici.

at a preventive «segmentation and semantization of the masses and acquired data» [De Luca, 2011]. To optimize computational management, the global cloud was fragmented into multiple files:

- Spatial macro-segmentation: the cloud was divided into independent subsets (central pavilion and wings). Using lightened clouds allowed their integration into the BIM environment via linked models, loaded as needed without burdening the central file [Chiavacci e Pettineo, 2025].
- Semantic micro-segmentation: on the files in Autodesk ReCap Pro, a further subdivision was carried out to associate morphology with native semantic classes. This decoding extends the element's meaning beyond metric data, supporting parametric HBIM modeling [Tavolare e Cera, 2025] (Fig. 4).

Compositional and permanence analysis

From the spatially and semantically structured database, the plans, elevations, and sections necessary for the compositional analysis were extracted and rendered in orthogonal projection. This investigation highlights a rigid division by levels, attributable to three superimposed orders, and presents a network of orthogonal relationships that defines its rhythm, visual hierarchies, and alignments, making the relationship between load-bearing elements, supported elements, and the decorative apparatus clear.

The compositional analysis was verified through the reading of the permanences and transformations, deduced from cross-referencing the surveyed metric data with documentary sources and the fundamental critical historiography by Anthony Blunt and Patricia Waddy [Blunt, 1958; Waddy, 1976] (Fig. 5). The historical-constructive evolution of the entire complex has been schematized into five seventeenth-century macro-phases named Barberini Phase I-V [3], three of which directly affect the east garden façade. This cross-investigation clarified which geometric relationships had to be structured in the model and which deviations had to be parameterized as a direct expression of the stratification of the artifact. The HBIM environment thus becomes the tool of choice to relate the original generative structure of the forms with the alterations and irregularities that, over time, have made the specific architectural element unique [Chiavacci e Pettineo, 2025].

[1] The definition is formulated according to the relevant literature considered for the analyses

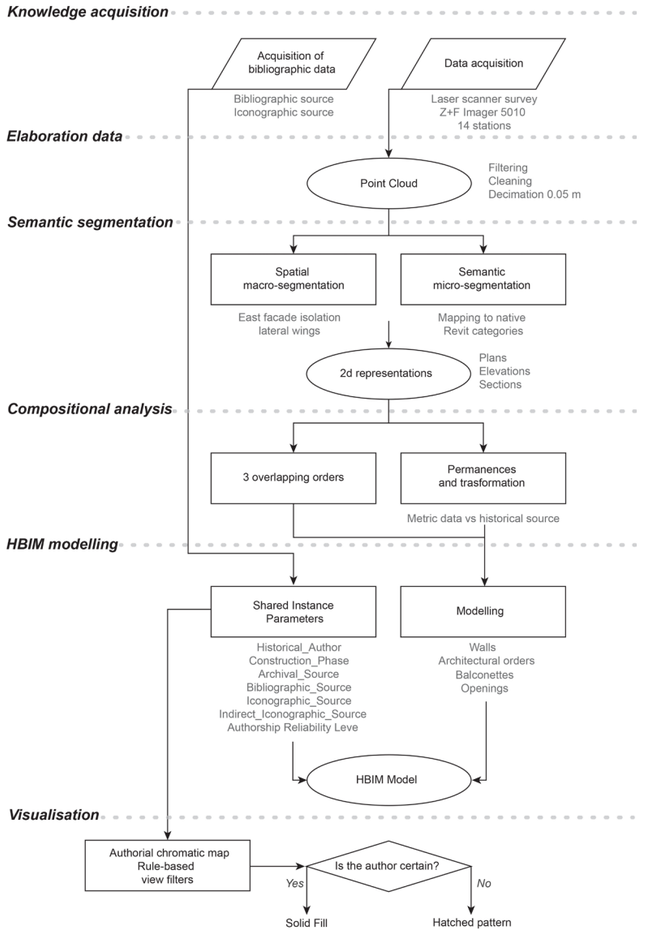


Fig. 2: Diagramma della metodologia (elaborazione degli autori).

Fig. 2: Methodology diagram (image produced by the authors).

HBIM Modeling and Structuring of the Information Database

The modeling was set up as the construction of an information system consistent with the compositional and historical-critical reading of the case study. To govern the complexity of the artifact, the Level of Information Need (LOIN) approach was adopted, initially introduced by the UNI EN 17412-1 standard and today regulated at the international level by the recent UNI EN ISO 7817-1:2024 standard, promoted in recent HBIM methodologies to translate the purpose of the model into specific information requirements. Regarding the LOG, the restitution of the main structural elements pursued the maximum morphological adherence to the numerical model (as is). Conversely, for the decorative apparatuses or those of complex parameterization (such as capitals and bas-reliefs), a conscious geometric simplification was carried out using bounding volumes. This methodological choice responds to the practical need to manage the heterogeneity of historical architecture, calibrating geometric fidelity to the actual analytical needs of the project.

The definition of the Level of Information (LOI) did not pursue an exhaustive material-stratigraphic characterization, as the data were heterogeneous and not always directly observable without extensive destructive investigations. The implementation of the informative parameters prioritized the association of the instances with the historical-evolutionary phases, the authorship attribution, and the iconographic decoding.

[2] The survey was carried out as part of the educational activities of the doctoral program for reflection and elaboration. Starting from this initial core of work, the study was subsequently developed and further investigated by the authors.



Fig. 3: a) Ambito di C. Maderno, *Design for east front of the Palazzo Barberini* (Windsor, Royal Library): Maderno concepisce la facciata est come un blocco murario severo, massiccio e con piccole aperture; b) Ambito di G. L. Bernini, *Design for east front of the Palazzo Barberini* (Vienna, Graphische Sammlung Albertina, inv. 962 e 963): Bernini introduce le tre grandi arcate a tutto sesto (foglio 962) e inserisce l'apparato scultoreo di sapore e altera il rigore maderniano; c) Prospetto orientale, incisione tratta dall'opera *Aedes Barberinae ad Quirinalem* (1642): stato di avanzamento e incongruenze della facciata est subito dopo la conclusione della fase berniniana: discrepanza nelle altezze delle arcate e assenza dei rilievi finali; d) A. Specchi, Engraving of east front of Palazzo Barberini (ca. 1700) e Drawing of east front of Palazzo Barberini (Firenze, Galleria degli Uffizi, Gabinetto dei Disegni, n. 3532 A).

Fig. 3: a) Circle of C. Maderno, *Design for east front of the Palazzo Barberini* (Windsor, Royal Library). Maderno conceives the east facade as a severe, massive block of masonry with small openings; b) Circle of G. L. Bernini, *Design for east front of the Palazzo Barberini* (Vienna, Graphische Sammlung Albertina, inv. 962 and 963). Bernini introduces the three large round-headed arches (sheet 962) and inserts a picturesque sculptural apparatus, altering Maderno's rigor ; c) East front, engraving from the work *Aedes Barberinae ad Quirinalem* (1642). State of progress and incongruities of the east facade immediately following the conclusion of the Berninian phase: discrepancy in the heights of the arches and absence of the final reliefs.; d) A. Specchi, *Engraving of east front of Palazzo Barberini* (c. 1700) and *Drawing of east front of Palazzo Barberini* (Florence, Galleria degli Uffizi, Gabinetto dei Disegni, no. 3532 A.

Modellazione HBIM e strutturazione del database informativo

La modellazione è stata impostata come costruzione di un sistema informativo coerente con la lettura compositiva e storico-critica del caso studio. Per governare la complessità del manufatto, si è adottato l'approccio del Level of Information Need (LOIN), inizialmente introdotto dallo standard UNI EN 17412-1 e oggi regolamentato a livello internazionale dalla recente norma UNI EN ISO 7817-1:2024, promosso nelle metodologie HBIM per tradurre lo scopo del modello in requisiti informativi specifici.

Per quanto concerne il LOG, la restituzione degli elementi strutturali principali ha perseguito la massima aderenza morfologica al modello numerico (*as is*), di contro, per gli apparati decorativi o di complessa parametrizzazione, quali capitelli e bassorilievi, si è operata una consapevole semplificazione geometrica mediante volumi d'ingombro. Tale scelta metodologica risponde alla necessità pratica di gestire l'eterogeneità dell'architettura storica, calibrando la fedeltà geometrica sulle effettive esigenze analitiche del progetto.

La definizione del Livello Informativo (LOI) non ha perseguito un'esaustiva caratterizzazione materico-stratigrafica, i cui dati risultavano disomogenei e non sempre direttamente riscontrabili senza estese

Once the grid and levels were defined, necessary to transfer the ordering logic of the elevation into the BIM environment, we proceeded with the modeling of the load-bearing elements, the primary structure of the model (walls, pilasters, half-columns, main cornices, and springing systems), and subsequently of the supported elements (openings and balconies). The restitution of the masonry macrostructure required overcoming the standard semantic primitives of the software: a contextual semantic modeling was chosen, an approach that prioritized the geometric fidelity dictated by the laser scanner data. The building was modeled floor by floor, corresponding to the three orders found on the facade, interrupting the walls at the identified string-course levels: this makes it possible to record the variations in thickness and material that historically occur as the elevation increases [Attenni, 2019]. The same informative instance attributes necessary for the subsequent historical-critical querying of the database were associated with each extrusion. (fig.6).

The restitution of the architectural orders follows the methodology of hierarchical decomposition based on Levels of Element (LoE) [Giovannini, 2017]. The "column" or "pilaster" element (LoE-II) aggregates in a hierarchical logic its sub-elements (LoE-III: base, shaft, capital), which were modeled independently and subsequently integrated into the main aggregating object, ensuring an accurate control of proportional variations [Tonin e Parisi, 2019].

The small balconies, introduced in the 1670s, constitute a point of particular methodological criticality since the basic use of the native entity for balustrades preset in the main BIM applications proves inadequate for the correct restitution of the element [Giovannini, Mastroianni, 2025]. Extending the logic of decomposition into Levels of Element to this component as well, the conceptual entity of the small balcony (LoE-II) was redefined through the implementation of a customized semantic class, consisting of the aggregation of its sub-elements (LoE-III): parameterized two-dimensional profiles — the profile of the upper handrail, the profile of the lower base — and discretized three-dimensional elements — the turned balusters and the end posts — modeled separately (fig.7).

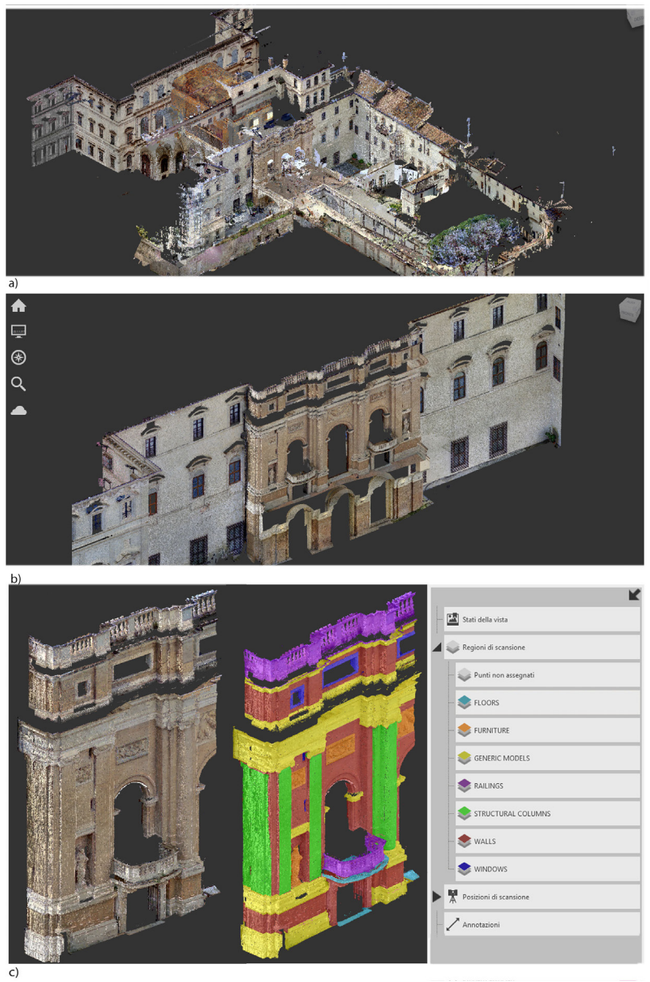


Fig. 4: a) Nuvola di punti dato grezzo b) segmentazione spaziale c) segmentazione semantica (elaborazione degli autori).

Fig. 4: a) Raw data point cloud b) spatial segmentation c) semantic segmentation

Experimentation and results

The implementation of the Level of Information (LOI) operationally complies with the directives of a BIM Execution Plan [UNI 11337:2017]. Achieving the research objective — ensuring that the model acts as the digital outcome of a historical-critical reading — materializes in extending the classic approach toward the temporal dimension

indagini distruttive e si è privilegiata l'implementazione dei parametri informativi tramite l'associazione delle istanze alle fasi storico-evolutive, l'attribuzione autoriale e la decodifica iconografica.

Definiti la griglia e i livelli, necessari per trasferire in ambiente BIM la logica ordinatrice del prospetto, si è proceduto alla modellazione degli elementi portanti, struttura primaria del modello (murature, paraste, semicolonne, cornici principali e sistemi di imposta) e successivamente degli elementi portati (aperture e balconi). La restituzione della macrostruttura muraria ha imposto il superamento delle primitive semantiche standard dei software: si è optato per una modellazione semantica contestuale, un approccio che ha privilegiato la fedeltà geometrica dettata dal dato laser scanner. L'edificio è stato modellato piano per piano, rispettivamente ai tre ordini riscontrati in facciata, interrompendo i muri in corrispondenza dei livelli marcapiano individuati: questo permette di registrare le variazioni di spessore e di materiale che avvengono storicamente salendo di quota [Attenni, 2019]. A ciascuna estrusione sono stati associati i medesimi attributi informativi di istanza necessari per la successiva interrogazione critico-storica del database. (fig.6).

La restituzione degli ordini architettonici segue la metodologia della scomposizione gerarchica basata sui Livelli di Elemento (LoE) [Giovannini, 2017]. L'elemento "colonna" o "parasta" (LoE-II) aggrega in logica gerarchica i suoi sub-elementi (LoE-III: base, fusto, capitello), modellati in autonomia e successivamente integrati all'interno dell'oggetto aggregatore principale, garantendo un accurato controllo delle variazioni proporzionali [Tonin e Parisi, 2019].

I balconcini, introdotti negli anni '70 del Seicento, costituiscono un nodo di particolare criticità metodologica poiché l'impiego basilare dell'entità nativa per le balaustre preimpostata nei principali applicativi BIM risulta inadeguato per la corretta restituzione dell'elemento [Giovannini, Mastroianni, 2025]. Estendendo anche a questo componente la logica di scomposizione in Livelli di Elemento, l'entità concettuale del balconcino (*LoE-II*) è stata ridefinita attraverso l'implementazione di una classe semantica personalizzata, costituita dall'aggregazione dei suoi sub-elementi (*LoE-III*): profili bidimensionali parametrizzati

[3] La periodizzazione storico-costruttiva fa riferimento alla sistematizzazione cronologica del cantiere documentata da Patricia Waddy [Waddy, 1990]. Fase I (Pre-1625) - Preesistenze: Inglobamento del preesistente casino del Cardinale Rodolfo Pio da Carpi (metà XVI sec.) e dei successivi ampliamenti operati dalla famiglia Sforza nel 1583 e nel 1612, strutture che hanno dettato i limiti e costituito l'ossatura della futura ala nord del palazzo; fase II (1625-1629) - Impostazione di Maderno: Dal momento dell'acquisizione della proprietà da parte della famiglia Barberini fino all'avvio del cantiere (dicembre 1628) e alla morte di Carlo Maderno (gennaio 1629). A questa fase risale l'impostazione planimetrica generale a "H" e la prima concezione, massiccia e severa, del padiglione centrale del prospetto est; Fase III (1629-1638 ca.) - Intervento di Bernini e Borromini: Fase di costruzione vera e propria sotto la direzione di Gianlorenzo Bernini, coadiuvato da Francesco Borromini. In questa fase il rigore del progetto maderniano per il prospetto est viene alterato con l'apertura di ampie arcate a tutto sesto per alleggerire il volume e con l'inserimento di un apparato decorativo di matrice più scultorea; Fase IV (Anni '30-'40 del Seicento) - Aggiunte di Antonio Barberini: Realizzazione di volumi e funzioni a corollario del nucleo principale, tra cui la costruzione del teatro isolato a nord (la cui facciata è attribuita a Pietro da Cortona) e l'inserimento della torre dell'orologio (1643-44) posta a coronamento del prospetto est. ; Fase V (1672-1679) - Rimaneggiamenti di Francesco Barberini: Campagna di pesanti alterazioni fisiche e volumetriche operata sotto la supervisione dell'architetto Angelo Torrone. A questa fase viene ascritta l'intrusione dei balconcini nella facciata est, la realizzazione del monumentale "ponte rovinato" per scavalcare il dislivello sud, e la sostanziale modifica dei livelli del terreno del giardino tramite lo sbancamento e la costruzione di un alto muro di contenimento]

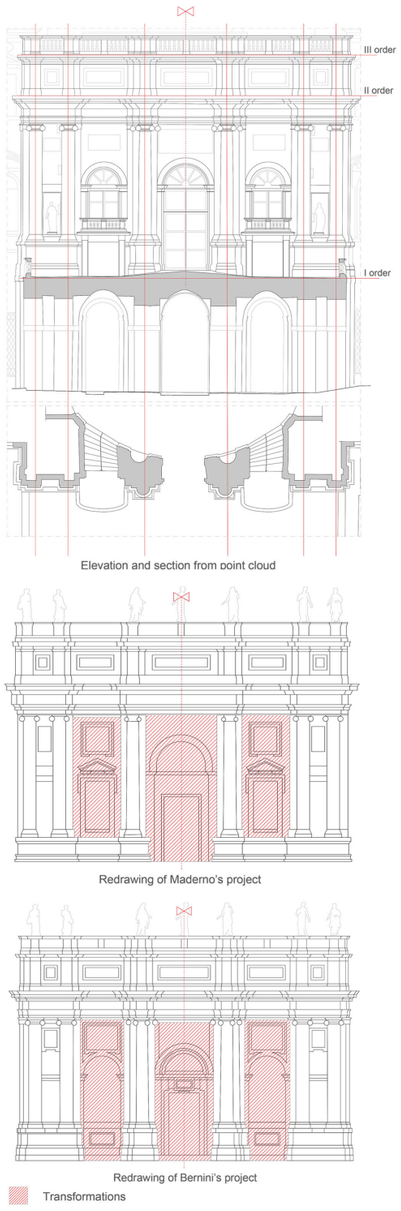


Fig. 5: a) Restituzione 2D dello stato attuale b) Ridisegno del progetto di Maderno c) Ridisegno del progetto attribuito a Bernini, conservato presso la Biblioteca Albertina di Vienna. (elaborazioni degli autori).

Fig. 5: a) 2D restitution of the current state b) Redrawing of Maderno's project c) Redrawing of the project attributed to Bernini, preserved in the Albertina Library in Vienna (image produced by the authors).



Fig. 6: Modellazione HBIM (elaborazioni degli autori).

Fig. 6: HBIM Modeling (image produced by the authors).

(il profilo del corrimano superiore, il profilo del basamento inferiore) ed elementi tridimensionali discretizzati (i balaustri torniti e i montanti terminali) modellati separatamente (fig.7).

Sperimentazione e risultati

L'implementazione dell'apparato informativo (*LOI*) si conforma operativamente alle direttive di un *BIM Execution Plan* [UNI 11337:2017]. Il raggiungimento dell'obiettivo della ricerca, far sì che il modello si configuri come l'esito informatico di una lettura storico-critica, si concretizza nell'estensione dell'approccio classico verso la dimensione temporale (*BIM 4D*), codificando la stratificazione del manufatto attraverso parametri personalizzati. All'interno del database relazionale, il piano di gestione informativa ha previsto la formulazione di specifici attributi strutturati per singola entità e associati a tutte le categorie architettoniche del prospetto: Auto-

(4D BIM), codifying the stratification of the artifact through customized parameters. Within the relational database, the information management plan envisioned the formulation of specific attributes structured for each single entity and associated with all the architectural categories of the facade: *Autore_Storico*, *Fase_Costruttiva*, *Fonte_Archivistica*, *Fonte_Bibliografica*, *Fonte_Iconografica* (direct and indirect), and *LOR_Autoriale* (Fig. 7).

To parameterize the "humanistic doubt," this very last field was introduced, the Authorship Reliability Level (*LOR_Autoriale*). While traditionally the LOR parameter constitutes a methodological standard to evaluate the fidelity of the 3D model to the point

re_Storico, Fase_Costruttiva, Fonte_Archivistica, Fonte_Bibliografica, Fonte_Iconografica (diretta e indiretta) e LOR_Autoriale. (Fig.7)

Per parametrizzare il "dubbio umanistico" è stato introdotto proprio quest'ultimo campo, il *LOR Autoriale (Authorship Reliability Level)*. Se tradizionalmente il parametro LOR costituisce uno standard metodologico per valutare la fedeltà del modello 3D alla nuvola di punti [Bianchini, Nicastro, 2018], in questa sede esso viene traslato e adattato per dichiarare l'affidabilità dell'informazione storica legata all'autore. Al parametro intero è stata associata una scala gerarchica a tre valori, i cui gradi di affidabilità sono definiti da precisi criteri oggettivi:

- **Livello 3 (Alta attendibilità):** assegnato agli elementi la cui paternità è inequivocabilmente provata da fonti documentarie dirette (contratti, mandati di pagamento, corrispondenza coeva) e supportata da una convergenza unanime della letteratura critica.
- **Livello 2 (Media attendibilità):** attribuito alle componenti prive di documentazione archivistica inoppugnabile, ma la cui paternità è avvalorata da fonti indirette (disegni di bottega, testimonianze di cantiere) o da attribuzioni formali e stilistiche ampiamente consolidate dalla storiografia moderna.
- **Livello 1 (Bassa attendibilità):** riservato alle parti d'opera caratterizzate da profonda incertezza, per le quali sussistono ipotesi storiografiche contrastanti (come le complesse sovrapposizioni tra gli interventi di Maderno, Bernini e Borromini) o una totale assenza di fonti documentarie.

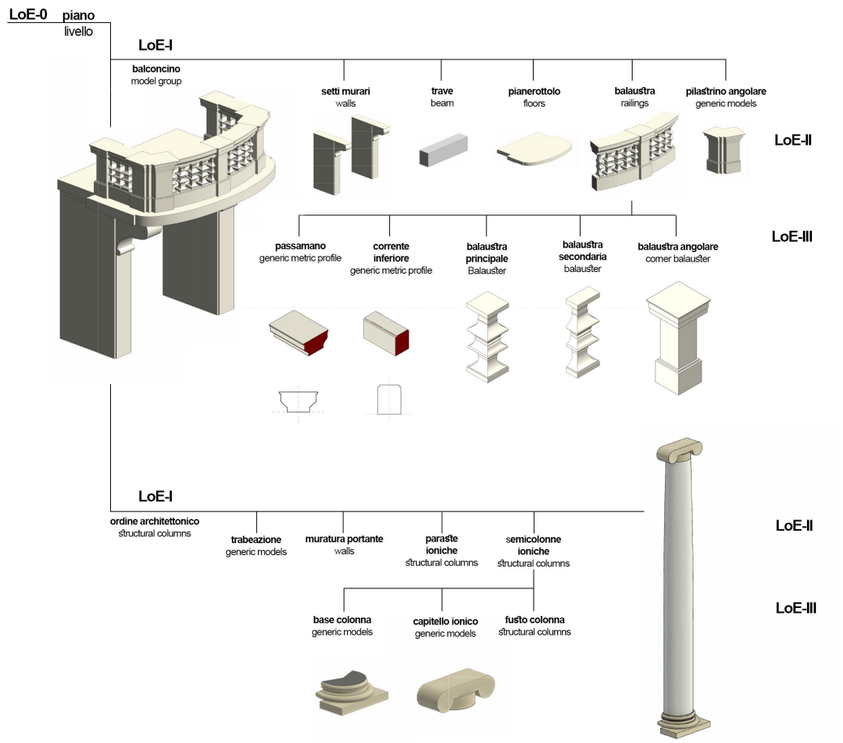


Fig. 7: Scomposizione semantica in LoE e relativa modellazione HBIM degli elementi. (elaborazione degli autori).

Fig. 7: Semantic breakdown into LoE and subsequent HBIM modeling of the elements.

La restituzione ultima si manifesta nella fruizione analitica del modello tridimensionale, resa possibile dall'uso dei filtri di visualizzazione. Sfruttando le potenzialità dei sistemi di interrogazione del database basati su espressioni logiche (*query* semantiche), il software consente di sviluppare molteplici viste tematiche, appositamente configurate per facilitare la lettura e la rappresentazione visiva dei diversi momenti evolutivi del costruito. In questo modo, è possibile rintracciare e isolare dinamicamente gli elementi architettonici associandoli in modo combinato a specifici parametri. Il risultato è una vista tematica che mappa cromaticamente le fasi autoriali con un colore pieno e l'incertezza documentale con un reticolo tratteggiato, configurandosi come un'area meritevole di ulteriori indagini archivistiche (Fig. 8).



Fig. 8: Mappatura tematica del modello HBIM: restituzione grafica dei parametri condivisi per l'individuazione delle fasi autoriali (elaborazione degli autori).

Fig. 8: Thematic mapping of the HBIM model: graphic representation of shared parameters for the identification of authorial phases (image produced by the authors).

cloud [Bianchini, Nicastro, 2018], here it is translated and adapted to declare the reliability of the historical information linked to the author. A hierarchical scale of three values was associated with the integer parameter, whose degrees of reliability are defined by precise objective criteria:

- Level 3 (High reliability): assigned to elements whose authorship is unequivocally proven by direct documentary sources (contracts, payment mandates, coeval correspondence) and supported by a unanimous convergence in the critical literature.
- Level 2 (Medium reliability): attributed to components lacking irrefutable archival documentation, but whose authorship is corroborated by indirect sources (workshop drawings, construction site testimonies) or by formal and stylistic attributions widely consolidated by modern historiography.
- Level 1 (Low reliability): reserved for parts of the work characterized by profound uncertainty, for which conflicting historiographical hypotheses exist (such as the complex overlapping between the interventions of Maderno, Bernini, and Borromini) or a total absence of documentary sources.

The final restitution manifests itself in the analytical use of the three-dimensional model, made possible by the use of visual filters. Exploiting the potential of database querying systems based on logical expressions (semantic queries), the software makes it possible to develop multiple thematic views, specifically configured to facilitate the reading and visual representation of the different evolutionary stages of the building. In this way, it is possible to dynamically trace and isolate the architectural elements by associating them in a combined manner with specific parameters. The result is a thematic view that chromatically maps the authorship phases with a solid color and the documentary uncertainty with an overlaid hatched pattern, presenting itself as an area worthy of further archival investigation (Fig. 8).

[3] The historical-constructive periodization refers to the chronological systematization of the construction site documented by Patricia Waddy [Waddy, 1990]. Phase I (Pre-1625) - Pre-existing structures: Incorporation of the pre-existing casino of Cardinal Rodolfo Pio da Carpi (mid-16th century) and the subsequent expansions carried out by the Sforza family in 1583 and 1612, structures that dictated the limits and constituted the structural framework of the future north wing of the palace; Phase II (1625-1629) - Maderno's Layout: From the acquisition of the property by the Barberini family up to the start of construction (December 1628) and the death of Carlo Maderno (January 1629). To this phase dates the general "H" plan layout and the initial, massive and severe conception of the central pavilion on the east facade; Phase III (c. 1629-1638) - Bernini and Borromini's Intervention: The actual construction phase under the direction of Gianlorenzo Bernini, assisted by Francesco Borromini. In this phase, the rigor of Maderno's design for the east facade was altered with the opening of wide semicircular arches to lighten the volume and the insertion of a more sculptural decorative apparatus; Phase IV (1630s-1640s) - Antonio Barberini's Additions: Creation of ancillary volumes and functions to the main core, including the construction of the isolated theater to the north (whose facade is attributed to Pietro da Cortona) and the insertion of the clock tower (1643-44) crowning the east facade; Phase V (1672-1679) - Francesco Barberini's Remodeling: Campaign of heavy physical and volumetric alterations carried out under the supervision of the architect Angelo Torrone. To this phase are ascribed the intrusion of the small balconies on the east facade, the construction of the monumental "ruined bridge" spanning the southern height difference, and the substantial modification of the garden ground levels through earth removal and the construction of a high retaining wall.

tino tratteggiato sovrapposto, ponendosi come area meritevole di ulteriori approfondimenti d'archivio (Fig. 8).

Conclusioni

Il contributo ha illustrato l'iter di rilievo, decostruzione logica e modellazione HBIM del prospetto orientale verso il giardino di Palazzo Barberini. Dal punto di vista metodologico, la ricerca evidenzia come la costruzione di un modello HBIM per il patrimonio storico comprenda operazioni interpretative che risultano imprescindibili per conferire valore conoscitivo al database. Il modello strutturato supera la nozione di semplice rilievo *as-built*, integrando la dimensione temporale e storico-critica. La stratificazione cronologica e le incertezze attributive acquisiscono in tal modo consistenza parametrica, configurando uno strumento operativo implementabile a supporto della ricerca storica e del restauro. Le prospettive future di ricerca si orientano verso l'estensione del caso studio all'intero Palazzo Barberini e all'integrazione della base tridimensionale con le fonti documentali d'archivio. Un obiettivo è lo sviluppo in ambiente BIM delle configurazioni architettoniche teoriche, documentate ma non realizzate o successivamente alterate, riconducibili alle intenzioni progettuali di Carlo Maderno e Gianlorenzo Bernini. La modellazione e la comparazione dello stato "non costruito" con lo stato di fatto fornirà alla storiografia architettonica un avanzato strumento per l'analisi delle dinamiche del cantiere barocco.

Bibliografia

Attenni M. (2019). L'architettura romana al tempo del BIM. In T. Empler, A. Fusinetti (a cura di). *3D Modeling & BIM. Modelli e soluzioni per la digitalizzazione*, pp. 300-317. Roma: DEI s.r.l. Tipografia del Genio Civile.

Blunt A. (1958). The Palazzo Barberini: The contributions of Maderno, Bernini and Pietro da Cortona. In *Journal of the Warburg and Courtauld Institutes*, vol. 21, n. 3/4, pp. 256-287. https://doi.org/10.2307/750826

Chiavacci, L., & Pettineo, A. (2025). Strategie di modellazione parametrica per lo studio del Forte di Sant'Andrea nella laguna di Venezia. In T. Empler, A. Caldarone, & A. Fusinetti (A cura di), *3D Modeling & BIM 2025 - Proliferazioni* (pp. 100–113). PUBLICA.

De Luca, L. (2011). Verso la caratterizzazione semantica di rappresentazioni digitali di artefatti architettonici: linee programmatiche di ricerca. *DisegnareCon*, *4*(8), 99–106

Giovannini E. C. (2017). VRIM workflow: Semantic H-BIM objects using parametric geometries. In T. Empler (a cura di). *3D Modeling & BIM. Progettazione, design, proposte per la ricostruzione*, pp. 212-229. Roma: DEI s.r.l. Tipografia del Genio Civile.

Giovannini, E. C., & Mastroianni, D. (2025). La logica delle scale neoclassiche: proliferazioni della modellazione 3D nell'approccio HBIM. In T. Empler, A. Caldarone, & A. Fusinetti (A cura di), *3D Modeling & BIM 2025 - Proliferazioni* (pp. 176–189). PUBLICA.

Conclusions

This contribution illustrates the process of surveying, logical deconstruction, and HBIM modeling of the east garden facade of *Palazzo Barberini*. From a methodological point of view, the research highlights how the construction of an HBIM model for historical heritage includes interpretive operations that are essential to confer cognitive value to the database. The structured model goes beyond the concept of a simple as-built survey, integrating the temporal and historical-critical dimension. Chronological stratification and attributional uncertainties thus acquire parametric consistency, establishing an implementable operational tool to support historical research and restoration. Future research perspectives are directed toward extending the case study to the entire Palazzo Barberini and integrating the three-dimensional base with archival documentary sources. The objective is the development within the BIM environment of theoretical architectural configurations — documented but not realized or subsequently altered — attributable to the design intentions of Carlo Maderno and Gianlorenzo Bernini. The modeling and comparison of the "unbuilt" state with the current state will provide architectural historiography with an advanced tool for analyzing the dynamics of the Baroque construction site.

Tavolare, R., & Cera, V. (2025). Approccio Scan-to-BIM integrato con processi di decostruzione geometrica. In T. Empler, A. Caldarone, & A. Fusinetti (A cura di), *3D Modeling & BIM 2025 - Proliferazioni* (pp. 352–363). PUBLICA

Tetius H. (1642). *Aedes Barberinae ad Quirinalem*. Roma: Excudebat Mascardus.

Tonin A., Parisi P. (2019). Curtain wall ed elementi in replicazione: Un processo di gestione in ambiente BIM attraverso le famiglie nidificate. In T. Empler, A. Fusinetti (a cura di). *3D Modeling & BIM. Modelli e soluzioni per la digitalizzazione*, pp. 84-99. Roma: DEI s.r.l. Tipografia del Genio Civile.

UNI (2017). *UNI 11337:2017. Edilizia e opere di ingegneria civile - Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

UNI EN ISO 7817-1:2024. *Building information modelling - Livello di fabbisogno informativo - Parte 1: Concetti e principi*. Milano: Ente Italiano di Normazione (UNI).

Waddy P. (1976). The design and designers of Palazzo Barberini. In *Journal of the Society of Architectural Historians*, vol. 35, n. 3, pp. 151-185. https://doi.org/10.2307/989036

Waddy P. (1990). Palazzo Barberini alle Quattro Fontane. In P. Waddy, *Seventeenth-Century Roman Palaces: Use and the Art of the Plan*. New York: Architectural History Foundation; MIT Press.

Autori

Fabrizio Farenga[1]
Giovannini Elisabetta Caterina[1]

Email

farengafabrizio@gmail.com
elisabetta.giovannini@polito.it

[1] Dipartimento di Architettura e Design DAD, Politecnico di Torino

Rappresentare digitalmente l'utopia: un Atlante HBIM per l'architettura disegnata non costruita

Digitally representing utopia: an HBIM Atlas for the unbuilt drawn architecture

Keywords

DRAWN ARCHITECTURE
UNBUILT HERITAGE
HBIM
PARAMETRIC MODELLING
DIGITAL ARCHIVES

Abstract

Il contributo propone un metodo per analizzare e modellare digitalmente architetture non costruite, affrontando la complessità informativa necessaria alla ricostruzione virtuale di una porzione della Cesena utopica progettata da Mauro Guidi. La modellazione parametrica diventa così un ambiente di analisi critica per la gestione di fonti documentali eterogenee e di varianti compositive, rendendo trasparenti le scelte ricostruttive e i loro presupposti documentari ai fini di una riproposizione digitale.

This paper proposes a method for digitally analysing and modelling unbuilt architecture, addressing the informational complexity required for the virtual reconstruction of a portion of the utopian city of Cesena Nuova, designed by Mauro Guidi. Parametric modelling thus becomes an environment for critical analysis, capable of managing heterogeneous documentary sources and compositional variants, and of making reconstructive choices and their documentary premises transparent within the digital reconstruction.

Introduzione

La ricerca affronta il tema della rappresentazione del patrimonio architettonico non costruito[1], assumendo come caso di studio la città utopica di Cesena Nuova progettata da Mauro Guidi (1761-1829) all'inizio del XIX secolo. Dell'attività dell'architetto cesenate rimangono oggi oltre mille disegni e progetti, raccolti in dodici atlanti conservati presso la Biblioteca Malatestiana di Cesena [Gori & Savoia, 2005]. In particolare, l'Atlante 48 raccoglie due progetti di città utopiche mai realizzate, Cesena Nuova e Cesenatico nuovo [Pistocchi, 2010]. Nonostante non sia mai stata realizzata, l'idea progettuale dell'architetto per Cesena Nuova è documentata da un corpus articolato di testi e disegni, organizzato in carte numerate, che restituisce un sistema urbano e architettonico ricco ma non univoco. È proprio questa natura intrinsecamente aperta a rendere il progetto un terreno privilegiato per riflettere sulle possibilità offerte dagli strumenti digitali nella gestione della complessità informativa e, in particolare, sulle possibilità interpretative offerte dalla modellazione parametrica per la digitalizzazione e la restituzione tridimensionale di un patrimonio mai costruito. L'obiettivo della ricerca svolta è duplice: da un lato, proporre una lettura critica del progetto di Mauro Guidi attraverso l'analisi grafica e integrata delle fonti (descrizioni testuali, piante e prospetti); dall'altro, verificare il potenziale della modellazione parametrica per la restituzione di un patrimonio privo di consistenza materiale, ma dotato di una forte coerenza tipologica. In questa prospettiva, si è scelto di utilizzare un modello parametrico, sviluppato attraverso strumenti propri dell'Heritage Building Information Modelling (HBIM), che non coincide con una ricostruzione definitiva, bensì diventa un dispositivo conoscitivo aperto, capace di adattarsi alle regole compositive dell'autore e di offrire molteplici scenari progettuali. Il processo di digitalizzazione del patrimonio disegnato da Mauro Guidi ha seguito un processo ormai consolidato, suddiviso in tre macro-fasi principali (Fig. 1). La prima fase, ha previsto la raccolta del materiale documentario utile alla ricerca, successivamente l'approccio è stato votato alla modellazione parametrica ai fini della costruzione di un atlante 3D (famiglie parametriche) riutilizzabili in ambiente HBIM. Il modello diventa così uno strumento di accesso alle informazioni che hanno dettato la proposta ricostruttiva sviluppata. Dal punto di vista operativo, il processo si è articolato invece secondo le seguenti fasi:

Documentazione. Il corpus archivistico è stato analizzato al fine di individuare le fonti primarie descrittive e iconografiche ai fini della riproposizione digitale. Le fonti documentarie sono state quindi digitalizzate per poter essere riutilizzate in ambiente CAD e HBIM.

Analisi. Il materiale precedentemente raccolto è stato organizzato, classificato e georeferenziato in modo da costituire una prima base di configurazione spaziale alla scala urbana. Alla scala architettonica, si è invece provveduto ad eseguire un'analisi grafica e porzionale per il dimensionamento degli isolati in ambiente CAD.

Interpretazione. Le piante, digitalizzate, sono state interpretate in ambiente CAD: dal punto di vista planimetrico, il dimensionamento degli ambienti è stato dedotto limitatamente ai vani perimetrali, sulla base della loro corrispondenza diretta con i prospetti. I prospetti hanno consentito l'analisi dimensionale e semantica degli elementi architettonici ai fini della loro riproposizione in ambiente HBIM. L'intera fase assume un forte carattere interpretativo in quando segue le regole semantiche proprie della costruzione di oggetti parametrici. Rappresentazione. Il sistema di rappresentazione si fonda sull'impiego di modelli HBIM, all'interno dei quali ha giocato un ruolo predominante lo sviluppo di varianti tipologiche progettuali, coerenti con la logica compositiva di Guidi. Visualizzazione. Attraverso l'utilizzo di abachi è possibile interrogare il modello per ottenere informazioni sulle fonti iconografiche e documentarie alla base della modellazione parametrica, incluse in parametri di progetto. Il modello permette inoltre di visualizzare gli oggetti parametrici presenti in ciascuna variante.

[1] Nel presente contributo l'espressione patrimonio non costruito è utilizzata per indicare un insieme di progetti architettonici e urbani mai realizzati, ma caratterizzati da un alto grado di definizione grafica e testuale, tale da costituire un corpus documentario autonomo e coerente. Si tratta di un patrimonio che, pur privo di materialità fisica, possiede una consistenza culturale e progettuale comparabile a quella dell'architettura costruita, e che richiede pertanto strumenti critici e rappresentativi specifici.

Introduction

This research addresses the representation of unbuilt architectural heritage[1], using the utopian city of Cesena Nuova, designed by Mauro Guidi (1761–1829) at the beginning of the nineteenth century, as its case study. More than a thousand drawings and projects by the Cesena-born architect survive today, collected in twelve atlases held at the Biblioteca Malatestiana in Cesena [Gori & Savoia, 2005]. In particular, Atlas 48 brings together two projects for utopian cities that were never built, Cesena Nuova and Cesenatico Nuovo [Pistocchi, 2010].

Although it was never realised, Guidi's design for Cesena Nuova is documented by an articulated corpus of texts and drawings, organised into numbered sheets, Carte, which together describe a rich but not univocal urban and architectural system. It is precisely this intrinsically open nature that makes the project a privileged ground for reflecting on the possibilities offered by digital tools in managing informational complexity, and in particular on the interpretive possibilities offered by parametric modelling for the digitisation and three-dimensional restitution of a heritage that was never built.

The research has a twofold aim: on the one hand, to propose a critical reading of Mauro Guidi's project through the graphic and integrated analysis of the sources (textual descriptions, plans and elevations); on the other, to test the potential of parametric modelling for the restitution of a heritage that lacks material substance but possesses a strong typological coherence.

With this in mind, the research adopted a parametric model developed using tools proper to Heritage Building Information Modelling (HBIM) processes, which does not aim to provide a definitive reconstruction but instead becomes an open cognitive device, capable of adapting to the author's compositional rules and of offering multiple design scenarios.

[1] In this paper, the expression "unbuilt heritage" is used to identify a set of architectural and urban projects that were never realised but are characterised by a high degree of graphic and textual definition, such as to constitute an autonomous and coherent documentary corpus. This is a heritage that, although lacking physical materiality, possesses a cultural and design substance comparable to that of built architecture, and which therefore requires specific critical and representational tools.

Analisi grafica e proporzionale: un approccio integrato per la ricostruzione storica

L'analisi grafica e proporzionale è stata effettuata incrociando le informazioni presenti in due insiemi documentari: le carte dei testi e quelle dei disegni [Guidi, 1821]. La relazione tra i due non è lineare, ma costruisce un sistema informativo complesso, fondato su rimandi, sovrapposizioni, omissioni e disallineamenti.

Per questo motivo, una precedente ricerca si è occupata di sistematizzare e organizzare il corpus documentario attraverso la costruzione di tabelle di correlazione tra l'apparato scritto e quello iconografico, utili a verificare coerenze, ricorrenze e anomalie [Giovannini & Foschi, 2025]. Una fase preliminare di questa ricerca ha invece visto la creazione di un 'puzzle 3D' (Fig. 2) dove le piante presenti nelle carte dell'Atlante 48, combinate con l'apparato descrittivo, sono state posizionate all'interno della planimetria principale (carta 14). All'interno di questo contributo si analizza e si ripropone tridimensionalmente una specifica tipologia edilizia, ricorrente nel progetto di Mauro Guidi: i palazzi nobiliari, di cui esistono due tipologie principali di facciata, con portici e prive di portici, combinati con due tipologie di impianto planimetrico.

The digitisation of the drawn architecture designed by Mauro Guidi followed a now well-established process, divided into three main macro-phases (Fig. 1). The first phase involved collecting the documentary material useful to the research; the subsequent approach was devoted to parametric modelling, with the aim of building a reusable 3D atlas (parametric families) within an HBIM environment. The model thus becomes a tool for accessing the information that informed the reconstructive proposal developed.

From an operational standpoint, the process was instead articulated according to the following phases:

Documentation. The archival corpus was analysed to identify the primary descriptive and iconographic sources for the digital reconstruction. The documentary sources were then digitised so that they could be reused in CAD and HBIM environments.

Analysis. The previously collected material was organised, classified and georeferenced so as to establish an initial spatial configuration at the urban scale. At the architectural scale, a graphic and proportional analysis was instead carried out to size the building blocks in a CAD environment.

Interpretation. The digitised plans were interpreted in a CAD environment: from a planimetric point of view, the sizing of the rooms was deduced only for the perimeter rooms, on the basis of their direct correspondence with the elevations. The elevations enabled the dimensional and semantic analysis of the architectural elements for their digitisation in an HBIM environment. This entire phase is strongly interpretive in nature, as it follows the semantic rules proper to the construction of parametric objects.

Representation. The representation system is based on the use of HBIM models,

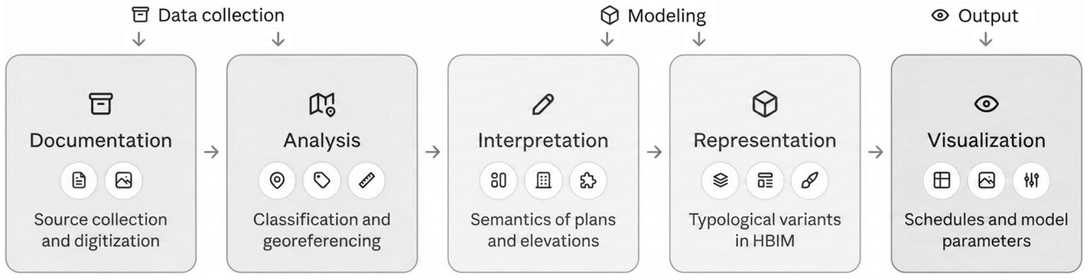


Fig. 1: Processo di digitalizzazione, dal disegno all'atlante 3D di varianti per gli isolati di Borgo Fiume (E.C. Giovannini)

Fig. 1: Digitisation workflow from documentary heritage to 3D atlas of variants for Borgo Fiume building blocks (E.C.Giovannini).

Dal punto di vista metodologico, la costruzione del corpus parametrico per la ricostruzione digitale si è concentrata sulla ricostruzione di palazzi nobiliari, appartenenti all'area della città denominata Borgo Fiume, ovvero l'area che costeggia il fiume Savio. L'analisi grafica e proporzionale delle piante è stata propedeutica all'individuazione di ricorrenze modulari e compositive seguendo l'unità di misura indicata nelle carte, ovvero il piede e la canna cesenate[2].

Il dimensionamento finale è stato eseguito convertendo l'unità di misura storica in base al sistema decimale moderno. Questa operazione ha consentito di ristabilire rapporti attendibili di scala e di predisporre una base dimensionale univoca per la successiva modellazione digitale. L'analisi dei disegni dedicati alle residenze nobiliari ha messo in luce un impianto tipologico modulare, fondato su un numero limitato di piante e su un repertorio di prospetti combinabili (carte 73-98). Le piante individuate condividono una logica distributiva comune, organizzata attorno ad una corte centrale e a un asse di simmetria che governa l'intera composizione. Le variazioni non annullano il sistema, ma lo articolano mediante azioni di addizione, sottrazione ed estensione di moduli individuati attraverso l'analisi grafica dell'impianto compositivo. Le carte storiche, non risultando perfettamente parallele al piano di scansione, presentano imperfezioni e deformazioni ottiche che hanno reso impossibile utilizzarle come basi assolutamente oggettive per il ridisegno bidimensionale; sono quindi state utilizzate come riferimento per cogliere le proporzioni fisse tra le tavole, i rapporti volumetrici e le logiche distributive, cui si è integrato un lavoro di interpretazione e di normalizzazione geometrica (Fig. 3).

Successivamente a questa fase di analisi, si è scelto di ridisegnare in bidimensionale, rettificando e normalizzando i moduli individuati, al fine di ottenere tutte le piante residenziali per il loro futuro riutilizzo in un ambiente di modellazione parametrica (Fig. 4). L'adozione della metrica storica per la fase di analisi e di ridisegno bidimensionale ha messo in luce pattern modulari, ripetizioni numeriche, ad esempio, multipli di 3 e 5, micro-armonie e ricorrenze nel proporzionamento degli ambienti, del portico e delle decorazioni in facciata che solo un rapporto diretto con i dimensionamenti originali poteva svelare. Questo approccio ha permesso di evitare le deformazioni indotte da un possibile ridisegno basato su unità di misura decimali, ma soprattutto ha obbligato a pensare con la mente dell'autore, esaminando relazioni, moduli e proporzioni nate in un lessico metrico allora corrente, e oggi diversamente interpretabile.

Modellazione parametrica per il Borgo Fiume: un Atlante HBIM

La scelta di limitare l'applicazione dell'HBIM a una porzione omogenea del tessuto urbano risponde all'esigenza di controllare il grado di complessità e di rendere espliciti i passaggi interpretativi, dalla fonte iconografica al modello tridimensionale, senza ambire a una restituzione totale o definitiva dell'intero progetto utopico.

[2] L'analisi del 'Dizionario universale dei pesi e delle misure' ha consentito di identificare il piede cesenate pari a 0,5384 m e la canna cesenate, equivalente a dieci piedi cesenati, pari a 5,384 m (Croci, 1860). La distinzione tra questa convenzione locale e altre unità omonime in uso in contesti differenti (ad esempio la canna romana) si è rivelata determinante per la corretta interpretazione delle proporzioni urbane ed edilizie e per la successiva traduzione dei dati in ambiente CAD/BIM.

within which the development of typological design variants, consistent with Guidi's compositional logic, played a predominant role.

Visualisation. Through the use of schedules, the model can be queried to obtain information on the iconographic and documentary sources underlying the parametric modelling, included as project parameters. The model also allows the parametric objects present in each variant to be visualised.

Graphic and proportional analysis: an integrated approach to historical reconstruction

The graphic and proportional analysis was carried out by cross-referencing the information contained in two documentary sets: the sheets devoted to both textual descriptions and drawn architecture [Guidi, 1821]. The relationship between the two is not linear, but instead constructs a complex information system, based on cross-references, overlaps, omissions and misalignments.

For this reason, an earlier study undertook to systematise and organise the documentary corpus by constructing correlation tables between the written and iconographic apparatus, useful for verifying consistencies, recurrences and anomalies [Giovannini & Foschi, 2025].

A preliminary phase of this research instead involved creating a ' 3D puzzle' (Fig. 2), in which the plans found in the sheets of Atlas 48, combined with the descriptive apparatus, were positioned within the main plan (carta 14).

This paper analyses and three-dimensionally digitalise a specific building typology that recurs throughout Mauro Guidi's project: noble palaces, of which there exist two main façade typologies, with porticoes and without porticoes, combined with two typologies of plan layout.

From a methodological point of view, the construction of the parametric corpus for the digital reconstruction focused on the reconstruction of noble palaces belonging to the area of the city known as Borgo Fiume, that is, the area running alongside the Savio river. The graphic and proportional analysis of the plans laid the groundwork for identifying modular and compositional recurrences, following the unit of measurement indicated on the sheets, namely the Cesena foot and the canna cesenate[2].

Final sizing was carried out by converting the historical unit of measurement into the modern decimal system. This made it possible to re-establish reliable scale relationships and to set up an unambiguous dimensional basis for the subsequent digital modelling.

Analysis of the drawings dedicated to the noble residences revealed a modular typological layout, based on a limited number of plans and a repertoire of combinable elevations (carte 73–98). The plans identified share a common distributive logic, organised around a central courtyard and an axis of symmetry that governs the entire composition. The variations do not cancel out the system but rather articulate it through actions of addition, subtraction and extension of modules identified

[2] Analysis of the '*Dizionario universale dei pesi e delle misure*' made it possible to establish the Cesena foot as equal to 0.5384 m, and the *canna cesenate*, equivalent to ten Cesena feets, as equal to 5.384 m (Croci, 1860). Distinguishing this local convention from other units sharing the same name but used in different contexts (for example, the *canne romane*) has been decisive for the correct interpretation of the urban and building proportions, and for the subsequent translation of the data into a CAD/BIM environment.

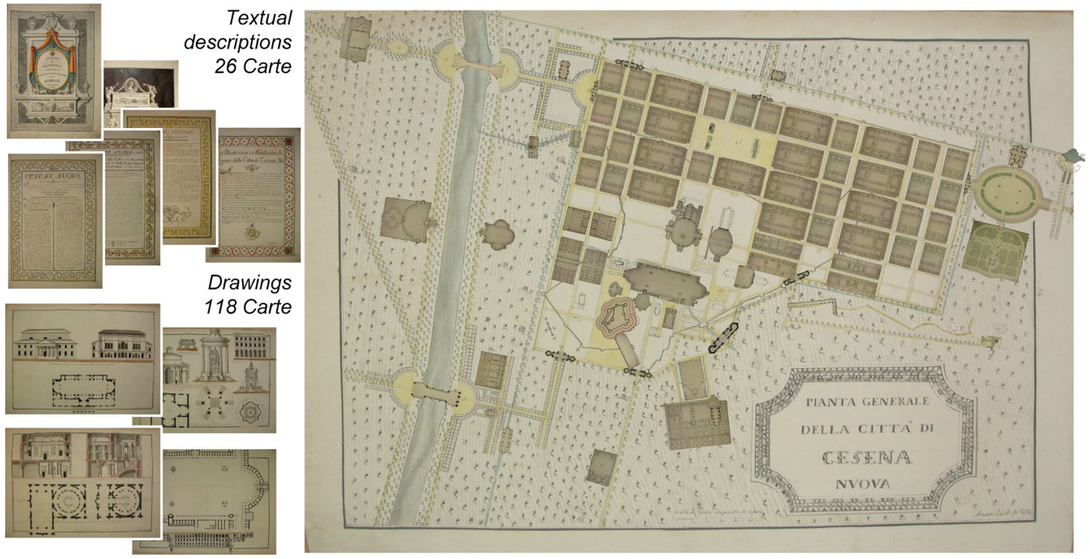


Fig. 2: Ricostruzione della maglia urbana di Cesena Nuova con le planimetrie delle fonti documentarie (F. Farenga).

Fig. 2: Reconstruction of the urban grid of Cesena Nuova using the plans derived from from the documentary sources (F. Farenga).

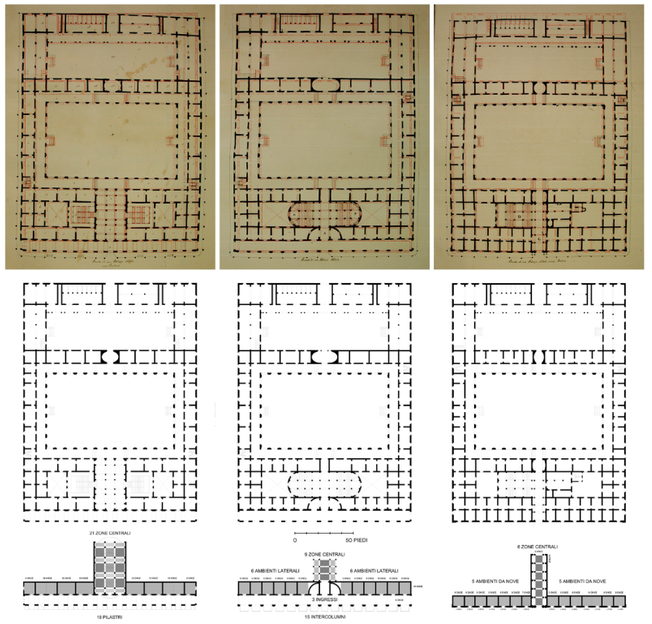


Fig. 3: Ridisegno e analisi proporzionale di piante (carte 67,69,70) (F. Farenga)

Fig. 3: Bidimensional redrawing and proportional analysis of plans (carte 67,69,70) (F. Farenga).

Dal punto di vista progettuale, il Borgo del Fiume è caratterizzato da una relativa omogeneità dimensionale e funzionale, dalla presenza di un'unica tipologia di pianta residenziale non porticata (carta 70) e da un repertorio definito di prospetti (carte 73-80), elementi che lo rendono particolarmente adatto alla modellazione parametrica e alla gestione di 16 varianti. L'oggetto di questo studio è stato, infatti, valutare come potesse essere gestita la complessità progettuale di Mauro Guidi in un unico ambiente digitale, capace di gestire la modellazione geometrica delle varianti compositive dei fronti e la complessità informativa legata alla necessità di attribuire a ogni variante la fonte iconografica di riferimento.

Si è quindi scelto di utilizzare un ambiente HBIM che permettesse di gestire e visualizzare la complessità progettuale dell'architetto: la logica dei multipli, dei ripetuti e delle simmetrie costituisce la vera grammatica del progetto utopico per Cesena Nuova e una base fondante per la successiva fase di digitalizzazione parametrica.

Anche i prospetti (carte 73-80) rispondono a una logica di ripetizione controllata. Più che elementi univocamente associati a una singola pianta, essi si configurano come un campionario aperto, basato su proporzioni, assi e ritmi ricorrenti. Da qui deriva la costruzione di una matrice delle compatibilità tra piante e prospetti, pensata non per definire una sola soluzione, bensì per rendere esplicito il funzionamento del sistema.

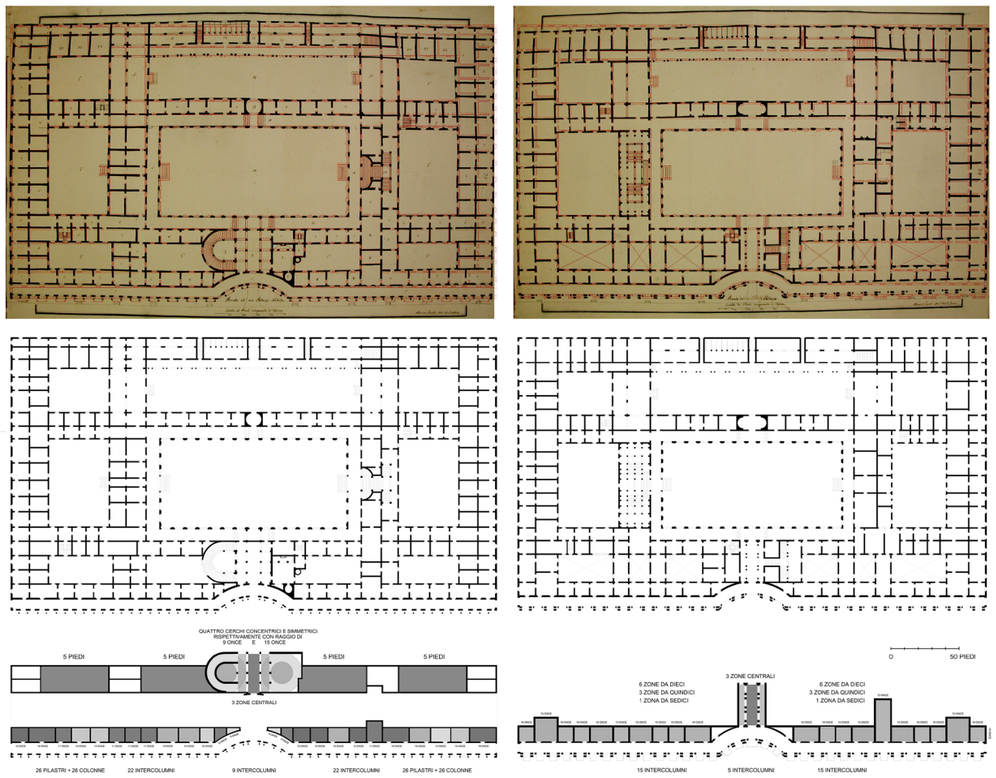


Fig. 4: Ridisegno e analisi proporzionale di piante (carte 71,72) (F. Farenga)

Fig. 4: Bidimensional redrawing and proportional analysis of plans (carte 71,72) (F. Farenga).

Una volta ricostruita la logica urbana e tipologica, il patrimonio è stato digitalizzato in un modello HBIM attraverso tre passaggi:

Analisi semantica. I prospetti non porticati sono stati scomposti in 'elementi di facciata modulari' e 'elementi di facciata angolari', con l'individuazione di ciascuna categoria di sub-elementi (finestre, portali, bugnati, marcapiani, cornici, balaustre).

Creazione di famiglie parametriche. Per ogni sub-elemento è stata costruita una famiglia parametrica, con parametri legati alle unità di misura storiche (piedi e once) e alla loro conversione in metri. Questo ha permesso di mantenere le proporzioni originarie, pur rendendole leggibili anche oggi.

Sistema di varianti. Ogni elemento individuato dall'analisi semantica è diventato una variante.

Il concetto di variante in questo contesto di ricostruzione virtuale HBIM non è inteso come semplice alternativa progettuale o come opzione grafica, bensì come un dispositivo informativo strutturato. In particolare, le 16 varianti sviluppate (32 elementi) sono state utilizzate per rappresentare diverse configurazioni dello stesso sistema tipologico, tutte coerenti con le regole compositive, dimensionali e semantiche desunte dalle fonti storiche (Fig. 5). La gestione delle varianti consente di mantenere invariata la struttura di base del modello (livelli, impianto planimetrico, famiglie parametriche), attivando, di volta in volta, soluzioni diverse per i prospetti e gli apparati decorativi (Fig. 6).

Questo approccio permette di archiviare, confrontare e rendere esplicite le alternative interpretative senza produrre modelli separati, rafforzando la trasparenza del processo ricostruttivo e rendendo il modello interrogabile come atlante di possibilità, anziché come esito definitivo.

Quattro di queste varianti sono state applicate all'area del Borgo del Fiume: quattro isolati identici in pianta, ma radicalmente diversi

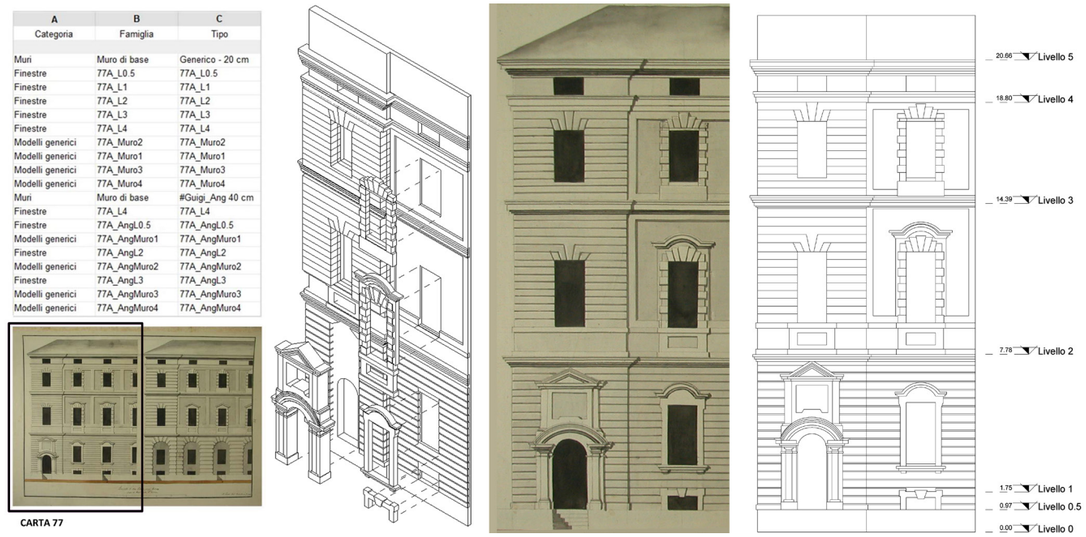


Fig. 5: Modellazione geometrica e informativa di variante tipo, scomposizione e abaco delle sue famiglie parametriche (HBIM variant, F. Farenga; Image layout, E.C. Giovannini)

Fig. 5: Geometric and informational modelling of a sample variant, breakdown and schedule of its parametric families (HBIM variant, F. Farenga; image layout, E.C. Giovannini)

Parametric modelling for Borgo Fiume: an HBIM Atlas

The decision to limit the application of HBIM to a homogeneous portion of the urban fabric responds to the need to control the degree of complexity and to make explicit the interpretive steps from the iconographic source to the three-dimensional model, without aiming at a total or definitive restitution of the entire utopian project.

From a design standpoint, Borgo Fiume is characterised by relative dimensional and

in facciata (Fig. 7). La simulazione mostra come da un unico schema urbano possano nascere combinazioni praticamente infinite, proprio come suggerito dall'ambizione totalizzante di Guidi.

Conclusioni

L'applicazione dell'HBIM a un patrimonio mai costruito comporta uno spostamento metodologico rilevante: in assenza di una realtà fisica da misurare, il modello non deriva dal rilievo diretto, ma dall'interpretazione critica delle fonti. La costruzione del modello HBIM diventa un atto critico e filologico, in cui ogni scelta morfologica, proporzionale e costruttiva deriva da una lettura incrociata delle fonti testuali e grafiche e da una valutazione della loro attendibilità. In questo senso l'HBIM non registra semplicemente ciò che è stato, ma rende esplicito ciò che avrebbe potuto essere, trasformandosi in un ambiente informativo orientato alla possibilità.

La modellazione parametrica ha svolto un ruolo centrale (Fig. 8). Le regole compositive ricavate dall'analisi di piante e prospetti sono state tradotte in famiglie parametriche in grado di incorporare varianti controllate. In questo modo, il lavoro qui presentato assume la trasparenza del dato come principio fondante: ogni elemento del modello è concepito come portatore di informazione non solo geometrica, ma anche semantica e critica, rendendo espliciti il rapporto con la fonte e le alternative possibili. Ogni prospetto è stato configurato come variante coerente di uno stesso sistema, consentendo



Fig. 6: Varianti di facciata per prospetti non porticati (HBIM variants, F. Farenga; Image layout, E.C. Giovannini)

Fig. 6: Façade variants for non-porticoed elevations (HBIM variants, F. Farenga; image layout, E.C. Giovannini)

functional homogeneity, by the presence of a single non-porticoed residential plan typology (carta 70), and by a defined repertoire of elevations (carte 73-80) features that make it particularly suited to parametric modelling and to managing 16 variants.

The aim of this study was, in fact, to assess how the design complexity of Mauro Guidi's work could be managed within a single digital environment, capable of handling both the geometric modelling of the compositional variants of the façades and the informational complexity associated with the need to attribute the relevant iconographic source to each variant.

An HBIM environment was therefore chosen that would make it possible to manage and visualise the architect's design complexity: the logic of multiples, repetitions and symmetries constitutes the true grammar of the utopian project for Cesena Nuova and a founding basis for the subsequent phase of parametric digitisation.

Also the elevations (carte 73-80) follow a logic of controlled repetition. Rather than being elements univocally associated with a single plan, they constitute an open repertoire, based on recurring proportions, axes and rhythms. From this derives the construction of a compatibility matrix between plans and elevations, conceived not to define a single solution but to make the functioning of the system explicit.

Once the urban and typological logic had been reconstructed, the heritage was digitised into an HBIM model through three steps:

Semantic analysis. The non-porticoed elevations were broken down into 'modular façade elements' and 'corner façade elements', with each category of sub-element identified (windows, portals, rustication, string courses, cornices, balustrades).

Creation of parametric families. For each sub-element, a parametric family was built, with parameters linked to the historical units of measurement (feet and ounces) and to their conversion into metres. This made it possible to preserve the original proportions while keeping them legible today. Variant system. Each element identified through the semantic analysis became a variant.

In this context of HBIM virtual reconstruction, the concept of "variant" is not understood as a simple design alternative or graphic option, but as a structured informational device. In particular, the 16 variants developed (32 elements) were used to repre-

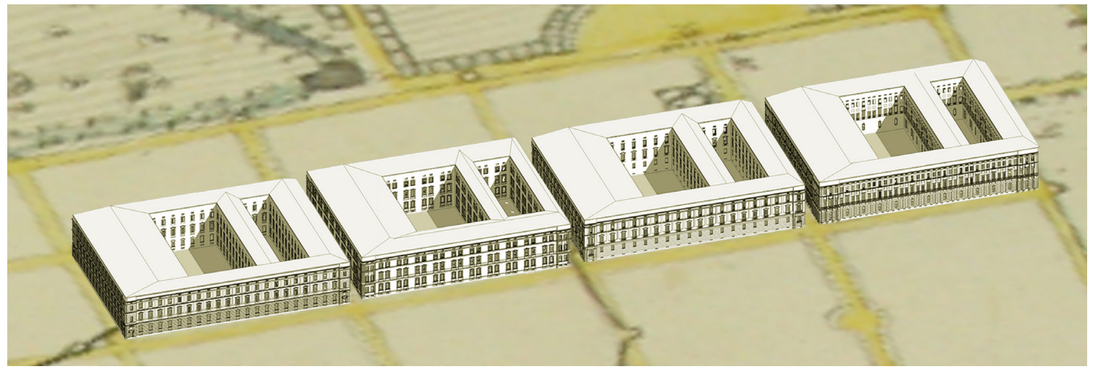


Fig. 7: Superimposition between carta 14 and HBIM models for Borgo Fiume (HBIM models, F. Farenga; image layout, E.C. Giovannini)

Fig. 7: Superimposition between carta 14 and HBIM models for Borgo Fiume (HBIM models, F. Farenga; Image layout, E.C. Giovannini)

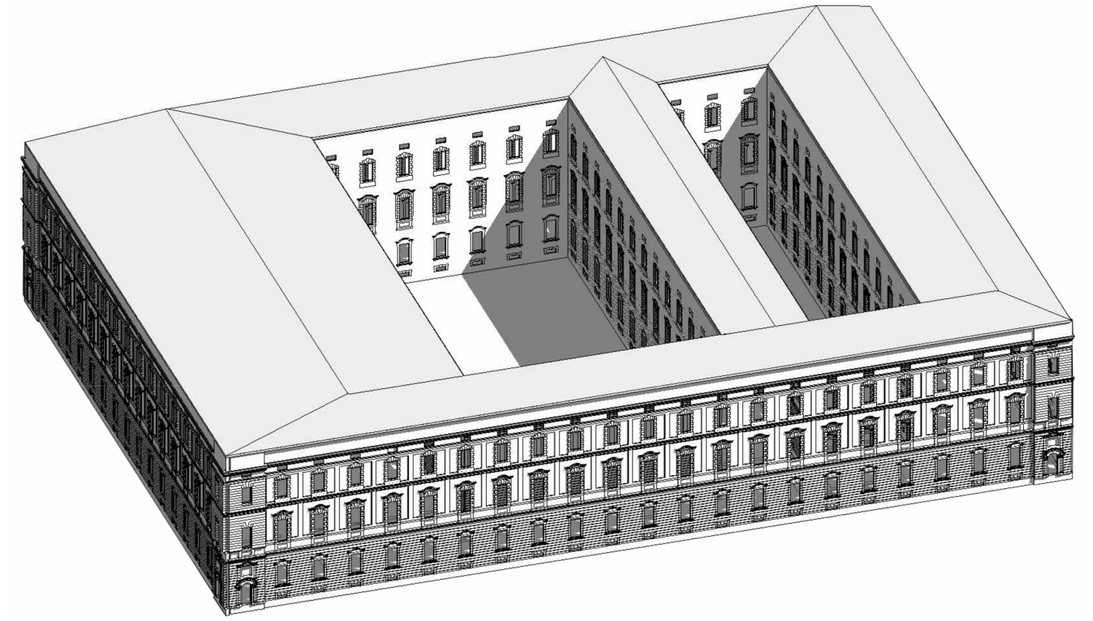


Fig. 8: Modello HBIM per la soluzione tipologica di un isolato di Borgo Fiume (F. Farenga).

Fig. 8: HBIM model for a typological solution for a Borgo Fiume building block (F. Farenga).

di attivare, archiviare e confrontare soluzioni alternative senza modificare la struttura di base del modello; il risultato non è un'unica ricostruzione definitiva, ma un archivio di possibilità.

La sperimentazione sul Borgo del Fiume, scelto come caso pilota, ha dimostrato l'efficacia di questo approccio. Il modello non chiude l'interpretazione, ma la rende interrogabile, aggiornabile e condivisibile. L'HBIM si configura quindi come un atlante dinamico delle possibilità progettuali implicite nel corpus documentario.

La ricerca dimostra che il patrimonio non costruito può essere analizzato e rappresentato efficacemente attraverso modelli digitali capaci di governare la complessità senza annullarla. In questo qua-

sent different configurations of the same typological system, all consistent with the compositional, dimensional and semantic rules drawn from the historical sources (Fig. 5).

Managing the variants makes it possible to keep the model's basic structure unchanged (levels, plan layout, parametric families), while activating, case by case, different solutions for the elevations and decorative apparatus (Fig. 6). This approach makes it possible to archive, compare and

dro, l'HBIM si conferma non come strumento deterministico, bensì come ambiente critico e adattivo, utile a esplicitare varianti, ipotesi e margini di incertezza.

La rappresentazione digitale non coincide con l'esito conclusivo di una ricostruzione, bensì con un processo aperto di organizzazione, verifica e simulazione. Applicato ai progetti utopici, questo approccio consente di trasformare l'ambiguità documentaria in una struttura conoscitiva e di costruire scenari multipli, fondati su regole esplicite e controllabili. Il patrimonio visionario diventa così un laboratorio per nuove pratiche di *digital heritage*, in cui rigore scientifico e flessibilità interpretativa possono convivere.

Il presente contributo è frutto di un lavoro congiunto di cui gli autori hanno condiviso l'impostazione metodologica. In particolare, F. Farenga è autore del paragrafo "Modellazione parametrica per il Borgo Fiume: un Atlante HBIM". E.C. Giovannini è autrice di "Introduzione". Entrambi gli autori hanno condiviso la stesura dei paragrafi "Analisi grafica e proporzionale: un approccio integrato per la ricostruzione storica" e "Conclusioni".

Bibliografia

Croci, G. (1860). *Dizionario universale dei pesi e delle misure in uso presso gli antichi e moderni con ragguaglio ai pesi e misure del sistema metrico*. https://doi.org/10.3931/e-rara-87994

Giovannini, E. C., & Foschi, R. (2025). Towards a methodology for the digitisation of unbuilt cities: From 'drawn' architecture to 3D landscape. In *Èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione / Èkphrasis. Descriptions in the space of representation: Proceedings of the 46th International Conference of Representation Disciplines Teachers* (pp. 1–14). FrancoAngeli.

Gori, M., & Savoia, D. (Eds.). (2005). *Mauro Guidi. Tra utopia e realtà (1761–1829)*. Brighi e Ventura.

Guidi, M. (1821). *Cesena nuova inventata e disegnata da me* [Manoscritto, Atlante 48]. Biblioteca Malatestiana, Cesena.

Pistocchi, M. A. (2010). *Vivere nelle forme pure. "Cesena nuova" e "Cesenatico nuovo": Ulteriori considerazioni su due progetti di Mauro Guidi*. Studi Romagnoli, 61, 109–133.

make explicit the interpretive alternatives without producing separate models, reinforcing the transparency of the reconstructive process and making the model interrogable as an atlas of possibilities rather than as a definitive outcome.

Four of these variants were applied to the Borgo Fiume area: four blocks identical in plan but radically different in façade (Fig. 7). The simulation shows how a single urban scheme can give rise to practically infinite combinations, just as suggested by Guidi's all-encompassing ambition.

Conclusions

Applying HBIM to heritage that was never built entails a significant methodological shift: in the absence of a physical reality to survey, the model does not derive from direct survey but from the critical interpretation of sources. The construction of the HBIM model becomes a critical and philological act, in which every morphological, proportional and constructive choice derives from a cross-reading of the textual and graphic sources and from an assessment of their reliability. In this sense, HBIM does not simply record what existed, but makes explicit what could have existed, transforming itself into an information environment oriented towards possibility.

Parametric modelling played a central role. The compositional rules derived from the analysis of plans and elevations were translated into parametric families capable of incorporating controlled variants. In this way, the work presented here adopts data transparency as a founding principle: every element of the model is conceived as carrying information that is not only geometric but also semantic and critical, making explicit both the relationship with the source and the possible alternatives.

Each elevation was configured as a coherent variant of one and the same system, making it possible to activate, archive and compare alternative solutions without modifying the model's basic structure; the result is not a single definitive reconstruction, but an archive of possibilities.

The experimentation carried out on Borgo Fiume, chosen as a pilot case, demonstrated the effectiveness of this approach. The model does not close down interpretation but makes it interrogable, updatable and shareable. HBIM thus configures itself as a dynamic atlas of the design possibilities implicit in the documentary corpus.

The research shows that unbuilt heritage can be effectively analysed and represented through digital models capable of governing complexity without eliminating it. Within this framework, HBIM is confirmed not as a deterministic tool but as a critical and adaptive environment, useful for making variants, hypotheses and margins of uncertainty explicit.

Digital representation does not coincide with the conclusive outcome of a reconstruction, but rather with an open process of organisation, verification and simulation. Applied to utopian projects, this approach makes it possible to transform documentary ambiguity into a cognitive structure and to construct multiple scenarios founded on explicit and controllable rules. Visionary heritage thus becomes a laboratory for new digital heritage practices, in which scientific rigour and interpretive flexibility can coexist.

This paper is the result of joint work, with both authors sharing the methodological approach. F. Farenga is the author of the section "Parametric Modelling for *Borgo Fiume*: an HBIM Atlas". E.C. Giovannini is the author of the "Conclusions". Both authors jointly wrote the "Introduction" and "Graphic and Proportional Analysis: an Integrated Approach to Historical Reconstruction" sections.

Autori

Alberto Sdegno[1]
Ferdinand Rexhaj[2]

Email

alberto.sdegno@uniud.it
ferdinand.rexhaj@uniud.it

[1] Università degli Studi di Udine, Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura
[2] Università degli Studi di Udine, Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura

Keywords

LE CORBUSIER
MAISON DES ARTISANS
BIM
RIZZI CAMPUS
ENERGY EVALUATION

Ricostruzione BIM della Maison des Artisans: caso di studio nel Campus Rizzi

BIM reconstruction of the Maison des Artisans: a case study at the Rizzi Campus

Abstract

Il contributo indaga la *Maison des Artisans* come scenario BIM sperimentale nel Campus Rizzi dell'Università di Udine. Il modello distingue contesto geometrico-parametrico e oggetto informativo, confrontando ipotesi materiali e indicatori energetici preliminari.

This paper investigates the *Maison des Artisans* as an experimental BIM scenario within the Rizzi Campus of the University of Udine. The model distinguishes between a geometric-parametric context and an information-rich BIM object, comparing material hypotheses and preliminary energy indicators.

Introduzione

La ricerca prende avvio da una condizione duplice: da un lato lo studio analitico della *Maison des Artisans* di Le Corbusier, progetto non realizzato del 1924, rimasto nel campo della documentazione grafica e della possibilità architettonica; dall'altro, l'indagine sul Polo scientifico dell'Università degli Studi di Udine, chiamato anche Campus Rizzi, costruito come frammento di una più ampia visione universitaria moderna. Il contributo non propone una ricostruzione filologica definitiva della *Maison*, né un *digital twin* prestazionale dell'intero Campus, ma sperimenta un ambiente BIM differenziato in cui il contesto reale e l'oggetto non costruito possano essere messi in relazione attraverso geometria, informazione, ipotesi materiali e verifica preliminare. In questa prospettiva il modello viene assunto come dispositivo critico, capace di rendere esplicita la distanza tra fonte documentaria, scelta interpretativa e scenario progettuale.

Stato dell'arte

Il contributo si colloca nel quadro delle ricerche sul *Building Information Modeling* applicato al costruito esistente, al patrimonio architettonico e alla simulazione preliminare. Gli studi sull'HBIM hanno mostrato come il passaggio dal rilievo o dalla documentazione storica al modello informativo consista nella costruzione di oggetti parametrici capaci di accogliere dati, attributi e relazioni [Murphy, McGovern, & Pavia, 2009; Logothetis, Delinasiou, & Stylianidis, 2015]. La letteratura sul BIM per gli edifici esistenti ha inoltre evidenziato la difficoltà di lavorare con documentazione incompleta, livelli informativi non omogenei e informazioni materiche o prestazionali non sempre verificabili [Volk, Stengel, & Schultmann, 2014]. Per questo motivo il caso presentato non viene interpretato come una modellazione totale, ma come una costruzione metodologica selettiva.Nel dibattito italiano della rappresentazione, le ricerche di Carlo Bianchini si sono concentrate soprattutto sulle dinamiche della modellazione, piuttosto che sul modello digitale in sé, cioè sul processo che guida la costruzione e l'arricchimento informativo dei singoli elementi digitali [Bianchini, 2023]. Tale prospettiva consente di considerare il BIM non come semplice restituzione, ma anche come metamodello: una struttura che ordina fonti, astrazioni e gradi di affidabilità. Inoltre, altri contributi hanno sottolineato che, nel costruito storico, il dato informativo non elimina l'interpretazione, ma la rende più evidente [Bianchini, Inglese, & Ippolito, 2016]. Su questo piano si innestano quindi, ulteriori approfondimenti che riconoscono nei modelli informativi non solo una base geometrica, ma un sistema capace di accogliere dati materiali, strutturali, diagnostici e comunicativi [Empler, Caldarone, & Calvano, 2019; Empler et al., 2022].

Il Campus Rizzi come contesto geometrico-parametrico

Il Campus Rizzi viene assunto come contesto architettonico e critico dell'esperimento. Il progetto è stato realizzato da Manfredi Nicoletti e Guido Gigli a seguito del concorso del 1982-83, la cui costruzione si è conclusa nel 1990. La scheda del Censimento delle architetture italiane dal 1945 ricorda che il progetto originario, modificato in corso d'opera, prevedeva quattro corti invece delle due oggi realizzate [Ministero della Cultura, n.d.]. Questa condizione rende il Campus un organismo costruito ma non del tutto coincidente con la propria intenzione iniziale; esso diviene quindi il luogo adatto per accogliere, in forma sperimentale, un'altra architettura rimasta non realizzata. Il modello del Campus è stato costruito in ambiente BIM utilizzando primitive grafiche parametriche di tipo architettonico (muri, solai, serramenti, coperture, ecc.). Esse consentono di controllare posizione, scala, orientamento, masse, corti, pieni e vuoti, ma non vengono assunte come descrizione certificata delle stratigrafie, dei materiali reali o delle prestazioni energetiche dell'edificio esistente. Il Campus Rizzi non è dunque trattato come *digital twin* in senso completo, ma come modello geometrico-parametrico di contesto, necessario a verificare l'inserimento della *Maison* in termini spaziali, percettivi e ambientali. Il confronto tra la planimetria di concorso e lo stato attuale è illustrato in Fig. 1.

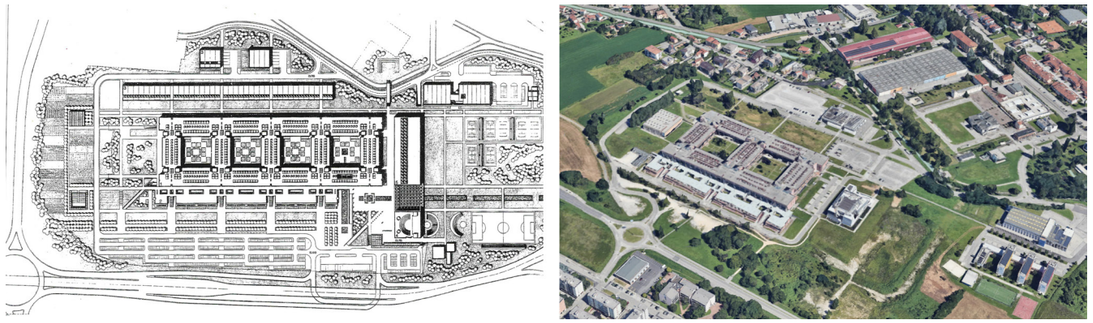


Fig. 1: Il Campus Rizzi come architettura parzialmente realizzata: confronto tra planimetria di concorso e veduta aerea dello stato attuale.

Fig. 1: The Rizzi Campus as a partially realized architecture: comparison between the competition site plan and an aerial view of the current condition.

La Maison des Artisans come oggetto BIM sperimentale

La *Maison des Artisans* viene ricostruita a partire dalla documentazione storica lecorbusieriana e dalla sua pubblicazione nell'*Oeuvre complète* 1910-1929 [Le Corbusier & Jeanneret, 1946]. Le Corbusier descrive il progetto come una casa-*atelier* in serie per artigiani, fondata sul problema dell'abitare e del lavorare in un grande spazio illuminato, con attenzione all'economia costruttiva e all'impiego di soluzioni leggere e isolanti. Questo dato impedisce di ridurre la *Maison* a un generico oggetto in calcestruzzo, come se ogni architettura di Le Corbusier dovesse essere letta esclusivamente attraverso la massa cementizia; al contrario, il progetto del 1924 appartiene a una ricerca sulla serialità, sulla luce, sulla sintesi spaziale e sulla possibilità di costruire con sistemi economici e razionali. La documentazione grafica di riferimento è riportata in Fig. 2.

Nel Campus Rizzi la *Maison* non viene riproposta come abitazione per artigiani, ma reinterpretata come piccolo spazio espositivo,

Introduction

The research starts from a dual condition: on the one hand, the analytical study of Le Corbusier's *Maison des Artisans*, an unbuilt project from 1924 that remained within the realm of graphic documentation and architectural possibility; on the other, the investigation of the University of Udine's scientific complex, also known as the Rizzi Campus, built as a fragment of a broader modern vision for the university. This paper does not propose a definitive philological reconstruction of the Maison, nor a performance-oriented digital twin of the entire Campus.

Instead, it experiments with a differentiated BIM environment in which the real context and the unbuilt object can be related through geometry, information, material hypotheses, and preliminary evaluation.

From this perspective, the model is treated as a critical device capable of making explicit the distance between documentary sources, interpretive choices, and design scenarios.

State of the Art

This contribution is situated within research on Building Information Modeling applied to existing buildings, architectural heritage, and preliminary simulation. HBIM studies have shown that the transition from survey data or historical documentation to an information model entails the construction of parametric objects capable of accommodating data, attributes, and relationships [Murphy, McGovern, & Pavia, 2009; Logothetis, Delinasiou, & Stylianidis, 2015]. The literature on BIM for existing buildings has also highlighted the difficulty of working with incomplete documentation, non-homogeneous information levels, and material or performance information that cannot always be verified [Volk, Stengel, & Schultmann, 2014].

For this reason, the case presented here is not interpreted as comprehensive modeling, but as a selective methodological construction.

Within the Italian discourse on architectural representation, Carlo Bianchini's research has focused primarily on the dynamics of modeling rather than on the digital model itself, that is, on the process that guides the construction and informational enrichment of individual digital elements [Bianchini, 2023].

This perspective makes it possible to consider BIM not merely as a form of restitution, but also as a metamodel: a structure that organizes sources, abstractions, and degrees of reliability. Other contributions have also emphasized that, in historic buildings, information does not eliminate interpretation but makes it more explicit [Bianchini, Inglese, & Ippolito, 2016].

Against this background, further studies recognize information models not only as geometric bases, but as systems capable of accommodating material, structural, diagnostic, and communication data [Empler, Caldarone, & Calvano, 2019; Empler et al., 2022].

The Rizzi Campus as a Geometric-Parametric Context

The Rizzi Campus is adopted as the architectural and critical context of the experiment. The project was developed by Manfredi Nicoletti and Guido Gigli following the 1982-83 competition, and construction was completed in 1990. The entry in the Census of Italian Architecture from 1945 to the Present notes that the original project, modified during construction, envisaged four courtyards instead of the two that were ultimately built [Ministero della Cultura, n.d.]. This condition makes the Campus a built organism that does not fully coincide with its initial intention; it there-

destinato a ospitare modelli, installazioni, materiali didattici e attività di divulgazione legate alla rappresentazione digitale dell'architettura. Questa trasformazione funzionale è dichiarata come passaggio metodologico: dal documento storico alla ricostruzione geometrica, dalla ricostruzione alla simulazione, dalla funzione originaria alla nuova funzione culturale. La riflessione sul padiglione come struttura controllata attraverso modelli parametrici e procedurali permette di collocare tale operazione in un campo di ricerca in cui il modello digitale governa forma, orientamento, articolazione costruttiva e possibilità di prototipazione [Valenti & El Khoury, 2021].

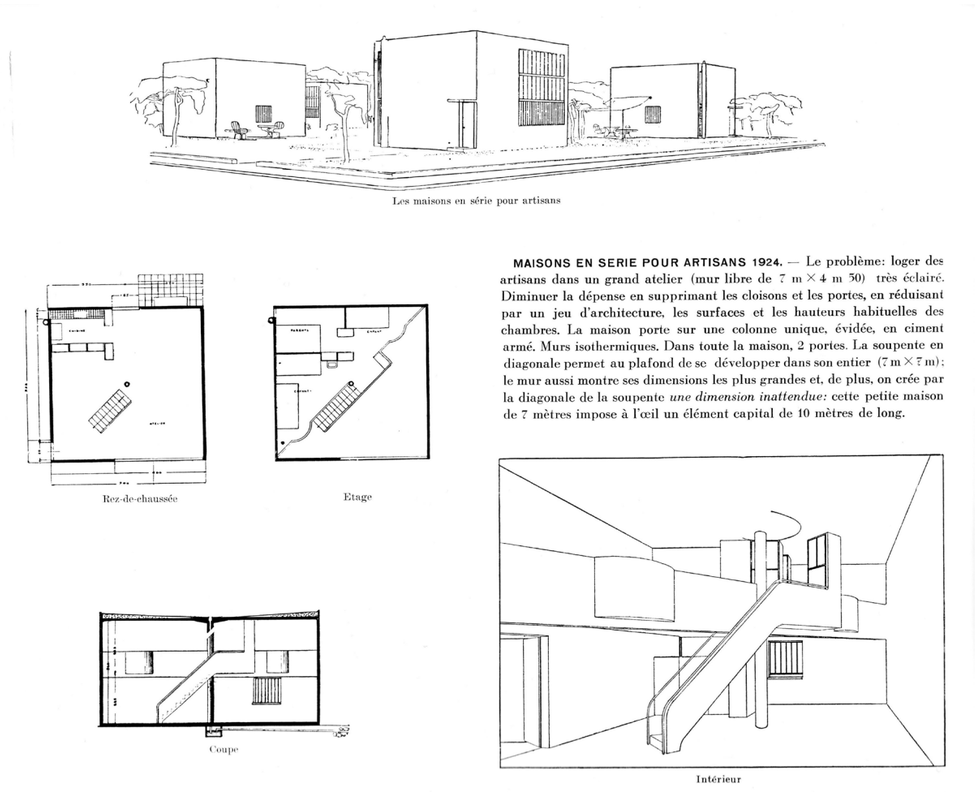


Fig. 2: Maison des Artisans: il progetto di Le Corbusier presentato nell'Oeuvre complète.

Fig. 2: Maison des Artisans: Le Corbusier's project as presented in the Oeuvre complète.

Metodologia operativa in un ambiente BIM differenziato

La metodologia si fonda sulla costruzione di un ambiente BIM differenziato. Il primo livello riguarda il Campus Rizzi, modellato come contesto geometrico-parametrico, con elementi generici utili alla comprensione delle masse e delle relazioni spaziali.

Il secondo livello riguarda il progetto di Le Corbusier, sviluppato come oggetto BIM sperimentale, nel quale gli elementi costruttivi principali vengono qualificati attraverso strutture composite, materiali e proprietà termiche generali. Il terzo livello riguarda la verifica, cioè la possibilità di estrarre quantità, superfici, volumi e prime indicazioni energetiche per confrontare scenari materiali.

Questa distinzione risponde ai principi di trasparenza richiamati dalla *London Charter*, secondo cui una visualizzazione computazionale del patrimonio deve chiarire se rappresenta uno stato esistente, una restituzione fondata su evidenze o una ricostruzione ipotetica, rendendo comprensibili anche la natura e l'estensione dell'incertezza [Denard, 2009].

Nel presente contributo la trasparenza non è affidata a una pretesa di completezza, ma alla dichiarazione dei livelli: il Campus è un contesto parametrico non certificato dal punto di vista materico, mentre la *Maison* è un oggetto informativo sperimentale; gli scenari costruttivi sono quindi ipotesi comparative, non verità storiche.

Livello	Modello	Informazione	Funzione
1	Campus Rizzi	Geometria e parametri generici	Contesto spaziale e ambientale
2	Maison des Artisans	Stratigrafie e proprietà generali	Oggetto BIM sperimentale

Tab. 1: Segmentazione dell'attività per i livelli di indagine.

Level	Model	Information	Function
1	Rizzi Campus	Geometry and generic parameters	Spatial and environmental context
2	Maison des Artisans	Assemblies and general properties	Experimental BIM object
3	Energy Evaluation	Preliminary indicators	Comparison of material scenarios

Tab. 1: Segmentation of the workflow by level of investigation.

Energy Evaluation come strumento preliminare

L'uso dello strumento *Energy Evaluation* in ambiente Archicad consente di sviluppare analisi in ambito BIM come supporto alle decisioni ambientali e prestazionali nelle prime fasi del progetto. La letteratura sul *sustainable design* e sul Green BIM ha evidenziato come il modello informativo possa anticipare il confronto tra alternative formali, materiche ed energetiche, soprattutto quando le scelte sono ancora modificabili [Azhar, Carlton, Olsen, & Ahmad, 2011; Wong & Zhou, 2015; Lu, Wu, Chang, & Li, 2017]. Le ricerche sul passaggio da BIM a *Building Energy Modeling* hanno però chiarito che la qualità della simulazione dipende dalla completezza dei dati disponibili, dalla correttezza geometrica, dalle proprietà termiche, dai sistemi impiantistici e dai dettagli costruttivi [Gao, Koch, & Wu, 2019].

Per tale ragione, in questo studio lo strumento di valutazione non viene utilizzato come procedura di certificazione energetica, né come verifica esecutiva dell'edificio. Esso viene impiegato come strumento preliminare di orientamento progettuale, capace di trasfore becomes a suitable place in which to accommodate, experimentally, another architecture that remained unbuilt.

The Campus model was constructed in a BIM environment using architectural parametric graphic primitives, including walls, slabs, openings, and roofs. These elements allow control over position, scale, orientation, masses, courtyards, solids, and voids, but they are not assumed to provide a certified description of the assemblies, actual materials, or energy performance of the existing building.

The Rizzi Campus is therefore not treated as a complete digital twin, but as a geometric-parametric contextual model required to evaluate the insertion of the *Maison* in spatial, perceptual, and environmental terms. The comparison between the competition site plan and the current condition is illustrated in Fig. 1.

The Maison des Artisans as an Experimental BIM Object

The *Maison des Artisans* is reconstructed from Le Corbusier's historical documentation and its publication in *Oeuvre complète* 1910-1929 [Le Corbusier & Jeanneret, 1946]. Le Corbusier describes the project as a serial house-workshop for artisans, centered on the problem of living and working in a large, well-lit space, with attention to construction economy and the use of lightweight, insulating solutions. This evidence prevents the *Maison* from being reduced to a generic concrete object, as if every work by Le Corbusier had to be read exclusively through concrete mass. On the contrary, the 1924 project belongs to a line of research concerned with seriality, light, spatial synthesis, and the possibility of building with economical and rational systems. The reference graphic documentation is shown in Fig. 2.

Within the Rizzi Campus, the *Maison* is not proposed again as housing for artisans but is reinterpreted as a small exhibition space intended to host models, installations, teaching materials, and dissemination activities related to the digital representation of architecture. This functional transformation is explicitly framed as a methodological transition: from the historical document to geometric reconstruction, from reconstruction to simulation, and from the original function to a new cultural function. The reflection on the pavilion as a structure controlled through parametric and procedural models places this operation within a research field in which the digital model governs form, orientation, construction articulation, and prototyping possibilities [Valenti & El Khoury, 2021].

Operational Methodology in a Differentiated BIM Environment

The methodology is based on the construction of a differentiated BIMw environment. The first level concerns the Rizzi Campus, modeled as a geometric-para-

formare volumi, superfici e strutture generali in indicatori comparativi. In questo caso il passaggio dalla geometria al dato prestazionale avviene quando agli elementi principali, come muri, solai, coperture e serramenti, vengono associate strutture composite, materiali e proprietà fisiche. La documentazione tecnica indica che l'*Energy Evaluation* può costruire un *Building Energy Model* a partire dal modello BIM e può utilizzare proprietà quali conducibilità termica, densità, capacità termica, energia incorporata e carbonio incorporato. Nel presente contributo tali possibilità vengono adottate in forma schematica: le pareti della *Maison* ricevono valori generali e uniformi relativi alle proprietà termiche e alla termica e alla trasmittanza, senza definire ogni strato e senza pretendere una corrispondenza esecutiva con un sistema costruttivo reale.

L'assenza di nodi costruttivi modellati nel dettaglio non è quindi un difetto occulto, ma una delimitazione dichiarata. Il modello non comprende attacchi a terra, connessioni puntuali tra pareti e solai, ponti termici, tagli termici dei serramenti o dettagli di giunzione tra struttura e involucro. La valutazione energetica è pertanto letta come indicazione di scenario, utile nella fase iniziale per comprendere l'ordine di grandezza del possibile dispendio energetico e per confrontare due ipotesi materiali: una soluzione massiva, riferita criticamente all'immaginario del calcestruzzo lecorbusieriano, e una soluzione leggera, più coerente con la trasformazione della *Maison* in padiglione espositivo reversibile. Le principali fasi di impostazione, verifica e restituzione dell'Energy Evaluation sono illustrate nelle Figg. 3-5.

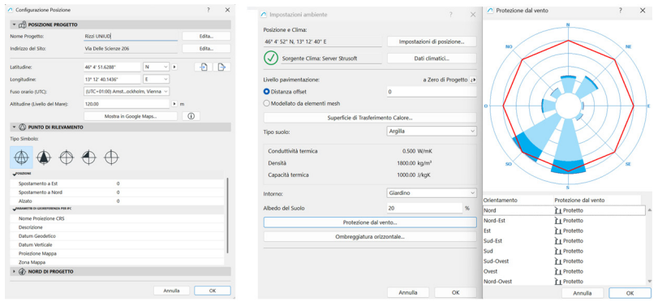


Fig. 3: Archicad Energy Evaluation: impostazione preliminare dei dati ambientali e del modello energetico.

Fig. 3: Archicad Energy Evaluation: preliminary setup of environmental data and the energy model.

Simulazione dell'uso dei materiali: calcestruzzo e legno

Il confronto tra una *Maison* massiva e una *Maison* leggera non pretende di stabilire come l'edificio sarebbe stato costruito nel 1924. Esso serve piuttosto a verificare come un progetto moderno non realizzato possa diventare, oggi, un caso di valutazione preliminare all'interno di un ambiente BIM. Lo scenario in calcestruzzo assume la massa come termine critico di confronto: richiama una componente essenziale dell'immaginario moderno e permette di

metric context using generic elements that support the understanding of masses and spatial relationships. The second level concerns Le Corbusier's project, developed as an experimental BIM object in which the main construction elements are characterized through composite structures, materials, and general thermal properties. The third level concerns verification, namely the possibility of extracting quantities, areas, volumes, and preliminary energy indications in order to compare material scenarios.

This distinction responds to the transparency principles set out in the London Charter, according to which a computational visualization of heritage should clarify whether it represents an existing condition, an evidence-based restitution, or a hypothetical reconstruction, while also

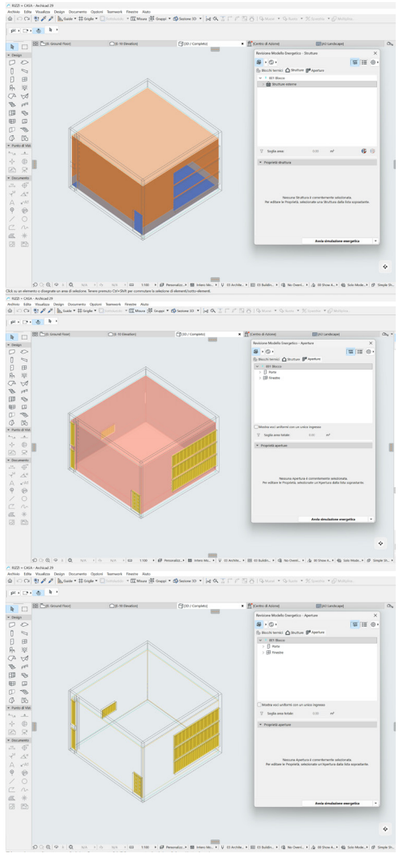


Fig. 4: Archicad Energy Evaluation: visualizzazione e verifica del modello energetico derivato dal modello BIM.

Fig. 4: Archicad Energy Evaluation: visualization and verification of the energy model derived from the BIM model.

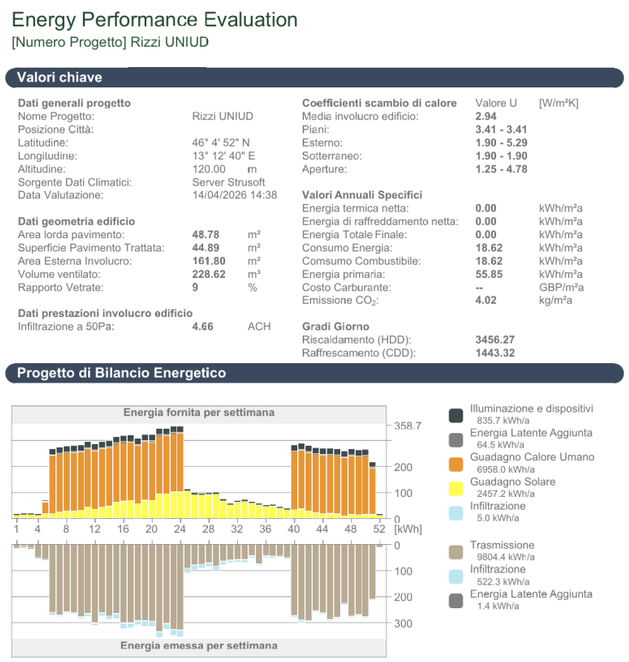


Fig. 5: Forma, dati e materia: attribuzione di proprietà generali agli elementi costruttivi della Maison.

Fig. 5: Form, data, and materiality: assignment of general properties to the construction elements of the Maison.

interrogare peso, inerzia e comportamento energetico di un volume compatto inserito in una corte esistente. Lo scenario leggero, che si basa sull'impiego di una struttura in legno o di sistemi a secco, assume invece una logica di reversibilità, riduzione del peso, semplicità di montaggio e compatibilità con la funzione espositiva per quanto concerne i criteri progettuali. In entrambi i casi il modello non sostituisce il lavoro specialistico di un consulente energetico né lo sviluppo di un progetto esecutivo. Il suo valore è propriamente architettonico: consente di avere, in una fase iniziale, numeri e indicatori che orientano il giudizio progettuale. Superfici disperdenti, volumi, quantità indicative di murature, stratigrafie generali e prime valutazioni energetiche permettono all'architetto di comprendere se un'ipotesi formale è compatibile con il contesto, con la funzione prevista e con un possibile equilibrio ambientale. L'inserimento della Maison nel cortile del Campus Rizzi è illustrato in Fig. 6.

Scenario	Materialità	Uso	Limite
A	Calcestruzzo / massa	Termine critico di confronto	Indicativo

Tab. 2: Comparazione dei materiali.

Scenario	Materiality	Purpose	Limitation
A	Concrete / mass	Critical term of comparison	Indicative

Tab. 2: Comparison of material scenarios.

making the nature and extent of uncertainty understandable [Denard, 2009]. In this paper, transparency is not entrusted to a claim of completeness, but to the explicit declaration of levels: the Campus is a parametric context that is not materially certified, whereas the *Maison* is an experimental BIM object whose construction scenarios are comparative hypotheses rather than historical truths.

Energy Evaluation as a Preliminary Tool

The use of the Energy Evaluation tool in Archicad makes it possible to carry out BIM-based analyses in support of environmental and performance-related decisions during the early stages of design. The literature on sustainable design and Green BIM has shown how the information model can enable early comparison among formal, material, and energy alternatives, especially when design choices are still open to modification [Azhar, Carlton, Olsen, & Ahmad, 2011; Wong & Zhou, 2015; Lu, Wu, Chang, & Li, 2017]. Research on the transition from BIM to Building Energy Modeling has also clarified that simulation quality depends on the completeness of available data, geometric accuracy, thermal properties, building systems, and construction details [Gao, Koch, & Wu, 2019].

For this reason, the evaluation tool is not used in this study as an energy-certification procedure or as an detailed-design verification of the building. Instead, it is employed as a preliminary design-support tool capable of transforming volumes, surfaces, and general assemblies into comparative indicators. The transition from geometry to performance data occurs when composite structures, materials, and physical properties are assigned to the main elements, such as walls, slabs, roofs, and openings. Technical documentation indicates that Energy Evaluation can generate a Building Energy Model from the BIM model and can use properties such as thermal conductivity, density, heat capacity, embodied energy, and embodied carbon. In this paper these possibilities are adopted schematically: the walls of the *Maison* are assigned general and uniform thermal-performance and transmittance values, without

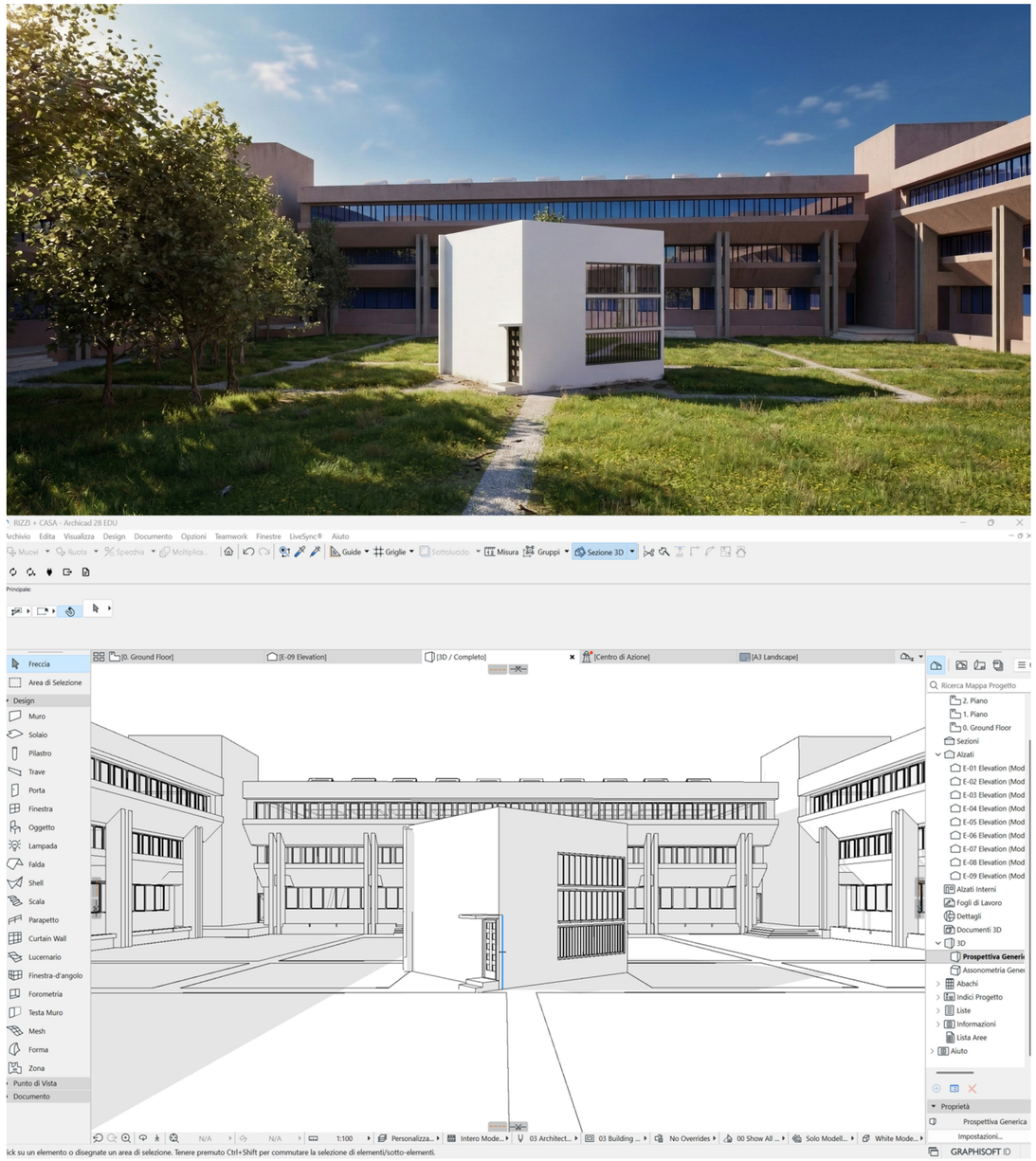


Fig. 6: Inserimento della Maison nel cortile del Campus Rizzi: render e modello BIM in Archicad.

Fig. 6: Insertion of the Maison into the Rizzi Campus courtyard: rendering and BIM model in Archicad.

Modello fisico e stampa 3D

Un ulteriore strumento di controllo progettuale è costituito dato dalle procedure di prototipazione rapida e stampa 3D. Non si tratta, in questo caso, di produrre un semplice oggetto dimostrativo, ma di riportare la forma nello spazio della percezione, della mano e della scala. La letteratura sulla *digital fabrication* in architettura ha mostrato come il prototipo fisico possa entrare nel processo progettuale non solo come esito finale, ma come strumento di verifica della misura, della sezione, della continuità volumetrica e dell'assemblaggio [Lee, 2015]. Tale funzione è coerente anche con altre ricerche sul rapporto tra HBIM, ICT, comunicazione e valorizzazione, nelle quali il modello informativo può essere declinato in dispositivi multimediali rivolti agli operatori tecnici e alla fruizione culturale [Empler et al., 2022].

Nel caso della *Maison*, il modello fisico consente di controllare aspetti che nell'immagine di *rendering* possono risultare eccessivamente astratti: la lettura della sezione, la percezione dello spazio interno, la chiarezza del percorso, la relazione tra il volume compatto e l'invaso del cortile. La stampa 3D chiude quindi un ciclo: dalla fonte grafica al modello BIM, dal BIM alla simulazione preliminare, dalla simulazione alla materializzazione, dalla materializzazione a una nuova verifica percettiva. Le verifiche percettive e fisiche sono documentate rispettivamente nelle Figg. 7 - 8.

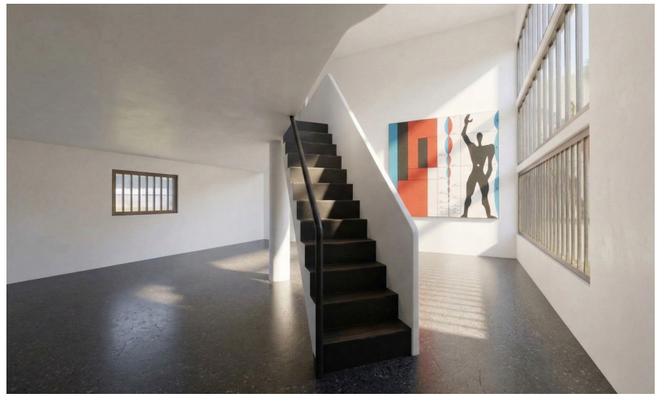


Fig. 7: Verifica percettiva con la simulazione dello spazio espositivo interno.

Fig. 7: Perceptual verification through simulation of the interior exhibition space.

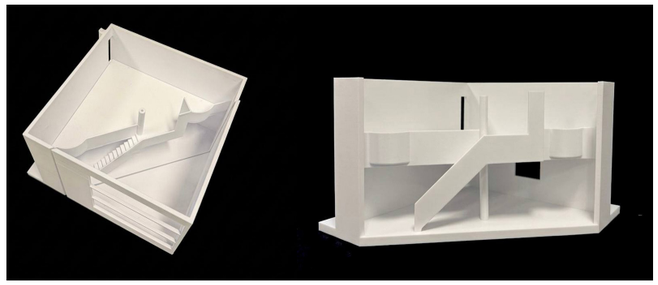


Fig. 8: Stampa 3D della Maison come strumento interpretativo e verifica fisica della sezione.

Fig. 8: 3D print of the Maison as an interpretive tool and physical verification of the section.

defining every layer and without claiming direct correspondence with a fully specified construction system.

The absence of construction junctions modeled in detail is therefore not a hidden deficiency, but an explicitly declared limitation. The model does not include ground connections, local wall-to-slab connections, thermal bridges, thermal breaks in window frames, or detailed joints between structure and envelope. The energy assessment is therefore read as a scenario-based indication, useful in the initial phase for understanding the order of magnitude of potential energy use and for comparing two material hypotheses: a massive solution used as a critical reference to the Le Corbusian imaginary of concrete, and a lightweight solution more consistent with the transformation of the *Maison* into a reversible exhibition pavilion. The main stages of setup, verification, and output of the Energy Evaluation are illustrated in Figg. 3-5.

Simulation of Material Use: Concrete and Timber

The comparison between a massive *Maison* and a lightweight *Maison* does not seek to establish how the building would have been constructed in 1924. Rather, it is intended to test how an unbuilt modern project can become, today, a case of preliminary assessment within a BIM environment. The concrete scenario adopts mass as a critical term of comparison: it recalls an essential component of the modern architectural imaginary and makes it possible to examine the weight, inertia, and energy behavior of a compact volume inserted into an existing courtyard. The lightweight scenario, based on a timber structure or dry construction systems, instead adopts a logic of reversibility, weight reduction, ease of assembly, and compatibility with the exhibition function in terms of design criteria.

In both cases, the model does not replace the specialist work of an energy consultant or the development of a detailed design. Its value is specifically architectural: at an early stage, it provides figures and indicators that can guide design judgment. Heat-loss surfaces, volumes, indicative wall quantities, general assemblies, and preliminary energy assessments allow the

Risultati

Il principale risultato del lavoro non consiste nella produzione di un modello completo, ma nella definizione di una procedura capace di distinguere livelli informativi e finalità diverse. Il Campus Rizzi, modellato in ambiente BIM con elementi parametrici generici, funziona come campo spaziale e ambientale dell'esperimento; la *Maison des Artisans*, ricostruita come oggetto BIM, diviene invece il nucleo su cui applicare ipotesi materiali, scenari energetici preliminari e verifiche quantitative. Il confronto tra i due sistemi rende visibile una frizione produttiva: da un lato la griglia e la massa del campus moderno, dall'altro il piccolo volume autonomo di una casa-*atelier* trasformata in padiglione espositivo.

Il limite metodologico è parte del risultato. Le analisi energetiche non includono nodi costruttivi, impianti dettagliati o stratigrafie certificate; i valori ottenuti non devono quindi essere letti come prestazioni definitive, ma come dati di orientamento. Proprio questa delimitazione rende il metodo più corretto: invece di mascherare l'incertezza con una simulazione apparentemente esatta, questo studio dichiara il livello di approssimazione e lo usa come strumento di confronto.

Conclusioni

Il contributo dimostra come il BIM possa essere utilizzato non soltanto per rappresentare un edificio storico o moderno, ma per costruire uno scenario critico in cui forma, memoria, materia e prestazione vengono messi in relazione. La *Maison des Artisans* non viene congelata come oggetto del passato, né tradotta in una ricostruzione arbitraria; viene invece trasformata in un dispositivo sperimentale che permette di interrogare il rapporto tra un progetto non costruito e un campus reale, tra una funzione originaria e una funzione contemporanea, tra un'ipotesi massiva e una soluzione leggera.

La ricerca propone dunque un ambiente ibrido, geometrico-parametrico per il contesto e informativo-sperimentale per l'oggetto, nel quale lo strumento dell'*Energy Evaluation* è impiegato in chiave preliminare e comparativa, non come una certificazione oggettiva. Tale impostazione consente di trasformare una criticità, cioè l'assenza di dati esecutivi e nodi costruttivi, in una condizione metodologica dichiarata. Il BIM non viene usato per simulare una certezza, ma per aprire un campo di decisioni verificabili, in cui l'architettura può essere valutata già nella fase ideativa attraverso quantità, scenari materiali e modelli fisici.

Bibliografia

Azhar, S., Carlton, W. A., Olsen, D., & Ahmad, I. (2011). Building information modeling for sustainable design and LEED rating analysis. In *Automation in Construction*, 20 (2), pp. 217-224. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.019

Bianchini, C. (2023). Metamodellazione / Metamodelling. In *Disegnare Idee Immagini*, n. 66, pp. 80-95. https://doi.org/10.61020/11239247-202366-08

architect to understand whether a formal hypothesis is compatible with the context, the intended function, and a possible environmental balance. The insertion of the Maison into the Rizzi Campus courtyard is illustrated in Fig. 6.

Physical Model and 3D Printing

Rapid prototyping and 3D-printing procedures provide an additional means of design control. In this case, the aim is not simply to produce a demonstrative object, but to bring form back into the realm of perception, touch, and scale. The literature on digital fabrication in architecture has shown how the physical prototype can enter the design process not only as a final outcome, but as a tool for verifying dimensions, section, volumetric continuity, and assembly [Lee, 2015]. This function is also consistent with other research on the relationship among HBIM, ICT, communication, and cultural valorization, where the information model can be translated into multimedia devices intended both for technical operators and for cultural use [Empler et al., 2022].

In the case of the Maison, the physical model makes it possible to verify aspects that can remain overly abstract in rendered images: the reading of the section, the perception of interior space, the clarity of circulation, and the relationship between the compact volume and the spatial void of the courtyard. 3D printing therefore closes a cycle: from the graphic source to the BIM model, from BIM to preliminary simulation, from simulation to materialization, and from materialization to a new perceptual verification. The perceptual and physical verifications are documented respectively in Figg. 7 - 8.

Results

The main result of the work does not lie in the production of a complete model, but in the definition of a procedure capable of distinguishing different information levels and purposes. The Rizzi Campus, modeled in a BIM environment with generic parametric elements, acts as the spatial and environmental field of the experiment;

Bianchini, C., Inglese, C., & Ippolito, A. (2016). Il contributo della Rappresentazione nel Building Information Modeling (BIM) per la gestione del costruito / The role of BIM for representation and managing of built and historic artifacts. In *DisegnareCon*, 9 (16), pp. 10.1-10.9.

Denard, H. (Ed.). (2009). *The London Charter for the Computer-based Visualisation of Cultural Heritage*. https://www.londoncharter.org

Empler, T., Caldarone, A., & Calvano, M. (2019). L'ARIM per la prevenzione del rischio sismico / ARIM for the prevention of seismic risk. In *Disegnare Idee Immagini*, n. 59, pp. 70-81.

Empler, T., Quici, F., Caldarone, A., D'Angelo, E., Fusinetti, A., & Rossi, M. L. (2022). HBIM e ICT. Il BIM per la valorizzazione della Fortezza Pisana di Marciana. In C. Battini & E. Bistagnino (Eds.), *Dialoghi / Dialogues: Visioni e visualità / Visions and visuality*, pp. 2374-2393. Milano: FrancoAngeli.

Gao, H., Koch, C., & Wu, Y. (2019). Building information modelling based building energy modelling: A review. In *Applied Energy*, n. 238, pp. 320-343. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.032

Graphisoft. (n.d.). *Archicad Energy Evaluation: Structure Property Settings and material properties*. Graphisoft Help Center. https://helpcenter.graphisoft.com/user-guide/128836/

Le Corbusier, & Jeanneret, P. (1946). *Oeuvre complete 1910-1929*. Zürich: Les Editions d'Architecture.

Lee, Y. (2015). Virtual to Physical: Integration of Design Computing and Digital Fabrication in Architectural Pedagogy. In *Architectural Research*, n. 17, pp. 21-30. https://doi.org/10.5659/AIKAR.2015.17.1.21

Logothetis, S., Delinasiou, A., & Stylianidis, E. (2015). Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W3, pp. 177-183. https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015

Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., & Li, Y. (2017). Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. In *Automation in Construction*, n. 83, pp. 134-148. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.024

Ministero della Cultura. (n.d.). Campus universitario, Udine, località Rizzi. Censimento delle architetture italiane dal 1945 ad oggi. https://censimentoarchitetturecontemporanee.cultura.gov.it/scheda-opera?id=5447

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic Building Information Modelling (HBIM). In *Structural Survey*, 27 (4), pp. 311-327. https://doi.org/10.1108/02630800910985108

Valenti, G. M., & El Khoury, C. (2021). Let's Join: A Pavilion Inspired by the Weaire and Phelan Space Tessellation. In *Nexus Network*

the *Maison des Artisans*, reconstructed as a BIM object, instead becomes the core to which material hypotheses, preliminary energy scenarios, and quantitative checks are applied. The comparison between the two systems reveals a productive friction: on one side, the grid and mass of the modern campus; on the other, the small autonomous volume of a house-workshop transformed into an exhibition pavilion.

The methodological limitation is itself part of the result. The energy analyses do not include detailed construction junctions, building systems, or certified assemblies; the values obtained should therefore not be read as definitive performance figures, but as orientation data. This explicit delimitation makes the method more rigorous: rather than masking uncertainty with an apparently exact simulation, the study declares its level of approximation and uses it as a comparative instrument.

Conclusions

This paper demonstrates how BIM can be used not only to represent a historic or modern building, but also to construct a critical scenario in which form, memory, materiality, and performance are brought into relation. The *Maison des Artisans* is neither frozen as an object of the past nor translated into an arbitrary reconstruction; instead, it is transformed into an experimental device that makes it possible to interrogate the relationship between an unbuilt project and a real campus, between an original function and a contemporary function, and between a massive hypothesis and a lightweight solution.

The research therefore proposes a hybrid environment: geometric-parametric for the context and information-rich and experimental for the object. Within this framework, the Energy Evaluation tool is used in a preliminary and comparative manner, not as an objective certification procedure. This approach makes it possible to transform a critical issue, namely the absence of detailed-design data and detailed construction junctions, into an explicitly declared methodological condition. BIM is not used to simulate certainty, but to open a field of verifiable decisions in which architecture can already be assessed during the conceptual phase through quantities, material scenarios, and physical models.

Journal, n. 23, pp. 107-120. https://doi.org/10.1007/s00004-020-00544-7

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. In *Automation in Construction*, n. 38, pp. 109-127. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023

Wong, J. K. W., & Zhou, J. (2015). Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. In *Automation in Construction*, n. 57, pp. 156-165. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003

Autori

Riccardo Tavolare[1]
Giovanni Mongiello[2]
Cesare Verdoscia[3]

[1] Dicatech, Politecnico di Bari, Bari, Italy
[2] Dicatech, Politecnico di Bari, Bari, Italy
[3] Dicatech, Politecnico di Bari, Bari, Italy

Email

riccardo.tavolare@poliba.it
giovanni.mongiello@poliba.it
cesare.verdoscia@poliba.it

Keywords

DIGITAL SURVEY
SCAN-TO-BIM
NERF
GAUSSIAN SPLATTING
PHOTOGRAMMETRY

Beyond the Point Cloud. A Multi-Level Assessment of NeRF, Gaussian Splatting, LiDAR and SfM

Beyond the Point Cloud. A Multi-Level Assessment of NeRF, Gaussian Splatting, LiDAR and SfM

Abstract

La ricerca propone un Multi-Level Assessment Framework (MLAF) per confrontare LiDAR, fotogrammetria, NeRF e Gaussian Splatting nei flussi HBIM. La sperimentazione vuole valutare l'affidabilità geometrica, la coerenza radiometrica e leggibilità semantica, attraverso l'utilizzo di indici computazionali analitici, evidenziando i limiti delle tecniche considerate in una prospettiva di implementazione BIM. La sperimentazione è condotta sulla Badia di San Lorenzo a Casamassima (BA).

The research proposes a Multi-Level Assessment Framework (MLAF) for comparing LiDAR, photogrammetry, NeRF, and Gaussian Splatting within HBIM workflows. The experiment aims to assess geometric reliability, radiometric consistency, and semantic legibility through the use of analytical computational indices, highlighting the limitations of the techniques considered from the perspective of BIM implementation. The case study is the Abbey of San Lorenzo in Casamassima, Bari, Italy.

Introduzione

Nei flussi di lavoro HBIM, la nuvola di punti non può essere considerata una mera raccolta di coordinate tridimensionali. Essa rappresenta l'interfaccia cognitiva primaria attraverso cui la forma architettonica viene interpretata, analizzata e tradotta in modelli informativi strutturati, in accordo con gli studi di Banfi sul ruolo semantico e informativo del processo Scan-to-BIM [Banfi, 2020]. In tale paradigma, la qualità del dato non può essere valutata esclusivamente in termini di accuratezza metrica, ma deve essere considerata in relazione alla sua capacità di supportare livelli coerenti di rappresentazione (LOG, LOA e LOI), sostenendo la modellazione e la rappresentazione del costruito storico [Brumana et al., 2018]. Negli ultimi anni, tra i metodi di generazione di nuvole di punti si sono evidenziate due tecniche emergenti: *Neural Radiance Fields* (NeRF) [Mildenhall et al., 2022] e il Gaussian Splatting (GS) [Kerbl et al., 2023]. Tali metodi, originariamente sviluppati per la sintesi di nuove viste in *computer vision*, sono stati rapidamente sperimentati nel campo della documentazione del patrimonio [Croce et al., 2023; Mazzacca et al., 2023; Murtiyoso & Grussenmeyer, 2023], evidenziando la loro potenzialità rappresentativa, mostrando ricostruzioni visivamente convincenti a partire da set limitati di immagini, con elevata ricchezza radiometrica e tempi di acquisizione contenuti rispetto a metodi tradizionali come *laser scanning* terrestre (TLS).

Per essere integrate nei flussi HBIM, tali tecniche devono essere sottoposte a un processo di conversione che introduce mediazioni algoritmiche significative [Clini et al., 2024], attraverso vari parametri operativi, quali numero di iterazioni, fattori di *downscale* e strategie di filtraggio, che incidono sulla qualità della nuvola di punti generata, sul rumore geometrico e sulla coerenza locale della ricostruzione tridimensionale [Atik, 2025]. La letteratura recente ha iniziato a documentare tali limiti evidenziando come NeRF e *Gaussian Splatting* presentino ancora criticità nella ricostruzione geometrica e nella definizione dei dettagli, con effetti di rumore, granularità e inaccuratezze in condizioni di acquisizione complesse [Basso et al., 2024; Maté-González et al., 2025]. Le analisi svolte da queste ricerche, tuttavia, si concentrano prevalentemente sull'analisi dell'errore metrico globale (*Root Mean Square Error*, RMSE), non considerando altri parametri qualitativi che possono risultare altrettanto importanti e critici per i flussi HBIM.

Il contributo di questa ricerca, tramite l'adozione del *framework* denominato *Multi-Level Assessment Framework* (MLAF), vuole da un lato estendere la valutazione delle metodologie di acquisizione oltre la dimensione puramente metrica, integrando indicatori di stabilità interna del dato con indicatori di compatibilità con la modellazione parametrica (rilevabilità degli spigoli, *fitting* delle primitive); dall'altro, lo studio vuole esplicitare come il passaggio dalla rappresentazione implicita a quella geometrica discreta, possa costituire un campo applicativo utile nel contesto ScanToBIM.

Stato dell'arte

Negli ultimi anni, il rilievo del patrimonio architettonico ha fondato i propri flussi di lavoro sull'integrazione tra *laser scanning* terrestre (TLS) e fotogrammetria digitale. La complementarità tra le due tecniche è ormai consolidata: il TLS fornisce il riferimento metrico, la fotogrammetria arricchisce il dato con la coerenza cromatica e la copertura di aree difficilmente raggiungibili da terra [Alshawabkeh & Baik, 2023; Banfi, 2020]. L'introduzione dei *Neural Radiance Fields* (NeRF) ha aperto un nuovo paradigma nella rappresentazione tridimensionale, codificando la scena come funzione che associa a ciascuna coordinata spaziale e direzione di osservazione valori di densità e colore. Poiché la rappresentazione risultante è di natura volumetrica e implicita, l'estrazione di una nuvola di punti richiede procedure di conversione basate su campionamento volumetrico e algoritmi di *surface extraction* come *marching cubes* [Croce et al., 2023]. Il *Gaussian Splatting* (GS), invece, rappresenta un significativo avanzamento metodologico rappresentativo, riuscendo a modellare una scena come un insieme di gaussiane 3D anisotrope, ciascuna descritta da posizione, covarianza, opacità e coefficienti di armoniche sferiche per la modellazione del colore dipendente dalla direzione di osservazione. Diversamente dai NeRF, GS adotta una rappresentazione esplicita, consentendo *rendering* in tempo reale e tempi di addestramento significativamente ridotti [Chen & Wang, 2026]. Gli studi comparativi più recenti hanno iniziato a sistematizzare il confronto tra tecniche tradizionali e nuovi approcci basati su *radiance fields* neurali. In questo contesto, [Clini et al., 2024] hanno confrontato SfM, NeRF e GSIe evidenziando come ultime due garantiscano tempi di elaborazione significativamente inferiori rispetto ai *workflow* SfM, pur presentando alcune criticità nella ricostruzione geometrica. Analogamente, [Atik, 2025] ha proposto una valutazione comparativa tra algoritmi GS evidenziando come questa tecnologia rappresenti una soluzione promettente per scene complesse, pur introducendo problematiche legate ai requisiti computazionali e al compromesso tra accuratezza e velocità di elaborazione. Nel settore della documentazione del patrimonio culturale, [Basso et al., 2024] hanno confrontato NeRF e GS sia in termini di qualità visuale, sia di efficienza computazionale, sottolineando come GS consenta rendering più realistici, una migliore gestione di texture, illuminazione e profondità della scena rispetto ai modelli NeRF tradizionali, evidenziandone il potenziale per applicazioni immersive e di valorizzazione del Cultural Heritage. Parallelamente, [Murtiyoso & Grussenmeyer, 2023] hanno investigato l'impiego di NeRF per la ricostruzione tridimensionale di beni culturali, confrontandolo con pipeline SfM e mostrando come NeRF consenta una generazione estremamente rapida delle scene e livelli soddisfacenti di completezza delle point cloud, pur considerando una significativa presenza di rumore geometrico ed una precisione insufficiente per applicazioni di documentazione metrica ad alta accuratezza.

Nonostante questa crescente letteratura, la maggior parte degli studi si concentra sull'errore metrico globale, senza affrontare sistematicamente le dimensioni qualitative che condizionano la successiva fase di modellazione parametrica HBIM.

Metodologia

Il *framework* sviluppato è articolato in tre domini, attraverso indicatori quantitativi calcolabili con *software open source* di elaborazione, riportati nella Tab. 1. Il dominio dell'affidabilità geometrica valuta la fedeltà e la stabilità locale del dato rispetto alla

Introduction

In HBIM workflows, the point cloud cannot be regarded as a mere collection of three-dimensional coordinates. Rather, it represents the primary cognitive interface through which architectural form is interpreted, analysed, and translated into structured information models, in line with Banfi's studies on the semantic and informational role of the Scan-to-BIM process [Banfi, 2020]. Within this paradigm, data quality cannot be assessed exclusively in terms of metric accuracy; instead, it must be considered in relation to its capacity to support coherent levels of representation (LOG, LOA, and LOI), thereby sustaining the modelling and representation of historic built heritage [Brumana et al., 2018].

In recent years, two emerging techniques have gained increasing attention among point-cloud generation methods: Neural Radiance Fields (NeRF) [Mildenhall et al., 2022] and Gaussian Splatting (GS) [Kerbl et al., 2023]. Originally developed for novel-view synthesis in computer vision, these methods have rapidly been tested in the field of heritage documentation [Croce et al., 2023; Mazzacca et al., 2023; Murtiyoso & Grussenmeyer, 2023], revealing their representational potential. They are able to produce visually convincing reconstructions from limited image datasets, with high radiometric richness and reduced acquisition times compared with traditional methods such as terrestrial laser scanning (TLS).

In order to be integrated into HBIM workflows, these techniques must undergo a conversion process that introduces significant algorithmic mediations [Clini et al., 2024]. This process involves several operational parameters, such as the number of iterations, downscaling factors, and filtering strategies, which affect the quality of the generated point cloud, geometric noise, and the local consistency of the three-dimensional reconstruction [Atik, 2025]. Recent literature has begun to document these limitations, showing that NeRF and Gaussian Splatting still present critical issues in geometric reconstruction and detail definition, with effects of noise, granularity, and inaccuracies under complex acquisition conditions [Basso et al., 2024; Maté-González et al., 2025]. However, the analyses conducted in these studies mainly focus on global metric error, namely the Root Mean Square Error (RMSE), without considering other qualitative parameters that may be equally relevant and critical for HBIM workflows.

Through the adoption of the Multi-Level Assessment Framework (MLAF), this research aims, on the one hand, to extend the evaluation of acquisition methodologies beyond the purely metric dimension by integrating indicators of the internal stability of the data with indicators of compatibility with parametric modelling, such as edge detectability and primitive fitting. On the other hand, the study seeks to clarify how the transition from implicit representation to discrete geometric representation may constitute a useful field of application within the Scan-to-BIM context.

State of the Art

In recent years, the survey of architectural heritage has based its workflows on the integration of terrestrial laser scanning and digital photogrammetry. The complementarity between the two techniques is now well established: LiDAR provides the metric reference, while photogrammetry enriches the data with chromatic consistency and enables the coverage of areas that are difficult to reach from the ground [Alshawabkeh & Baik, 2023; Banfi, 2020].

The introduction of Neural Radiance Fields (NeRF) has opened up a new paradigm in three-dimensional representation, encoding the scene as a function that associates density and colour values with each spatial coordinate and viewing direction. Since the resulting representation is volumetric and implicit in nature, the extraction of a point cloud requires conversion procedures based on volumetric sampling and surface-extraction algorithms, such as marching cubes [Croce et al., 2023].

Gaussian Splatting (GS), by contrast, represents a significant methodological advancement in representation, as it models a scene as a set of anisotropic 3D Gaussians, each described by position, covariance, opacity, and spherical harmonics coefficients for modelling view-dependent colour. Unlike NeRF, GS adopts an explicit representation, enabling real-time rendering and significantly reduced training times [Chen & Wang, 2026].

The most recent comparative studies have begun to systematise the comparison

geometria reale dell'oggetto, ed è implementato da quattro indicatori: *planarity*, che misura quanto un intorno di punti approssima una superficie piana; *surface variation*, che quantifica il rumore di superficie e la dispersione dei punti attorno al piano di *best-fit* locale. Normal Change Rate, che misura la variazione angolare media tra normali di punti adiacenti, fungendo da indicatore di conservazione degli spigoli e l'uniformità spaziale valutata tramite il coefficiente di variazione della densità volumetrica locale. Il dominio della leggibilità semantica valuta la capacità del dato di sostenere l'identificazione e la modellazione di elementi architettonici, analizzato tramite il *Mean Curvature*, che descrive la curvatura locale media della superficie ricostruita; valori contenuti e stabili indicano superfici geometricamente coerenti e quindi più facilmente modellabili tramite primitive o superfici NURBS, mentre valori elevati segnalano rumore o instabilità geometrica che ostacolano la transizione ScanToBIM. Il dominio della coerenza radiometrica valuta la qualità cromatica e la leggibilità materica del dato. Tale analisi è implementata misurando la deviazione standard combinata delle componenti RGB (σ-RGB) su una patch omogenea; valori bassi indicano colore stabile e leggibile, valori alti segnalano rumore o artefatti cromatici introdotti dalla pipeline di acquisizione o di conversione.

Dominio	Indicatore	Metrica / Calcolo	Rilevanza HBIM
Affidabilità geometrica	Planarità (*Planarity*)	$(\lambda_2 - \lambda_3) / \lambda_1$ in intorno di 5 cm	Modellazione di pareti e superfici regolari
	Variazione di superficie (*Surface Variation*)	$\lambda_3 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$ in intorno di 5 cm	Rumore di superficie; leggibilità dei piani
	Continuità delle normali (*Normal Change Rate*)	Δθ medio tra normali adiacenti (raggio 5 cm)	Conservazione degli spigoli costruttivi
	Uniformità spaziale	CV = σ/μ della densità volumetrica locale	Stabilità di segmentazione e fitting
Leggibilità semantica	Stabilità della curvatura (*Mean Curvature*)	Curvatura media locale (raggio 5 cm)	Modellazione di volte e superfici complesse

Tab. 1: Multi-Level Assessment Framework (MLAF): domini, criteri, indicatori e rilevanza HBIM.

Domain	Indicator	Metric / Calculation	HBIM Relevance
Geometric Reliability	Planarity	$(\lambda_2 - \lambda_3) / \lambda_1$	Modelling of walls and regular surfaces
	Surface Variation	$\lambda_3 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$	Surface noise; readability of planar surfaces
	Normal Change Rate	Mean Δθ between adjacent normals (5 cm radius)	Preservation of geometric edges and discontinuities
	Spatial Uniformity	CV = σ/μ of the local volumetric density	Segmentation and fitting stability
Geometric-Semantic Legibility	Mean Curvature	Local mean curvature (5 cm radius)	Modelling of vaults and complex surfaces

Tab. 1: Multi-Level Assessment Framework (MLAF): domains, criteria, indicators, and HBIM relevance.

between traditional techniques and new approaches based on neural radiance fields. In this context Clini [Clini et al.,2024] compared SfM, NeRF, and GS, highlighting how the latter two ensure significantly shorter processing times than SfM workflows, while still presenting certain critical issues in geometric reconstruction. Similarly, Atik [Atik, 2025] proposed a comparative assessment of GS algorithms, showing how this technology represents a promising solution for complex scenes, although it introduces issues related to computational requirements and to the trade-off between accuracy and processing speed.

In the field of cultural heritage documentation, a study [Basso et al.,2024] compared NeRF and GS in terms of both visual quality and computational efficiency, emphasising that GS enables more realistic rendering and better handling of texture, lighting, and scene depth than traditional NeRF models. This highlights its potential for immersive applications and for the enhancement of cultural heritage. In parallel, other authors [Murtiyoso and Grussenmeyer, 2023] investigated the use of NeRF for the three-dimensional reconstruction of cultural heritage assets, comparing it with SfM pipelines. Their study showed that NeRF allows for extremely rapid scene generation and satisfactory levels of point-cloud completeness, while still exhibiting a significant degree of geometric noise and insufficient precision for high-accuracy metric documentation applications.

Despite this growing body of literature, most studies focus on global metric error, without systematically addressing the qualitative dimensions that affect the subsequent phase of HBIM parametric modelling.

Methodology

The framework developed in this study is structured into three domains, based on quantitative indicators that can be computed using open-source processing software, as reported in Table 1.

The domain of geometric reliability assesses the fidelity and local stability of the data with respect to the actual geometry of the object. It is implemented through four indicators: planarity, which measures the extent to which a neighbourhood of points approximates a planar surface; surface variation, which quantifies surface

Caso studio e acquisizione del dato

La sperimentazione è stata applicata sulla Badia di San Lorenzo a Casamassima, in provincia di Bari, situata lungo la strada che collega Casamassima a Turi. L'acquisizione è stata condotta integrando una campagna LiDAR terrestre con 14 stazioni (con strumento FARO Focus3D S120), integrate da acquisizioni aeree con drone DJI Matrice 300 RTK, ed una campagna fotogrammetrica, realizzata con drone DJI Mini 3, con un totale di 187 immagini. Durante l'acquisizione sono stati collocati un totale di 8 *target*, condivisi con il rilievo del TLS ed utilizzati come *Ground Control Points* (GCP). Le immagini della campagna fotogrammetrica sono state usate anche per le elaborazioni NeRF e Gaussian Splatting (Fig.1).

Generazione delle nuvole di punti



Fig. 1: Immagini caso studio da rilievo aereo.

Fig. 1: Aerial images of the case study.

noise and the dispersion of points around the local best-fit plane; the Normal Change Rate, which measures the average angular variation between the normals of adjacent points, acting as an indicator of edge preservation; and spatial uniformity, assessed through the coefficient of variation of the local volumetric density.

The domain of semantic legibility evaluates the ability of the data to support the identification and modelling of architectural elements. This is analysed through mean curvature, which describes the average lo-

Per ciascuno dei quattro metodi di elaborazione, è stata generata una nuvola di punti; in particolare, le nuvole NeRF e GS sono state generate mediante ambiente Nerfstudio (Tancik et al., 2023). Per NeRF è stato utilizzato l'algoritmo *nerfacto*, addestrato per 50.000 iterazioni con parametri di default. L'estrazione della nuvola esplicita è stata effettuata tramite *Poisson disk sampling* estratta tramite *marching cubes*, con un numero *target* di 3.000.000 di punti e rimozione automatica degli *outlier* tramite funzione *statistical outlier removal*. Per GS è stato utilizzato l'algoritmo splatfacto, addestrato per le stesse 50.000 iterazioni. Le nuvole NeRF e GS sono state scalate e portate nello stesso sistema di riferimento metrico, utilizzando i *target* presenti. Successivamente, tutte le nuvole sono state sottoposte a *cropping* identico e *subsampling* spaziale a passo fisso (5 mm), in modo da garantire coerenza nei calcoli successivi (Fig. 2).

Calcolo degli indicatori

cal curvature of the reconstructed surface. Low and stable values indicate geometrically coherent surfaces that can therefore be more easily modelled through primitives or NURBS surfaces, whereas high values indicate noise or geometric instability that may hinder the Scan-to-BIM transition.

The domain of radiometric consistency assesses the chromatic quality and material legibility of the data. This analysis is implemented by measuring the combined standard deviation of the RGB components (σ-RGB) over a homogeneous patch. Low values indicate stable and legible colour information, whereas high values point to noise or chromatic artefacts introduced by the acquisition or conversion pipeline.



Fig. 2: Nuvole di punti generate da elaborazione Gaussian Splatting, NeRF, rilievo LiDAR e SfM.

Fig. 2: Point clouds generated from Gaussian Splatting, NeRF, LiDAR survey, and SfM processing.

Tutti gli indicatori del MLAF sono stati calcolati in CloudCompare v2.13. Per il dominio geometrico, sulle nuvole uniformate sono stati calcolati quattro indicatori descrittivi: *Planarity*, definita come $(\lambda_2 - \lambda_3) / \lambda_1$ in funzione degli autovalori della matrice di covarianza locale [Weinmann et al., 2015], restituisce valori compresi tra 0 e 1, dove valori prossimi a 1 indicano superfici localmente planari. La *Surface Variation*, definita come $\lambda_3 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$, misura la deviazione dei punti rispetto al piano di *best-fit* locale e fornisce un indice di rumore di superficie. Il *Normal Change Rate*, calcolato dopo la stima delle normali con identico raggio di 5 cm, quantifica la variazione angolare media tra normali di punti adiacenti, fungendo da indicatore di conservazione degli spigoli costruttivi. Infine, la *Volume Density*, calcolata con *kernel* volumetrico sferico di raggio 5 cm, fornisce il numero di punti per unità di volume in ciascun intorno; da essa è stato derivato il coefficiente di variazione spaziale CV = σ/μ, indicatore di uniformità della distribuzione. Per il dominio della leggibilità, è stato calcolato il *Mean Curvature* che descrive la curvatura locale della superficie ricostruita. Per il dominio radiometrico, è stata adottata una procedura di calcolo che si basa sull'analisi e comparazione di una *patch* omogenea di riferimento, estratta da una sottoregione della parete bianca uniformemente illuminata, condizione che minimizza la variabilità cromatica intrinseca della superficie e attribuisce le differenze osservate al solo rumore introdotto dalla pipeline. Sulla stessa identica *patch*, replicata su tutte e quattro le nuvole, sono state estratte le componenti RGB di ciascun punto ed elaborate per il calcolo della deviazione standard dei tre canali (σ_R, σ_G, σ_B) e del valore combinato [Meynet et al., 2020]:

$$\sigma_{RGB} = \sqrt{\frac{\sigma_R{}^2 + \sigma_G{}^2 + \sigma_B{}^2}{3}}$$

Risultati

L'applicazione del MLAF alle quattro nuvole uniformate ha prodotto i valori riportati in Tab. 2. Il numero di punti residui dopo *subsampling* spaziale a 5 mm risulta significativamente diverso tra le tecniche: 17,5 milioni per il LiDAR, 6,4 milioni per la fotogrammetria SfM-MVS, 1,4 milioni per NeRF e 0,7 milioni per GS. Tale differenza, pur ridotta rispetto alle densità native, riflette una caratteristica intrinseca delle pipeline neurali: l'estrazione esplicita di NeRF e GS produce nuvole strutturalmente meno dense, con punti distribuiti in funzione della ricchezza visiva locale piuttosto che della geometria della superficie (Figg. 3-4).

La fotogrammetria SfM emerge come la tecnica con migliore stabilità geometrica locale su quasi tutti gli indicatori: presenta la *Planarity* media più alta (0,854), la *Surface Variation* più bassa (0,014), il *Normal Change Rate* più contenuto (0,014 rad) e la *Mean Curvature* più stabile (2,58). Tale risultato, apparentemente sorprendente rispetto all'attesa di una superiorità intrinseca del LiDAR, trova spiegazione nelle caratteristiche della pipeline SfM adottata, in cui funzioni di interpolazione e filtraggio tendono a produrre superfici localmente più regolari.

Il LiDAR si colloca al secondo posto su tutti gli indicatori geometrici, mantenendo un profilo equilibrato (*Planarity* 0,796, *Normal Change Rate* 0,037 rad, *Mean Curvature* 2,82) e la massima densità

Case Study and Data Acquisition

The experiment was carried out on the Abbey of San Lorenzo in Casamassima, in the province of Bari, located along the road connecting Casamassima and Turi.

Data acquisition was carried out by integrating a terrestrial LiDAR campaign comprising 14 scan stations, using a FARO Focus3D S120 scanner, with aerial acquisitions performed using a DJI Matrice 300 RTK drone and a photogrammetric campaign conducted with a DJI Mini 3 drone, for a total of 187 images. During the acquisition phase, eight targets were placed on site, shared with the LiDAR survey and used as Ground Control Points (GCPs). The images from the photogrammetric campaign were also used for the NeRF and Gaussian Splatting processing workflows (Fig. 1).

Point Cloud Generation

For each of the four processing methods, a point cloud was generated. In particular, the NeRF and GS point clouds were produced within the Nerfstudio environment [Tancik et al., 2023]. For NeRF, the nerfacto algorithm was used and trained for 50,000 iterations with default parameters. The explicit point cloud was extracted through Poisson disk sampling from a mesh generated using marching cubes, with a target number of 3,000,000 points and automatic outlier removal through the statistical outlier removal function. For GS, the splatfacto algorithm was used and trained for the same 50.000 iterations.

The NeRF and GS point clouds were scaled and brought into the same metric reference system using the available targets. Subsequently, all point clouds were subjected to identical cropping and fixed-step spatial subsampling at 5 mm, in order to ensure consistency in the subsequent computations (Fig. 2).

Indicator Calculation

All MLAF indicators were computed in CloudCompare v2.13. For the geometric domain, four descriptive indicators were calculated on the homogenised point clouds. Planarity, defined as $(\lambda_2 - \lambda_3) / \lambda_1$ as a function of the eigenvalues of the local covariance matrix (Weinmann et al., 2015), returns values ranging from 0 to 1, where values close to 1 indicate locally planar surfaces. Surface Variation, defined as $\lambda_3 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$, measures the deviation

nominale (1,6 milioni di pt/m³). La sua uniformità spaziale è tuttavia inferiore a quella della fotogrammetria, riflettendo la natura discreta dell'acquisizione TLS, organizzata per stazioni che generano variazioni locali di densità in funzione della distanza dall'oggetto e della sovrapposizione. Le ricostruzioni neurali mostrano un comportamento sistematicamente inferiore alle tecniche tradizionali su tutti gli indicatori di stabilità geometrica. NeRF presenta i valori peggiori in assoluto: *Surface Variation* pari a 0,131 (oltre 9 volte superiore alla SfM-MVS), *Normal Change Rate* pari a 0,135 rad (quasi 10 volte la SfM-MVS), *Mean Curvature* pari a 8,18 (oltre 3 volte la SfM-MVS). Tali valori confermano quantitativamente l'effetto di *smoothing* tipico delle ricostruzioni implicite NeRF, e l'instabilità delle superfici ricostruite anche in assenza di vere discontinuità materiche. GS si colloca in una posizione intermedia tra NeRF e le tecniche tradizionali, mostrando valori migliori di NeRF su tutti

Indicatore	LiDAR	SfM-MVS	NeRF	GS
Planarity (media) [0-1]	0,796	0,854	0,403	0,460
Surface Variation (media) [0-1]	0,032	0,014	0,131	0,076
Normal Change Rate (media) [rad]	0,037	0,014	0,135	0,081
Normal Change Rate (p95) [rad]	0,150	0,060	0,235	0,201
Mean Curvature (media)	2,82	2,58	8,18	6,71
Volume Density (media) [pt/m³]	1.616.768	189.860	58.539	60.673
Spatial uniformity (CV)	0,573	0,141	0,755	0,741
σ_{RGB} combinato (patch singola) [0-255]	41,29	44,71	60,28	30,01

Tab. 2: Risultati dell'applicazione del MLAF alle quattro nuvole uniformate (subsampling spaziale a 5 mm). Tutti gli indicatori geometrici sono stati calcolati con raggio di ricerca di 5 cm.

Index	LiDAR	SfM-MVS	NeRF	GS
Planarity (mean) [0-1]	0.796	0.854	0.403	0.460
Surface Variation (mean) [0-1]	0.032	0.014	0.131	0.076
Normal Change Rate (mean) [rad]	0.037	0.014	0.135	0.081
Normal Change Rate (p95) [rad]	0.150	0.060	0.235	0.201
Mean Curvature (mean)	2.82	2.58	8.18	6.71
Volume Density (mean) [pt/m³]	1,616,768	189,860	58,539	60,673
Spatial uniformity (CV)	0.573	0.141	0.755	0.741
Combined σ_{RGB} (patch) [0-255]	41.29	44.71	60.28	30.01

Tab. 2: Results of the application of the MLAF to the four homogenised point clouds after 5 mm spatial subsampling. All geometric indicators were computed using a 5 cm search radius.

of points from the local best-fit plane and provides an index of surface noise. The Normal Change Rate, computed after estimating the normals using the same 5 cm radius, quantifies the mean angular variation between the normals of adjacent points, acting as an indicator of the preservation of construction edges. Finally, Volume Density, computed using a spherical volumetric kernel with a radius of 5 cm, provides the number of points per unit volume within each neighbourhood. From this value, the spatial coefficient of variation CV = σ/μ was derived as an indicator of distribution uniformity.

gli indicatori di stabilità ma significativamente peggiori di LiDAR e SfM-MVS. Particolarmente significativo è il valore di *Spatial uniformity* del GS (CV = 0,741), quasi identico a quello di NeRF (CV = 0,755) e superiore a quello della SfM, che conferma il carattere *feature-driven* della distribuzione spaziale delle gaussiane: i punti tendono a concentrarsi nelle aree visivamente ricche di dettaglio, lasciando relativamente rade le superfici cromaticamente omogenee. L'analisi radiometrica ha restituito valori che invertono parzialmente la gerarchia osservata sugli indicatori geometrici. Il *Gaussian Splatting* presenta il valore più basso di deviazione standard cromatica (30,01 su scala 0–255), seguito da LiDAR (41,29), SfM (44,71) e NeRF (60,28). Il dato GS, pur statisticamente fragile

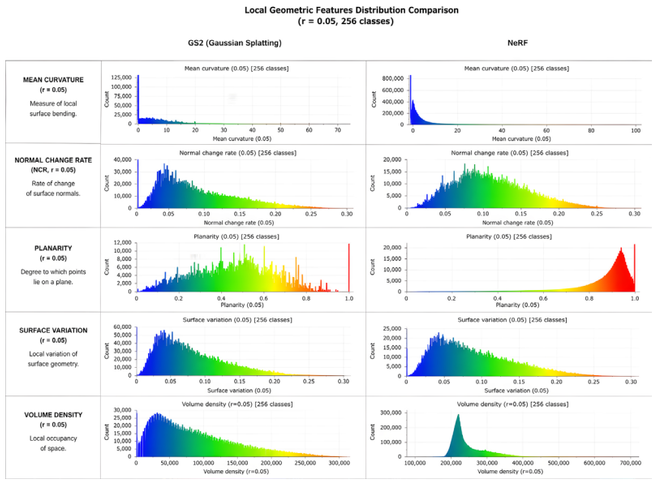


Fig. 3: Local Geometric Features delle nuvole di punti Gaussian Splatting e NeRF.

Fig. 3: Local geometric features of the Gaussian Splatting and NeRF point clouds.

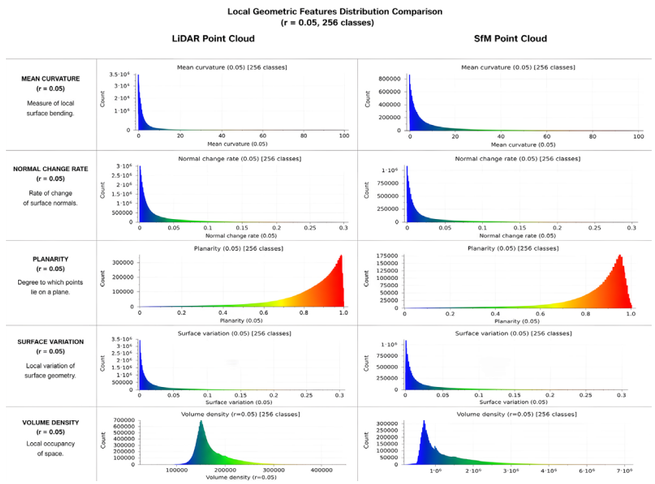


Fig. 4: Local Geometric Features delle nuvole di punti LiDAR e SfM.

Fig. 4: Local geometric features of the LiDAR and SfM point clouds.

For the legibility domain, Mean Curvature was calculated to describe the local curvature of the reconstructed surface. For the radiometric domain, a calculation procedure was adopted based on the analysis and comparison of a homogeneous reference patch extracted from a subregion of a uniformly illuminated white wall. This condition minimises the intrinsic chromatic variability of the surface and attributes the observed differences only to the noise introduced by the processing pipeline. On the same identical patch, replicated across all four point clouds, the RGB components of each point were extracted and processed to compute the standard deviation of the three channels (σ_R, σ_G, σ_B) and the combined value [Meynet et al., 2020]:

$$\sigma_{RGB} = \sqrt{\frac{\sigma_R{}^2 + \sigma_G{}^2 + \sigma_B{}^2}{3}}$$

Results

The application of the MLAF to the four homogenised point clouds produced the values reported in Table 2. The number of residual points after 5 mm spatial subsampling differs significantly among the techniques: 17.5 million for LiDAR, 6.4 million for SfM-MVS photogrammetry, 1.4 million for NeRF, and 0.7 million for GS.

Although reduced with respect to the native densities, this difference reflects an intrinsic characteristic of neural pipelines: the explicit extraction of NeRF and GS produces structurally less dense point clouds, with points distributed according to local visual richness rather than surface geometry (Figs. 3–4).

SfM photogrammetry emerges as the technique with the highest local geometric stability across almost all indicators: it shows the highest mean Planarity value (0.854), the lowest Surface Variation (0.014), the lowest Normal Change Rate (0.014 rad), and the most stable Mean Curvature (2.58). This result, which may appear surprising when compared with the expected intrinsic superiority of LiDAR, can be explained by the characteristics of the adopted SfM pipeline, in which interpolation and filtering functions tend to produce locally smoother surfaces.

LiDAR ranks second across all geometric indicators, maintaining a balanced profile:

per il numero limitato di punti della *patch*, è tendenzialmente coerente con la *pipeline* GS: il processo di ottimizzazione delle gaussiane produce, sulle aree visualmente uniformi e ben coperte da molte viste, un colore mediato molto stabile. NeRF mostra invece una maggiore variabilità cromatica locale, verosimilmente correlata ai processi di interpolazione *view-dependent* del modello.

Conclusioni

La lettura dei risultati conferma che nessuna delle quattro tecniche è intrinsecamente completa per i flussi HBIM, e ciascuna eccelle in una dimensione specifica. SfM si distingue per la stabilità geometrica locale e l'uniformità di distribuzione, qualità essenziali per la modellazione parametrica e la segmentazione automatica delle superfici architettoniche. LiDAR offre il miglior compromesso complessivo tra densità nominale, stabilità geometrica e affidabilità metrica, ma con minore uniformità spaziale. NeRF e GS, viceversa, presentano sistematiche debolezze su tutti gli indicatori geometrici, ma mostrano potenzialità sul piano radiometrico, in particolare GS. Future ricerche potranno analizzare il contributo delle singole fasi di estrazione e campionamento, consolidando la valutazione dell'applicabilità delle tecniche neurali nei processi HBIM.

Riferimenti bibliografici

Alshawabkeh, Y., & Baik, A. (2023). Integration of photogrammetry and laser scanning for enhancing scan-to-HBIM modeling of Al Ula heritage site. *Heritage Science, 11(1)*. https://doi.org/10.1186/s40494-023-00997-2

Atik, M. E. (2025). Comparative Assessment of Neural Radiance Fields and 3D Gaussian Splatting for Point Cloud Generation from UAV Imagery. *Sensors, 25(10)*. https://doi.org/10.3390/s25102995

Banfi, F. (2020). HBIM, 3D drawing and virtual reality for archaeological sites and ancient ruins. *Virtual Archaeology Review, 11(23)*, 16–33. https://doi.org/10.4995/var.2020.12416

Basso, A., Condorelli, F., Giordano, A., Morena, S., & Perticarini, M. (2024). Evolution of rendering based on radiance fields.The palermo case study for a comparison between nerf and gaussian splatting. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 48(2)*, 57–64. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-2-W4-2024-57-2024

Brumana, R., Della Torre, S., Previtali, M., Barazzetti, L., Cantini, L., Oreni, D., & Banfi, F. (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)*, 545–567. https://doi.org/10.1007/s12518-018-0233-3

Chen, G., & Wang, W. (2026). A Survey on 3D Gaussian Splatting. *ACM Computing Surveys, 58(12)*, 1–39. https://doi.org/10.1145/3807511

Clini, P., Nespeca, R., Angeloni, R., & Coppetta, L. (2024). 3D representation of Architectural Heritage: a comparative analysis

Planarity of 0.796, Normal Change Rate of 0.037 rad, Mean Curvature of 2.82, and the highest nominal density, equal to 1.6 million pts/m³. However, its spatial uniformity is lower than that of photogrammetry, reflecting the discrete nature of LiDAR acquisition, which is organised by scan stations and generates local density variations according to the distance from the object and scan overlap.

Neural reconstructions show systematically lower performance than traditional techniques across all geometric stability indicators. NeRF presents the poorest values overall: Surface Variation of 0.131, more than nine times higher than SfM-MVS; Normal Change Rate of 0.135 rad, almost ten times higher than SfM-MVS; and Mean Curvature of 8.18, more than three times higher than SfM-MVS. These values quantitatively reflect two concurrent effects of NeRF-derived explicit point clouds: the loss of sharp geometric discontinuities due to implicit surface smoothing, and the local instability introduced during the conversion from the radiance-field representation to a discrete point cloud.

GS occupies an intermediate position between NeRF and the traditional techniques, showing better values than NeRF across all stability indicators, but significantly worse values than LiDAR and SfM-MVS. Particularly significant is the Spatial Uniformity value of GS (CV = 0.741), almost identical to that of NeRF (CV = 0.755) and higher than that of SfM. This confirms the feature-driven nature of the spatial distribution of Gaussians: points tend to concentrate in visually detail-rich areas, while chromatically homogeneous surfaces remain relatively sparse.

The radiometric analysis produced values that partially reverse the hierarchy observed for the geometric indicators. Gaussian Splatting shows the lowest chromatic standard deviation value (30.01 on a 0-255 scale), followed by LiDAR (41.29), SfM (44.71), and NeRF (60.28). Although the GS result is statistically fragile due to the limited number of points within the patch, it is broadly consistent with the GS pipeline: the optimisation process of the Gaussians produces, in visually uniform areas that are well covered by multiple views, a highly stable averaged colour. NeRF, by contrast, shows greater local chromatic variability, most likely related to the model's view-dependent interpolation processes.

of NeRF, Gaussian Splatting, and SfM-MVS reconstructions using low-cost sensors. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 48(2/W8-2024)*, 93–99. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-93-2024

Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Piemonte, A., & Veron, P. (2023). Neural radiance fields (nerf): Review and potential applications to digital cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 48(M-2–2023)*, 453–460. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-453-2023

Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkuehler, T., & Drettakis, G. (2023). 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. *ACM Transactions on Graphics, 42(4)*. https://doi.org/10.1145/3592433

Maté-González, M. Á., Yali, R., Rodríguez-Hernández, J., González-González, E., & Aguirre de Mata, J. (2025). Comparison of NeRF- and SfM-Based Methods for Point Cloud Reconstruction for Small-Sized Archaeological Artifacts. *Remote Sensing, 17(14)*. https://doi.org/10.3390/rs17142535

Mazzacca, G., Karami, A., Rigon, S., Farella, E. M., Trybala, P., & Remondino, F. (2023). Nerf for heritage 3d reconstruction. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 48(M-2–2023)*, 1051–1058. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-1051-2023

Meynet, G., Nehme, Y., Digne, J., & Lavoue, G. (2020, May 1). PCQM: A Full-Reference Quality Metric for Colored 3D Point Clouds. 2020 12th *International Conference on Quality of Multimedia Experience, QoMEX 2020*. https://doi.org/10.1109/QoMEX48832.2020.9123147

Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., & Ng, R. (2022). NeRF. *Communications of the ACM, 65(1)*, 99–106. https://doi.org/10.1145/3503250

Murtiyoso, A., & Grussenmeyer, P. (2023). Initial assessment on the use of state-of-The-Art nerf neural network 3d reconstruction for heritage documentation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 48(M-2–2023)*, 1113–1118. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-1113-2023

Tancik, M., Weber, E., Ng, E., Li, R., Yi, B., Wang, T., Kristoffersen, A., Austin, J., Salahi, K., Ahuja, A., Mcallister, D., Kerr, J., & Kanazawa, A. (2023). Nerfstudio: A Modular Framework for Neural Radiance Field Development. *Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference Conference Proceedings*, 1–12. https://doi.org/10.1145/3588432.3591516

Weinmann, M., Jutzi, B., Hinz, S., & Mallet, C. (2015). Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 105*, 286–304. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.016

Conclusions

The interpretation of the results confirms that none of the four techniques is intrinsically complete for HBIM workflows, and that each one excels in a specific dimension. SfM stands out for its local geometric stability and distribution uniformity, which are essential qualities for parametric modelling and the automatic segmentation of architectural surfaces. LiDAR offers the best overall compromise between nominal density, geometric stability, and metric reliability, although with lower spatial uniformity. NeRF and GS, by contrast, show systematic weaknesses across all geometric indicators, while revealing potential in radiometric terms, particularly in the case of GS. Future research may analyse the contribution of the individual extraction and sampling phases, thereby consolidating the assessment of the applicability of neural techniques within HBIM processes.

Autori

Carmenrita Scalone[1]
Frank Ernesto Villarreal Quevedo[2]

Email

carmenritascalone@gmail.com
fvillarrealquevedo@gmail.com

[1] Università degli Studi di Firenze, CHM_Lab
[2] Universidad de Oriente, Cuba. Visiting Professor, Università degli Studi di Firenze, CHM_Lab

Keywords

HBIM
DIGITAL SURVEY
DIGITAL HERITAGE
CRITICAL MODELING
POINT CLOUD

I processi Pointcloud to BIM applicati al caso studio del Kursaal di Montecatini Terme. Una riflessione critica

Pointcloud-to-BIM processes applied to the case study of the Kursaal in Montecatini Terme: A critical reflection

Abstract

Il paper racchiude riflessioni sul *workflow* di lavoro per la realizzazione di modelli parametrici di un edificio storico a partire dai dati desumibili da operazioni di rilevamento digitale. Il tema è affrontato a seguito di una ricerca che ha visto il "*Cultural Heritage Management*" Lab (CHM_Lab), un laboratorio del Dipartimento di Architettura di Firenze, impegnato nella documentazione morfometrica e cromatica e nella realizzazione del modello parametrico del Kursaal di Montecatini Terme (PT).

This paper presents insights into the workflow for generating parametric models of historical buildings based on data acquired through digital survey operations. The topic is addressed following a research project conducted by the "Cultural Heritage Management" Lab (CHM_Lab), a research laboratory at the Department of Architecture in Florence, focused on the morphometric and chromatic documentation, as well as the parametric modeling, of the Kursaal in Montecatini Terme (PT).

Introduzione

Attualmente, l'applicazione del Building Information Modeling (BIM) al patrimonio architettonico è considerata fondamentale per una gestione informata e condivisa dello stesso [Li et al., 2025]. Tuttavia, le principali criticità nella sua implementazione risiedono ancora nel delicato equilibrio tra l'accuratezza geometrica e la corretta semantizzazione degli elementi [Alauria & Baratin, 2025]. Il superamento di tali limiti attraverso una corretta strutturazione del modello informativo consente di definire una solida strategia per la gestione del patrimonio, capace di supportare efficacemente sia i processi decisionali che la comunicazione del bene.

Sebbene l'uso di *database* condivisi presenti innegabili vantaggi, la definizione di *workflow* standardizzati per la modellazione informativa a partire da nuvole di punti costituisce ancora una complessa sfida metodologica [Abreu et al., 2023]. Infatti, sebbene l'HBIM sia fondamentale per una gestione informata del patrimonio, persiste tuttora un limite metodologico significativo [Brusaporci et al., 2021] legato al rischio che una semplificazione eccessiva della complessità morfometrica e stratigrafica induca ad una consistente perdita di dati e delle irregolarità costruttive proprie dell'architettura storica.

Questa ricerca analizza il potenziale di un approccio BIM a supporto della documentazione, dello studio e della conservazione del Kursaal di Montecatini Terme. L'obiettivo è definire un flusso di lavoro in grado di trasformare il modello digitale in uno strumento attivo per la tutela e la gestione del manufatto. Sulla base dei risultati del rilievo digitale, che ha descritto una struttura con interni riccamente decorati e una stratigrafia complessa, il modello parametrico assume un ruolo fondamentale come strumento di comprensione, integrando tutte le informazioni ottenute dalla ricerca storica, dall'analisi del degrado, dei materiali e dei dissesti strutturali.

Il Kursaal come caso di studio

Il Kursaal di Montecatini Terme (Fig. 1) è un complesso architettonico progettato nel 1905 dagli architetti Carbinati e Garbagnati e tutelato dalla Legge 1089/39[1]. Caratterizzato da un profondo valore storico-architettonico, l'edificio, nonostante le criticità conservative derivanti dal suo avanzato stato di degrado, è considerato oggi un bene culturale strategico del patrimonio costruito urbano. Nel 2024 la società OVER s.r.l., proprietaria di una parte dell'immobile, ha incaricato il DIDA (Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze) di realizzare la documentazione morfometrica e cromatica, la diagnostica del degrado e la valutazione del comportamento strutturale del primo piano dell'edificio[2]. L'esperienza risulta particolarmente significativa in quanto la realizzazione del modello HBIM ha consentito di sperimentare, all'interno dell'ambiente Autodesk Revit, l'integrazione ottimale tra i risultati della analisi storiche e diagnostiche e i dati morfometrici derivanti dalla nuvola di punti, inserendo quest'ultima direttamente nel flusso di lavoro parametrico. La costruzione di un *database* quanto più completo possibile sullo stato attuale dell'edificio si conferma infatti il punto di partenza essenziale per la formulazione di un progetto di restauro finalizzato alla conservazione e alla tutela dell'immobile.

Introduction

Currently, the application of Building Information Modeling (BIM) to architectural heritage is considered essential for its informed and shared management [Li et al., 2025]. However, the primary criticalities in its implementation still reside in the delicate balance between geometric accuracy and the correct semantic characterization of elements [Alauria & Baratin, 2025]. Overcoming these limitations through a proper structuring of the information model allows for the definition of a robust heritage management strategy capable of effectively supporting both decision-making processes and heritage communication.

Although the use of shared databases offers undeniable advantages, defining standardized workflows for information modeling based on point clouds remains a complex methodological challenge [Abreu et al., 2023]. Indeed, while HBIM is fundamental for informed heritage management, a significant methodological limitation persists [Brusaporci et al., 2021], related to the risk that excessive simplification of morphometric and stratigraphic complexity may induce a substantial loss of data and construction irregularities intrinsic to historical architecture.

This research analyzes the potential of a BIM approach to support the documentation, study, and conservation of the Kursaal in Montecatini Terme. The objective is to define a workflow capable of transforming the digital model into an active tool for the protection and management of the asset. Based on the results of the digital survey, which delineated a structure with richly decorated interiors and a complex stratigraphy, the parametric model assumes a fundamental role as a tool for comprehension, integrating all information obtained from historical research, decay analysis, materials, and structural distress.

The Kursaal as a Case Study

The Kursaal of Montecatini Terme (Fig. 1) is an architectural complex designed in 1905 by the architects Carbinati and Garbagnati and protected under Law 1089/39[1]. Characterized by profound historical and architectural value, the building—despite the conservation criticalities arising from its advanced state of decay—is currently considered a strategic cultural asset within the urban built heritage.

In 2024, the company OVER s.r.l., owner of a portion of the property, commissioned DIDA (Department of Architecture of the University of Florence) to perform the morphometric and chromatic documentation, the diagnosis of decay, and the evaluation



Fig. 1: Cartolina fotografica del Kursaal (s.d.). Fonte: Archivio dell'Azienda Autonoma di Cura e Soggiorno.

Fig. 1: Photographic postcard of the Kursaal (n.d.). Source: Archive of the Azienda Autonoma di Cura e Soggiorno.

Protocollo metodologico

La sfida dell'HBIM risiede nell'adeguata documentazione preliminare del bene architettonico, fondamento indispensabile per processi di intervento complessi [Brusaporci, 2023]; lo sviluppo di una metodologia efficace non può prescindere pertanto dall'analisi delle caratteristiche peculiari e delle irregolarità del manufatto. Sebbene, infatti, la natura non standard di elementi appartenenti all'architettura storica rappresenti un ostacolo alla modellazione parametrica, è proprio attraverso l'accuratezza del rilievo digitale che si pongono le basi per un ambiente dati

[1] Legge 1° giugno 1939, n. 1089, Tutela delle cose d'interesse Artistico o Storico (G.U. 8 agosto 1939, n. 184), i cui effetti sono fatti salvi dall'art. 128 del D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42 (Codice dei beni culturali e del paesaggio).

[2] La ricerca è frutto della convenzione tra la OVER s.r.l. e il DIDA | Dipartimento di Architettura — Università degli Studi di Firenze (convenzione conto terzi 630/2024 prot. n. 0261011 del 23/10/2024 e successiva integrazione 344/2025 prot n.0109446 del 19/05/2025), che prevede la documentazione morfometrica e la diagnostica del degrado di una porzione dell'immobile denominato Kursaal. La documentazione morfometrica e cromatica e la realizzazione del modello parametrico sono state condotte dal CHM_Lab del DIDA. Responsabile scientifico: prof. Alessandro Merlo;

[1] Law No. 1089 of June 1, 1939, on the Protection of Objects of Artistic or Historical Interest (Official Gazette No. 184 of August 8, 1939), the provisions of which are preserved by Art. 128 of Legislative Decree No. 42 of January 22, 2004 (Code of Cultural Heritage and Landscape).

[2] This research is the result of a research agreement between OVER s.r.l. and DIDA | Department of Architecture — University of Florence (third-party agreement 630/2024, protocol no. 0261011 of

condiviso, garantendo l'affidabilità necessaria al coordinamento multidisciplinare [Tata, 2022].

Il flusso di lavoro ha incluso operazioni preliminari e preparatorie per i processi HBIM, che hanno integrato la ricerca storica, i dati delle campagne di rilevamento digitale e le analisi diagnostiche per documentare la geometria e lo stato di conservazione dell'edificio. In questo caso, l'accento è stato posto sulla metodologia seguita nel rilevamento digitale (Fig. 2) che, attraverso l'uso coordinato di sensori attivi e passivi, ha previsto l'integrazione di scansioni laser per la definizione morfometrica degli spazi e di acquisizioni fotogrammetriche terrestri e aeree per la documentazione degli aspetti cromatici.

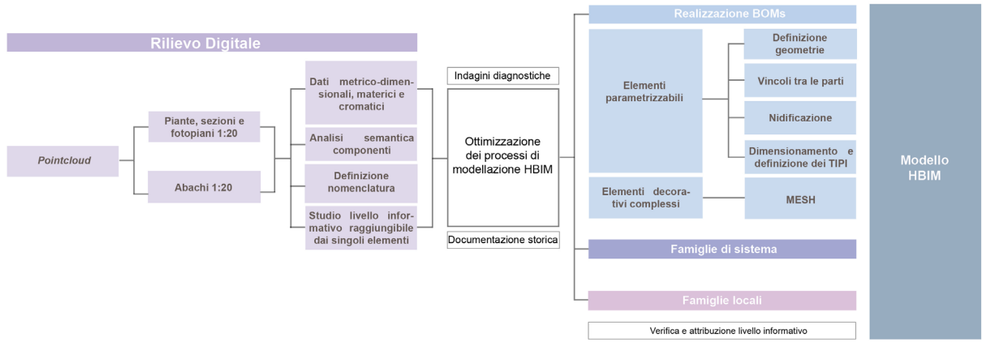


Fig. 2: Schema metodologico utilizzato. Fonte: CHM_Lab, 2026.

Fig. 2: Methodological scheme utilized. Source: CHM_Lab, 2026.

Il processo di digitalizzazione del manufatto ha prodotto una nuvola densa di punti che documenta in modo affidabile l'articolazione spaziale, le irregolarità costruttive e l'effettivo stato di conservazione dell'immobile, diventando così il principale punto di riferimento all'interno del flusso di lavoro di modellazione BIM (Fig. 3).

Analisi semantica e scelta delle strategie di modellazione

Il rilievo digitale assume il ruolo di mediatore critico tra l'ambiente costruito e il modello HBIM. I processi di semplificazione insisti nel modello hanno infatti evidenziato il rischio di una indistinta e significativa perdita di elementi essenziali per la comprensione

collaboratori: Gaia Lavoratti, Giulia Lazzari, Carmenrita Scalone, Frank Ernesto Villarreal Quevedo. Le analisi diagnostiche per il restauro sono state eseguite dal laboratorio LARC del DIDA. Responsabile scientifico: prof. Susanna Caccia Gherardini; tecnico di laboratorio: Francesco Pisani; collaboratori: Paola Bordoni, Giorgio Ghelfi, Pierpaolo Lagani, Anna Laura Petracci, Alice Rossano, Adele Rossi. La valutazione del comportamento strutturale è stata condotta dal prof. Marco Tanganelli. L'approfondimento storico è stato svolto dall'arch. Arianna Bechini, sotto il coordinamento scientifico della prof. Emanuela Ferretti.

of the structural behavior of the building's first floor[2]. This experience is particularly significant because the creation of the HBIM model enabled testing, within the Autodesk Revit environment, the optimal integration between the results of historical and diagnostic analyses and the morphometric data derived from the point cloud, inserting the latter directly into the parametric workflow. Indeed, constructing a database as comprehensive as possible regarding the current state of the building stands as the essential starting point for formulating a restoration project aimed at the conservation and protection of the property.

10/23/2024, and subsequent integration 344/2025, protocol no. 0109446 of 05/19/2025), which entails the morphometric documentation and decay diagnosis of a portion of the building known as the Kursaal. The morphometric and chromatic documentation, along with the generation of the parametric model, were conducted by DIDA's CHM_Lab. Scientific director: Prof. Alessandro Merlo; collaborators: Gaia Lavoratti, Giulia Lazzari, Carmenrita Scalone, Frank Ernesto Villarreal Quevedo. The diagnostic analyses for restoration were performed by DIDA's LARC laboratory. Scientific director: Prof. Susanna Caccia Gherardini; laboratory technician: Francesco Pisani; collaborators: Paola Bordoni, Giorgio Ghelfi, Pierpaolo Lagani, Anna Laura Petracci, Alice Rossano, Adele Rossi. The structural behavior evaluation was conducted by Prof. Marco Tanganelli. The historical in-depth study was carried out by Arch. Arianna Bechini, under the scientific coordination of Prof. Emanuela Ferretti.



Fig. 3: Sovrapposizione nuvola di punti con modello parziale HBIM in Autodesk Revit. Fonte: CHM_Lab, 2026.

Fig. 3: Overlap of the point cloud with the partial HBIM model in Autodesk Revit. Source: CHM_Lab, 2026.

e la documentazione del bene. Tuttavia, le rappresentazioni bidimensionali (sezioni orizzontali e verticali, fotopiani, abachi) realizzate sezionando opportunamente la nuvola di punti, la strutturazione di un sistema di nomenclatura e la catalogazione coerente degli elementi presenti nel rilievo hanno permesso di mantenere un elevato livello di informazione (Fig. 4).

Tali dati non sempre risultano pienamente trasferibili all'interno di un ambiente HBIM, ma sono essenziali per supportare e guidare le decisioni relative alla modellazione parametrica [Nieto-Julián et al., 2022]. È fondamentale quindi che la campagna di rilevamento, seguita dalla restituzione dei dati morfometrici e cromatici, sia progettata tenendo conto di queste limitazioni, al fine di guidare il processo di modellazione nella definizione del livello di dettaglio che il modello deve raggiungere in base al suo utilizzo e scopo [Croce et al., 2021]. Per il Kursaal, tale processo è risultato cruciale a causa della complessità dell'edificio, caratterizzato da un ricco apparato decorativo e da diverse fasi edificatorie; ciò ha indotto ad attribuire criticamente una specifica logica costruttiva a ciascun oggetto architettonico, integrandolo in sistemi relazionali più ampi e complessi. Per mantenere una corrispondenza diretta tra gli elaborati

Methodological Protocol

The challenge of HBIM lies in the adequate preliminary documentation of the architectural asset, which constitutes an indispensable foundation for complex intervention processes [Brusaporci, 2023]; consequently, the development of an effective methodology cannot disregard the analysis of the unique characteristics and irregularities of the artifact. Although the non-standard nature of elements belonging to historical architecture represents an obstacle to parametric modeling, it is precisely through the accuracy of the digital survey that the foundations for a common data environment are laid, ensuring the reliability necessary for multidisciplinary coordination [Tata, 2022].

bidimensionali e gli oggetti parametrici, è stata prestata particolare attenzione allo sviluppo di un sistema di nomenclatura che garantisse un'efficace corrispondenza tra i due *dataset* [CHM_Lab, 2025].

Sono state utilizzate famiglie di sistema [Lo Turco et al., 2023] per creare i principali elementi strutturali e architettonici che, pur presentando caratteristiche peculiari rispetto alla composizione stratigrafica, non rappresentano tuttavia dei casi unici. La modellazione degli elementi peculiari, come decorazioni e infissi, è stata invece affrontata attraverso l'impiego di famiglie caricabili [Maiezza & Tata, 2021] basate su processi di nidificazione [Banfi, 2017]. L'utilizzo di *template* .rft specifici ha permesso infatti di coniugare un elevato livello di personalizzazione con la definizione di rigide relazioni dimensionali tra i dettagli e l'oggetto completo.

Si è deciso, pertanto, di modellare tali componenti come oggetti interamente parametrici, escludendo l'impiego di modelli ibridi [Lovell et al., 2023]. Questa scelta, dettata dalle specifiche caratteristiche geometriche e dallo stato di conservazione degli elementi, ne ha garantito un'efficace digitalizzazione.

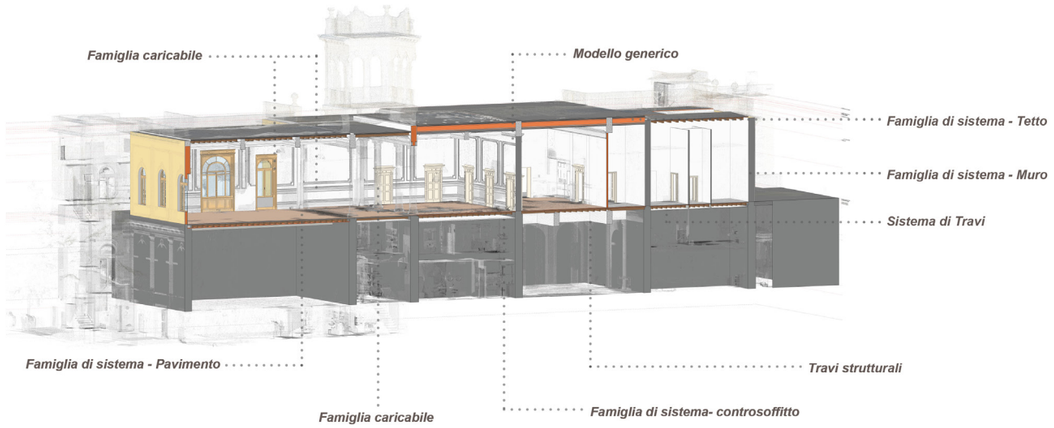


Fig. 4: Vista esisti parziali del modello in Autodesk Revit 2025. Fonte: CHM_Lab, 2026.

Fig. 4: View of partial model results in Autodesk Revit 2025. Source: CHM_Lab, 2026.

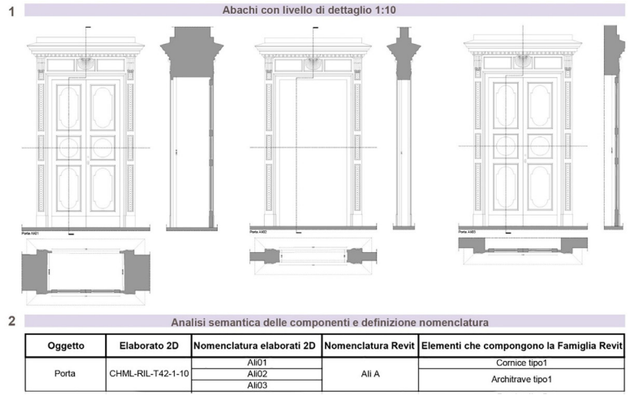
Modellazione degli infissi con un approccio parametrico

Gli infissi in legno del primo piano costituiscono un elemento distintivo dell'edificio sia per la loro fattura pregiata che per la loro complessa composizione, definita da un preciso sistema di relazioni tra i componenti. L'analisi semantica applicata a porte e finestre ha permesso l'identificazione critica delle loro parti costituenti, stabilendo così le relazioni gerarchiche che governano l'elemento nel suo insieme. Le porte sono state distinte, in base alla presenza o meno dei componenti principali, nelle diverse tipologie: la cornice in legno con intagli rettangolari, gli architravi e il telaio fisso e mobile, anch'esso con intagli rettangolari (Fig. 5).

The workflow encompassed preliminary and preparatory operations for HBIM processes, integrating historical research, data from digital survey campaigns, and diagnostic analyses to document the geometry and conservation status of the building. In this case, emphasis was placed on the methodology adopted for the digital survey (Fig. 2) which, through the coordinated use of active and passive sensors, involved the integration of laser scanning for the morphometric definition of spaces and terrestrial and aerial photogrammetric acquisitions for the documentation of chromatic aspects. The digitization process of the artifact yielded a dense point cloud that reliably documents the spatial articulation, construction irregularities, and the actual state of conservation of the property, thereby becoming the primary reference point within the BIM modeling workflow (Fig. 3).

Semantic Analysis and Selection of Modeling Strategies

The digital survey acts as a critical mediator between the built environment and the HBIM model. The simplification processes inherent to modeling highlighted the



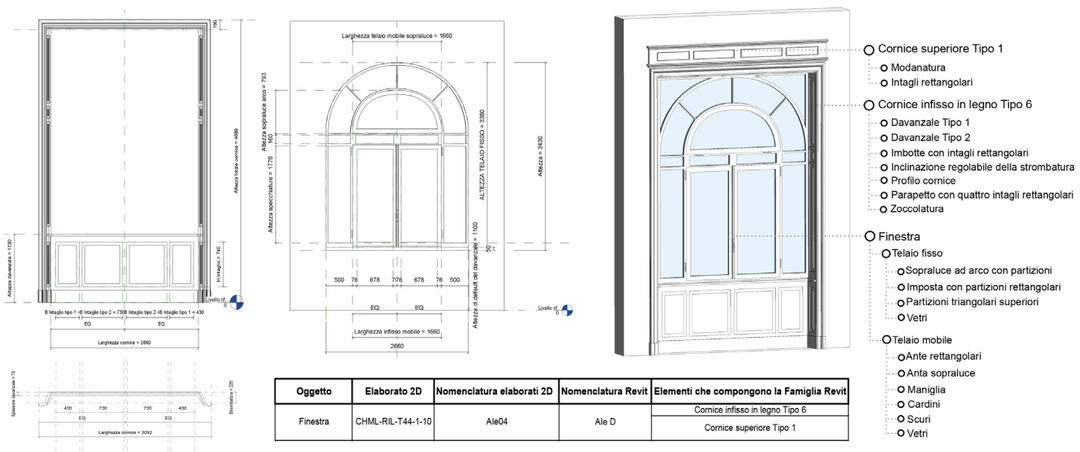
Oggetto	Elaborato 2D	Nomenclatura elaborati 2D	Nomenclatura Revit	Elementi che compongono la Famiglia Revit
Porta	CHML-RIL-T42-1-10	Ali01	Ali A	Cornice tipo1
		Ali02		Architrave tipo1
		Ali03		

Fig. 5: Abaco parziale degli infissi interni con corrispondente analisi e definizione della nomenclatura. Fonte: CHM_Lab, 2026.

Fig. 5: Partial schedule of internal fixtures with corresponding analysis and definition of nomenclature. Source: CHM_Lab, 2026.

Per quanto riguarda le finestre (Fig. 6), i componenti principali individuati sono stati i seguenti: cornice, telaio fisso e mobile, imbotte intagliata con davanzale e elemento ligneo per l'alloggio dei sistemi di oscuramento o in alternativa, modanatura decorativa della cornice. L'obiettivo è stato verificare la possibilità di utilizzare un numero ridotto di famiglie parametriche per rappresentare tutte le tipologie, rispettivamente di porte e finestre, nonostante la loro complessità ed eterogeneità. A tal fine, oltre alla definizione di parametri dimensionali, sono stati associati ad ogni componente parametri sia di materiale che di visibilità.

L'elevata precisione morfologica raggiunta per i vari componenti di finestre e porte è attribuibile esclusivamente all'utilizzo di profili bidimensionali derivanti dagli abachi. Questi hanno costituito la



Oggetto	Elaborato 2D	Nomenclatura elaborati 2D	Nomenclatura Revit	Elementi che compongono la Famiglia Revit
Finestra	CHML-RIL-T44-1-10	Ale04	Ale D	Cornice infisso in legno Tipo 6
				Cornice superiore Tipo 1

Fig. 6: Modello parametrico infisso esterno con identificazione delle componenti e nomenclatura. Fonte: CHM_Lab, 2026.

Fig. 6: Parametric model of external fixture with component identification and nomenclature. Source: CHM_Lab, 2026.

risk of an indistinct and significant loss of elements essential for understanding and documenting the asset. However, two-dimensional representations (horizontal and vertical sections, orthophotos, schedules) generated by appropriately sectioning the point cloud, along with the structuring of a nomenclature system and the coherent cataloging of the elements present in the survey, allowed for the preservation of a high level of information (Fig. 4).

Such data are not always fully transferable within an HBIM environment, yet they remain essential to support and guide decisions regarding parametric modeling [Nieto-Julián et al., 2022]. Therefore, it is fundamental that the survey campaign, followed by the restitution of morphometric and chromatic data, is designed taking these limitations into account, in order to guide the modeling process in defining the level of detail that the model must achieve based on its intended use and purpose [Croce et al., 2021]. For the Kursaal, this process proved crucial due to the complexity of the building, which is characterized by a rich decorative apparatus and distinct construction phases; this prompted the critical attribution of a specific construction logic to each architectural object, integrating it into broader and more complex relational systems. To maintain a direct correspondence between the two-dimensional drawings and the parametric objects, particular attention was

base geometrica per la successiva estrusione e parametrizzazione delle diverse geometrie. La maggior parte degli elementi è stata realizzata infatti estrudendo i diversi profili bidimensionali lungo il percorso, mentre gli intagli sui telai sono stati ottenuti utilizzando solidi sottrattivi, successivamente vincolati agli altri componenti tramite piani di riferimento. L'integrazione dei singoli oggetti parametrici nel modello è stata verificata attraverso un puntuale monitoraggio dello scostamento con la nuvola di punti. La verifica ha mostrato una sostanziale sovrapponibilità tra l'elemento modellato e il dato rilevato, garantendo un grado di fedeltà geometrica coerente con gli obiettivi derivanti dall'analisi dello stato di fatto.

Modellazione apparato decorativo con un approccio diagnostico

L'apparato decorativo del Kursaal, presente in maniera diffusa nel salone principale, rappresenta una delle caratteristiche più pregevoli del manufatto. Le decorazioni sono elementi plastici a stucco dipinto e raffigurano prevalentemente forme geometriche che sono state impiegate per organizzare visivamente le grandi superfici dei soffitti e delle pareti, oltre che per mimetizzare gli elementi strutturali come le travi. In questo caso, la strategia di modellazione ha dovuto tener conto dell'avanzato degrado delle decorazioni, significativamente compromesse da una diffusa perdita di materiale che ne ha alterato la geometria originale; un limite operativo che, tuttavia, ha rappresentato l'occasione per testare l'integrazione dello stato di conservazione direttamente all'interno del modello HBIM [Bolognesi et al., 2023]. L'analisi delle patologie di degrado ha permesso di definire lo stato attuale di conservazione dell'apparato decorativo in relazione alla perdita di materiale.

Si è osservato infatti che il degrado tende a manifestarsi in modo ricorrente, interessando sistematicamente le stesse parti e seguendo schemi ricorrenti per ogni tipo di elemento. Queste considerazioni hanno guidato la scelta di modellare le decorazioni utilizzando famiglie caricabili, in particolare attraverso il *template* Modello generico.rft. La singola geometria decorativa è stata trattata non come un unico componente, ma come un insieme di parti distinte. Delineando i diversi casi, sono state identificate le principali parti costituenti (angoli, parte superiore, parte inferiore e lati), consentendo di assegnare a ciascuna di esse parametri indipendenti relativi a dimensioni, materiale e visibilità (Fig. 7).

Questa strategia, applicata efficacemente anche alle decorazioni presenti sul soffitto del salone principale, ha permesso la gestione individuale delle parti mancanti mantenendo l'integrità logica dell'elemento e garantendo una gestione flessibile della sua rappresentazione, a seconda dello stato di conservazione rilevato (Fig. 8). Per ogni elemento decorativo, l'accuratezza geometrica è stata garantita dall'utilizzo di profili bidimensionali estratti dagli abachi delle modanature interne [CHM_Lab, 2025]. Una volta importati nell'ambiente parametrico, questi profili sono stati utilizzati mediante lo strumento "estrusione percorso", che ha consentito la fase di digitalizzazione dell'elemento, permettendo successivamente di associare alla geometria i dati relativi alla conservazione, ai materiali e alle specifiche riguardanti le patologie di degrado. Le strategie di modellazione adottate sono inoltre finalizzate all'aggiornamento costante ed efficace dello stato di conservazione degli elementi distintivi del Kursaal, così da agevolare il monitoraggio e la manutenzione programmata all'interno dell'ambiente HBIM.

Modeling of Fixtures via a Parametric Approach

The wooden fixtures on the first floor constitute a distinctive element of the building, both for their fine craftsmanship and their complex composition, defined by a precise system of relationships among components. The semantic analysis applied to doors and windows allowed for the critical identification of their constituent parts, thereby establishing the hierarchical relationships that govern the element as a whole. Doors were classified into different typologies based on the presence or absence of core components: the wooden frame with rectangular carvings, the architraves, and the fixed and movable frames, which also feature rectangular carvings (Fig. 5).

Regarding the windows (Fig. 6), the main components identified were the following: frame, fixed and movable sashes, carved jamb with sill, and a wooden element to house shading systems or, alternatively, a decorative frame molding. The objective was to verify the feasibility of using a reduced number of parametric families to represent all typologies of doors and windows respectively, despite their complexity and heterogeneity. To this end, in addition to defining dimensional parameters, both material and visibility parameters were associated with each component.

The high morphological precision achieved for the various components of windows and doors is exclusively attributable to the use of two-dimensional profiles derived from the schedules. These served as the geometric basis for the subsequent extrusion and parameterization of the different geometries. Most elements were created by extruding the different two-dimensional profiles along a path, while the carvings on the frames were obtained using void forms, subsequently constrained to the other components via reference planes. The integration of individual parametric objects into the model was verified through precise deviation monitoring against the point cloud. This verification demonstrated substantial overlap between the modeled element and the surveyed data, ensuring a degree of geometric fidelity consistent with the objectives derived from the analysis of the current state.

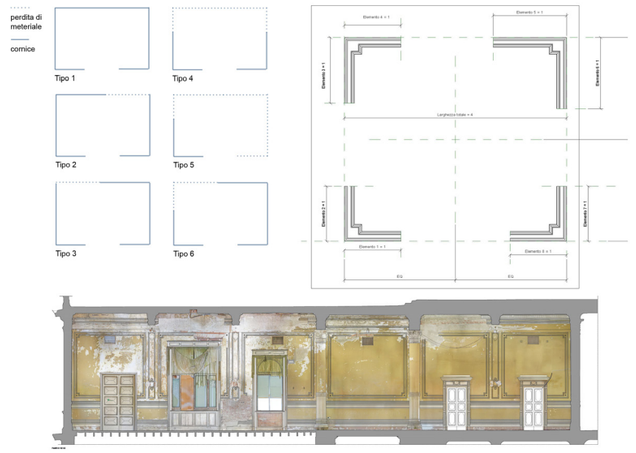


Fig. 7: Schematizzazione delle diverse condizioni dello stato di fatto della stessa cornice dovute a perdita di materiale. Modellazione e parametrizzazione. Fotopiano. Fonte: CHM_Lab, 2026.

Fig. 7: Diagram of the different conditions of the current state of the same frame due to material loss. Modeling and parameterization. Orthophoto. Source: CHM_Lab, 2026.

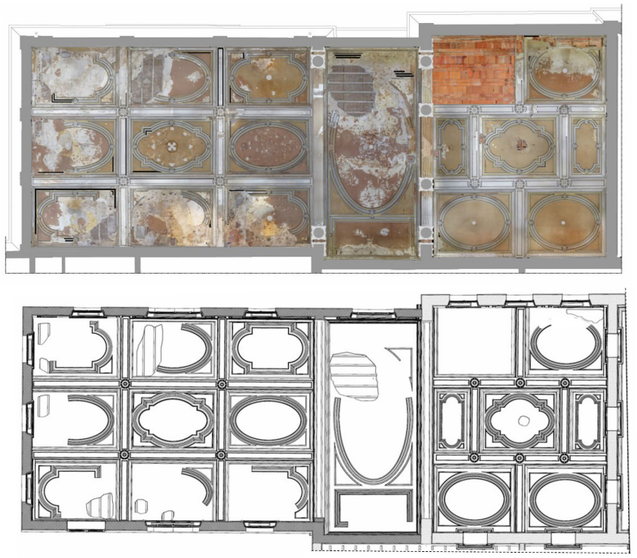


Fig. 8: Fotopiano soffitto salone principale e vista soffitto HBIM. Fonte: CHM_Lab.

Fig. 8: Orthophoto of the main hall ceiling and HBIM ceiling view. Source: CHM_Lab.

Modeling of the Decorative Apparatus via a Diagnostic Approach

The decorative apparatus of the Kursaal, extensively present in the main hall, represents one of the most valuable features of the artifact. The decorations consist of plastic painted stucco elements, predominantly depicting geometric shapes used to visually organize the large surfaces of ceilings and walls, as well as to conceal structural elements such as beams. In this instance, the modeling strategy had to account for the advanced decay of the decorations, which were significantly compromised by widespread material loss that altered their original geometry; an operational constraint that, nevertheless, provided an opportunity to test the integration of the conservation status directly within the HBIM model [Bolognesi et al., 2023]. The analysis of decay pathologies enabled the definition of the current state of conservation of the decorative apparatus in relation to material loss. Indeed, it was observed that decay tends to manifest recurrently, systematically affecting the same parts and following recurring patterns for each type of element. These

Conclusioni

Il caso Kursaal ha confermato come l'HBIM, più che un modello esaustivo, debba essere inteso come un ambiente informativo aperto, capace di integrare responsabilmente diversi livelli di approssimazione e incertezza. Questa integrazione consente di ampliare il contenuto informativo oltre i dati geometrici, garantendo una gestione unificata e completa di tutti gli aspetti morfometrici e cromatici documentati dal rilievo. L'integrazione di dataset esterni trasforma il modello HBIM in uno strumento di comunicazione avanzato, capace di veicolare informazioni complesse che risulterebbero difficilmente gestibili attraverso la sola modellazione parametrica.

Le diverse strategie di modellazione adottate sono state definite interamente sulla base di un'analisi dello stato attuale e dell'obiettivo prefissato rispetto allo standard di definizione del modello. Tale analisi ha individuato nel rilievo il supporto necessario per una comprensione critica della complessità del dato reale, guidando con consapevolezza le procedure di semplificazione insite nel modello HBIM. In definitiva, l'ottimizzazione dei processi di modellazione supera la mera restituzione geometrica per configurarsi come un'operazione di sintesi critica. Tale approccio, supportato da una rigorosa analisi semantica degli elementi, ha permesso di integrare sistematicamente lo stato di conservazione e le evidenze delle indagini diagnostiche all'interno del sistema informativo.

Bibliografia

Abreu N., Pinto A., Matos A. & Pires M. (2023). Procedural Point Cloud Modelling in Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM Applications: A Review. In *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *12(7)*, 260. https://doi.org/10.3390/ijgi12070260

Alauria S. & Baratin L. (2025). L'ascolto del tempo: la modellazione HBIM per la conservazione e la valorizzazione del patrimonio storico. in atti del *Workshop 3DModeling&BIM*. *Proliferazioni*, Roma 17-18 aprile, 28- 45. ISBN: 9788899586591. https://www.3d-modeling.it/wp-content/uploads/2025/11/WS25_INDEX.pdf

Banfi F. (2017). BIM orientation: Grades of Generation and Information for Revit families of classical architecture. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W3, 57–64. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-57-2017

Bolognesi C., Garipova A. & Cucina M. (2023). Heritage decay visible in HBIM models. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-1/W2-2023, 253–259. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlviii-1-w2-2023-253-2023

Brusaporci S. (2023). Scan-to-HBIM Reliability. Drones. https://doi.org/10.3390/DRONES7070426

Brusaporci S., Tata A. & Maiezza P. (2021). The LoH - Level of History for an Aware HBIM Process. In Arena A., Arena M., Mediati D., Raffa P. (a cura di). Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Linguaggi Distanze Tecnologie. *Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/ Connecting. Drawing for weaving relationship. Languages Distances Technologies. Proceedings of the 42th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, 2110-2118. https://doi.org/10.3280/OA-693.117

CHM_Lab (2025). *Kursaal Montecatini Terme (PT). Nomenclatura e indice degli elaborati. CHML-R00*. Dipartimento di Architettura. Università degli Studi di Firenze.

CHM_Lab (2025). Kursaal Montecatini Terme (PT). Rilievo geometrico-quotato. Abaco delle modanature interne. *CHML-RIL-T47-1-5, CHML-RIL-T48-1-5, CHML-RIL-T49-1-5*. Dipartimento di Architettura. Università degli Studi di Firenze.

Croce V., Caroti G., Piemonte A. & Bevilacqua M. (2021). From survey to semantic representation for Cultural Heritage: the 3D modeling of recurring architectural elements. *ACTA IMEKO, 10(1)*, pp. 98-108.

Li X., Teppati L. & Rinaudo F. (2025). Documentation for Architectural Heritage: A Historical Building Information Modeling Data Modeling Approach for the Valentino Castle North Wing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *14(4)*, 139. https://doi.org/10.3390/ijgi14040139

Lo Turco M., Tomalini A. & Bono J. (2023). Proportions, constraints and semantics for a parametric model. *Nexus Network Journal*, *25(1)*, 167–188. https://doi.org/10.1007/s00004-023-00667-7

Lovell L., Davies R. & Hunt D. (2023). The application of Historic Building Information Modelling (HBIM) to cultural heritage: A review. *Heritage, 6(10)*, 6691–6717. https://doi.org/10.3390/heritage6100350

Maiezza P. & Tata A. (2021). Semantic-driven analysis and classification in architectural heritage. *DISEGNARECON, 14(26)*, 1–11. https://doi.org/10.20365/disegnarecon.26.2021.9

Nieto-Julián J., Farratel J., Bouzas M. & Moyano-Campos J. (2022). The Semantic Discretization of Architectural Heritage as the Basis of a HBIM Restoration and Conservation Project. In *New Technologies in Building and Construction*, Bienvenido-Huertas, D.; Moyano-Campos, J. (eds), Springer, Singapore.

Tata A. (2022). Procedure per la Modellazione HBIM del Patrimonio Architettonico. *Pvblica Press*, pp. 133-138. https://hdl.handle.net/11697/189677

considerations guided the choice to model the decorations using loadable families, specifically employing the Generic Model. rft template. Individual decorative geometry was treated not as a single component, but as an assembly of distinct parts. By delineating the various cases, the main constituent parts (corners, top, bottom, and sides) were identified, allowing independent parameters for dimensions, material, and visibility to be assigned to each (Fig. 7).

This strategy, also effectively applied to the decorations on the ceiling of the main hall, allowed for the individual management of missing parts while maintaining the logical integrity of the element and ensuring flexible management of its representation, depending on the observed conservation status (Fig. 8). For each decorative element, geometric accuracy was ensured by using two-dimensional profiles extracted from the schedules of internal moldings [CHM_Lab, 2025]. Once imported into the parametric environment, these profiles were utilized via the "sweep" tool, which enabled the digitization phase of the element, subsequently allowing data regarding conservation, materials, and specific decay pathologies to be associated with the geometry. Furthermore, the adopted modeling strategies are aimed at the constant and effective updating of the conservation status of the Kursaal's distinctive elements, thereby facilitating monitoring and scheduled maintenance within the HBIM environment.

Conclusions

The Kursaal case study confirmed that HBIM, rather than being an exhaustive model, must be understood as an open information environment capable of responsibly integrating different levels of approximation and uncertainty. This integration allows for the expansion of information content beyond geometric data, ensuring a unified and comprehensive management of all morphometric and chromatic aspects documented by the survey. The integration of external datasets transforms the HBIM model into an advanced communication tool, capable of conveying complex information that would be difficult to manage through parametric modeling alone. The various modeling strategies adopted were defined entirely based on an analysis of the current state and the target objective regarding the model's level of definition. This analysis identified the survey as the necessary support for a critical understanding of the complexity of real-world data, consciously guiding the simplification procedures inherent to the HBIM model. Ultimately, the optimization of modeling processes transcends mere geometric restitution to configure itself as an operation of critical synthesis. This approach, supported by a rigorous semantic analysis of the elements, allowed for the systematic integration of the conservation status and diagnostic investigation evidence within the information system.

Autori

Deida Bassorizzi[1]
Vasili Manfredi[1]

[1] Politecnico di Milano

Email

deida.bassorizzi@polimi.it
vasili.manfredi@polimi.it

HBIM Open-Source per il Patrimonio Architettonico: Il Caso Studio dell'Archivio della Ca' Granda

Open-Source HBIM for Architectural Heritage: The Ca' Granda Archive Case Study

Keywords

HBIM
SCAN TO BIM
IFC CLASSIFICATION
BONSAIBIM
BLENDER

Abstract

Questo contributo presenta un flusso di lavoro HBIM open-source applicato a un interno storico di elevata complessità. Il processo integra rilievo con laser scanning mobile, elaborazione in CloudCompare, modellazione mesh in Blender e strutturazione semantica IFC tramite BonsaiBIM. L'attenzione è posta sulla fase di classificazione IFC, con la descrizione dei criteri di assegnazione delle entità e delle sfide interpretative legate al patrimonio architettonico costruito. I risultati confermano che gli strumenti open-source supportano flussi di lavoro HBIM ad alto livello di dettaglio per la documentazione, la conservazione e la gestione degli edifici.

This paper presents an open-source HBIM workflow applied to a complex historical interior. The pipeline integrates mobile laser scanning, CloudCompare, Blender mesh modelling, and IFC semantic structuring via BonsaiBIM. Focus is placed on the IFC classification phase, detailing entity assignment criteria and interpretive challenges for historic built fabric. Results confirm open-source tools support high-detail HBIM workflows for documentation, conservation, and facilities management.

Introduzione

L'*Heritage Building Information Modelling* (HBIM) si è affermato come metodologia consolidata per la documentazione digitale e la gestione dell'architettura storica. Sin dalla sua prima formulazione teorica [Murphy et al., 2009; Murphy et al., 2013; Logothetis et al., 2015], il campo si è progressivamente esteso fino a comprendere un'ampia gamma di tecniche di acquisizione della realtà, strategie di modellazione semantica e *framework* di gestione dei dati, collocandosi all'intersezione tra la pratica del rilievo, la teoria della conservazione e la scienza dell'informazione.

Il patrimonio architettonico costruito presenta condizioni fondamentalmente diverse da quelle presupposte dai flussi di lavoro BIM convenzionali: irregolarità geometrica, deformazioni strutturali accumulate nel corso dei secoli, fasi costruttive sovrapposte e sistemi ornamentali che resistono all'astrazione parametrica. Gli strumenti standard di *BIM authoring* tendono a imporre vincoli geometrici difficilmente compatibili con la complessità del costruito storico [Dore & Murphy, 2017; Brumana et al., 2018].

I flussi di lavoro *scan-to-HBIM* si sono affermati come la risposta operativa dominante a questa sfida, utilizzando nuvole di punti dense come riferimento geometrico primario per la ricostruzione digitale [Rocha et al., 2020], sebbene permangano significative difficoltà nella gestione di geometrie non ripetitive, pur preservando la coerenza semantica e l'interoperabilità con gli standard aperti.

Le piattaforme BIM proprietarie, pur offrendo ambienti di lavoro guidati e strutturati, tendono a imporre logiche di modellazione parametrica poco adatte alla complessità geometrica del patrimonio storico costruito. Gli strumenti *open-source*, e in particolare la combinazione di Blender e del *plugin* BIM Bonsai [Bonsai Development Team, 2025], hanno iniziato ad attrarre interesse della ricerca come alternativa valida. Il *plugin* Bonsai è stato recentemente impiegato in contesti di ricerca sul patrimonio per l'arricchimento semantico di modelli IFC prodotti in ambienti BIM proprietari, dimostrando la propria capacità di gestire sistemi di classificazione specifici del dominio e l'assegnazione di *property set* all'interno di un'interfaccia *open-source* [Argasiński & Tomczak, 2025].

Il flusso di lavoro qui presentato estende questo approccio adottando Blender e Bonsai non solo come livello di arricchimento semantico, ma come ambiente di modellazione principale, eliminando completamente la dipendenza da strumenti geometrici proprietari.

Questo articolo descrive un flusso di lavoro completo *open-source* di tipo *scan-to-HBIM* applicato a un complesso interno storico milanese, integrando *laser scanning* mobile, elaborazione in CloudCompare, modellazione *mesh* in Blender e strutturazione semantica in Bonsai.

Il contributo si concentra specificamente sulla fase di classificazione IFC, la più interpretivamente impegnativa e metodologicamente meno documentata dell'intero processo *scan-to-HBIM*, con l'obiettivo di fornire un quadro metodologico replicabile e contribuire al dibattito più ampio sugli standard semantici per il patrimonio architettonico.

Introduction

Heritage Building Information Modelling (HBIM) has established itself as a consolidated methodology for the digital documentation and management of historic architecture. Since its early theoretical formulation [Murphy et al., 2009; Murphy et al., 2013; Logothetis et al., 2015], the field has progressively expanded to encompass a broad range of reality capture techniques, semantic modelling strategies, and data management frameworks, positioning itself at the intersection of survey practice, conservation theory, and information science.

Historic fabric presents conditions that are fundamentally different from those assumed by conventional BIM workflows: geometric irregularity, structural drift accumulated over centuries, overlapping constructive phases, and ornamental systems that resist parametric abstraction. Standard BIM authoring tools tend to impose geometric constraints that sit uneasily with the complexity of the existing built environment [Dore & Murphy, 2017; Brumana et al., 2018]. Scan-to-HBIM workflows have emerged as the dominant operative response to this challenge, using dense point clouds as the primary geometric reference for digital reconstruction [Rocha et al., 2020], though significant challenges remain in managing non-repetitive geometries while preserving semantic coherence and interoperability with open data standards.

Proprietary BIM platforms, while offering guided, structured working environments, tend to enforce parametric modelling logics that are poorly suited to the geometric complexity of historic fabric. Open-source tools, and in particular the combination of Blender and the Bonsai BIM plugin [Bonsai Development Team, 2025], have begun to attract research interest as a viable alternative. The Bonsai plugin has recently been employed in heritage research contexts for the semantic enrichment of IFC models produced in proprietary BIM environments, demonstrating its capacity to handle domain-specific classification systems and property set assignment within an open-source interface [Argasiński & Tomczak, 2025]. The workflow presented here extends this approach by adopting Blender and Bonsai not only as a semantic enrichment layer but as the primary modelling environment, eliminating the dependency on proprietary geometric authoring tools entirely.

This paper describes a complete open-source scan-to-HBIM workflow applied to a complex historical interior in Milan, combining mobile laser scanning, CloudCompare processing, Blender mesh modelling, and Bonsai semantic structuring. The account focuses specifically on the IFC classification phase, the most interpretively demanding and methodologically underdocumented stage of the scan-to-HBIM pipeline, with the aim of providing a replicable methodological framework and contributing to the broader discussion on semantic standards for architectural heritage.

Caso Studio: l'Archivio della Ca' Granda

L'archivio storico della Ca' Granda costituisce uno dei più significativi depositi documentari nel campo della storia ospedaliera e civica italiana. Architettonicamente, le sale dell'archivio presentano un'eccezionale concentrazione di elementi decorativi e strutturali caratteristici dell'*interior design* istituzionale della fine del XIX secolo, realizzati con elevato grado di artigianalità e qualità materica (Fig. 1). Le pareti perimetrali sono interamente rivestite da un sistema di *boiserie* lignea intagliata a tutta altezza in legno scuro, comprendente un registro inferiore di pannellature e un registro superiore di alte porte di armadio, articolate ritmicamente da lesene e intagli decorativi. Questi elementi fungono da archivi chiusi, distinguendo lo spazio dal sistema di scaffalature aperte della sala archivistica più grande.

Al livello superiore, una stretta galleria corre lungo il perimetro, protetta da una balaustra leggera a motivo geometrico a reticolo e sostenuta da mensole lignee a vista. Le armadiature seguono un ritmo modulare regolare, con aperture modanate pienamente integrate nel sistema di *boiserie*.

Flusso di Lavoro

Il flusso di lavoro proposto si articola in cinque fasi sequenziali e interdipendenti: acquisizione dei dati, elaborazione della nuvola

Case Study: The Ca' Granda Archive

The historical archive of the Ca' Granda constitutes one of the most significant documentary repositories in the field of Italian hospital and civic history. Architecturally, the archive rooms present an exceptional concentration of decorative and



Fig. 1: Vista interna della sala principale di lettura dell'archivio (*Sala dell'Archivio*), Ca' Granda, Università degli Studi di Milano. Visibili: *boiserie* lignea con balaustra della galleria, volta a padiglione, stipiti intagliati delle porte e lampadario a sospensione

Fig. 1: Interior view of the main archive reading room (Sala dell'Archivio), Ca' Granda, Università degli Studi di Milano. Visible: timber *boiserie* with gallery balustrade, pavilion vault, carved door surrounds, and pendant chandelier.

di punti, integrazione nell'ambiente di modellazione, ricostruzione geometrica HBIM e strutturazione semantica IFC (Fig. 2).

Acquisizione dei Dati: Laser Scanning Mobile

Il rilievo è stato condotto con uno *scanner* laser mobile Leica BLK2GO. A differenza degli *scanner* statici a treppiede con tecnologia *phase-shift* o *time-of-flight*, il BLK2GO opera secondo il principio *SLAM* (*Simultaneous Localization and Mapping*), registrando i dati spaziali in modo continuo mentre l'operatore si muove nell'ambiente. Il risultato dell'acquisizione è una nuvola di punti pre-registrata e colorizzata in formato .BLK.

Elaborazione della Nuvola di Punti

La nuvola di punti grezza è stata inizialmente elaborata in Leica Cyclone Register 360, dove è stata verificata la registrazione multi-scansione, rimossi i valori anomali statistici e isolate e scartate le porzioni del *dataset* corrispondenti agli spazi adiacenti. Il *dataset* ripulito è stato esportato in formato .e57 per la successiva elaborazione.

L'elaborazione secondaria è stata effettuata in CloudCompare (v. 2.13), un ambiente *open-source* di gestione delle nuvole di punti. In questa fase è stato ridefinito il sistema di riferimento delle coordinate: l'origine XY è stata collocata al centro geometrico della sala e l'asse Z è stato allineato al piano stradale come quota verticale condivisa. È stato applicato un *subsampling* spaziale con una distanza minima tra i punti di 0,0001 m per ridurre il *dataset* da circa 159 milioni a circa 23 milioni di punti, preservando il dettaglio geometrico e migliorando le prestazioni computazionali nelle successive fasi di modellazione (Fig. 3).

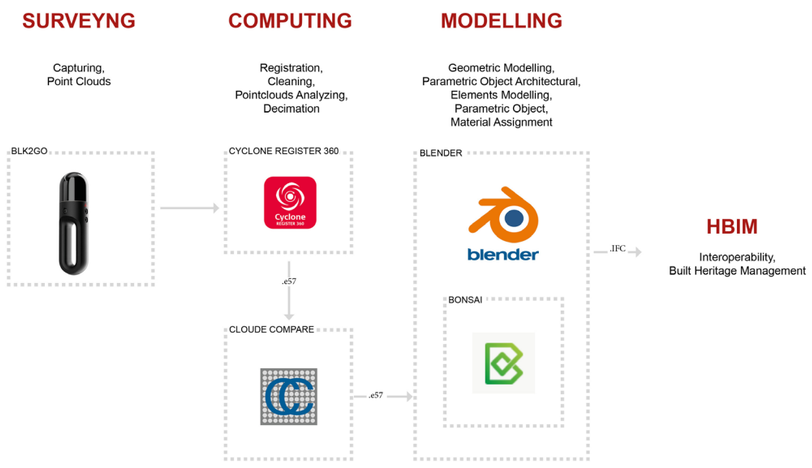


Fig. 2: Diagramma del flusso di lavoro: dall'acquisizione all'esportazione IFC.

Fig. 2: Workflow diagram: from acquisition to IFC export.

structural elements characteristic of late nineteenth-century institutional interior design, executed with a high degree of craftsmanship and material quality (Fig. 1).

The perimeter walls are entirely lined with a full-height carved timber *boiserie* system in dark wood, comprising a lower register of panelled wainscoting and an upper register of tall cupboard doors, rhythmically articulated by pilasters and decorative carving. These enclosures function as closed archival storage, distinguishing the space from the open shelving system of the larger archive hall.

At the upper level, a narrow gallery runs along the perimeter, protected by a lightweight balustrade with a geometric lattice pattern and supported by visible wooden brackets. The elevations follow a regular modular rhythm, with moulded openings fully integrated into the *boiserie* system.

Workflow

The proposed workflow is structured around five sequential and interdependent phases: data acquisition, point cloud processing, integration into the modelling environment, geometric HBIM reconstruction, and IFC semantic structuring (Fig. 2).

Data Acquisition: Mobile Laser Scanning

The survey was conducted using a Leica BLK2GO mobile laser scanner. Unlike static tripod-mounted phase-shift or time-of-flight scanners, the BLK2GO operates on a SLAM-based (Simultaneous Localization and Mapping) principle, registering spatial data continuously as the operator moves through the environment. The output of the acquisition session is a pre-registered, colourised point cloud in .BLK format.

Point Cloud Processing

The raw point cloud was first processed in Leica Cyclone Register 360, where multi-scan registration was verified, statistical outliers were removed, and portions of the dataset corresponding to adjacent spaces were isolated and discarded. The cleaned dataset was exported in .e57 format for subsequent processing.

Secondary processing was carried out in CloudCompare (v. 2.13), an open-source point cloud management environment. In this step, the coordinate reference system was redefined: the XY origin was placed at the geometric centre of the room, and the Z axis was aligned with street level as a shared vertical. A spatial subsampling with a minimum inter-point distance of 0.0001 m was applied to reduce the dataset from approximately 159 million to approximately 23 million

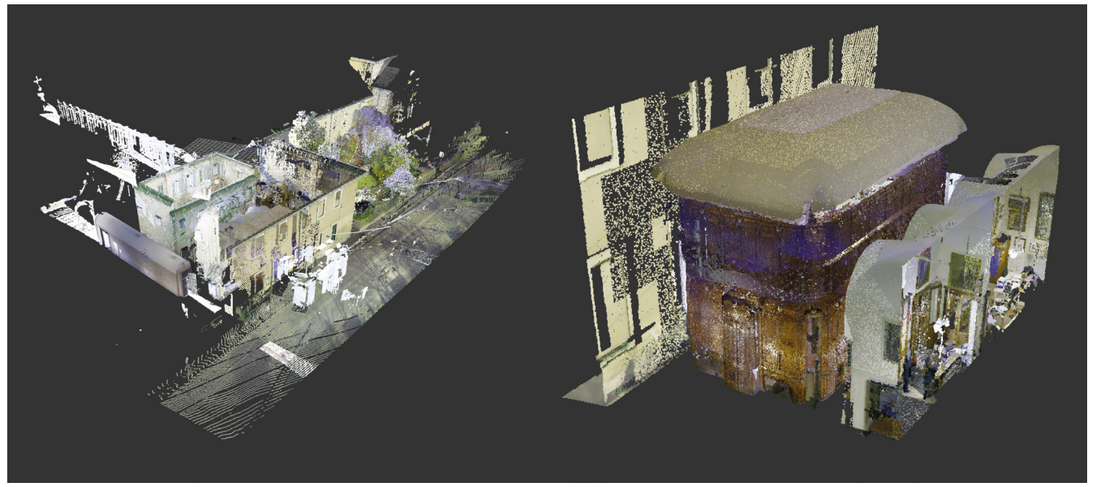


Fig. 3: Confronto tra i dati della nuvola di punti grezza e processata: rilievo originale (sinistra) e dataset ripulito e decimato (destra).

Fig. 3: Comparison between raw and processed point cloud data: original survey (left) and cleaned, decimated dataset (right)

Integrazione della Nuvola di Punti in Blender

La nuvola di punti decimata viene importata in formato .ply in Blender (v. 5.0). Anziché convertire il *dataset* in una *mesh*, si adotta un flusso di lavoro con *Geometry Nodes* per preservarla come oggetto nuvola di punti nativo, mantenendo la natura discreta e scalare dei dati. Il sezionamento è ottenuto attraverso nodi di filtraggio condizionale che generano piani di *clipping* interattivi lungo gli assi principali (XY, XZ, YZ), controllati da valori di soglia regolabili applicati alle coordinate dei punti. Ciò consente la visualizzazione selettiva di qualsiasi sottoinsieme spaziale della nuvola senza modificare il *dataset* sottostante. La nuvola di punti è assegnata a una *collection* dedicata, impostata come non renderizzabile e non selezionabile, e utilizzata esclusivamente come riferimento geometrico durante tutto il processo.

Ricostruzione Geometrica HBIM

La fase di ricostruzione geometrica costituisce il nucleo operativo del flusso di lavoro, con strategie differenziate applicate in base alla tipologia degli elementi (Fig. 5).

Pareti e solai sono stati ricostruiti estrudendo profili poligonali adattati alla geometria rilevata, preservando le deviazioni fuori piombo documentate e le variazioni continue di spessore anziché correggerle. Le travi lignee sono state approssimate dalle sezioni della nuvola di punti con una tolleranza di ±5 mm. Il sistema di scaffalature integrate a parete, l'elemento più complesso, è stato affrontato mediante una strategia ibrida modulare-adattiva: un modulo base, comprendente montanti verticali, traverse orizzontali, ripiani e pannello di fondo, è stato replicato lungo il perimetro e adattato manualmente a ogni campata, con tre varianti tipologiche definite per il piano inferiore e quattro per quello superiore, rispecchiandone l'eterogeneità geometrica; componenti di raccordo *bespoke* sono stati sviluppati alle giunzioni con gli elementi strutturali. Cornici, architravi e modanature sono stati generati estrudendo profili ricavati da più sezioni della nuvola di punti, mentre la balaustra in ferro battuto ha richiesto una modellazione

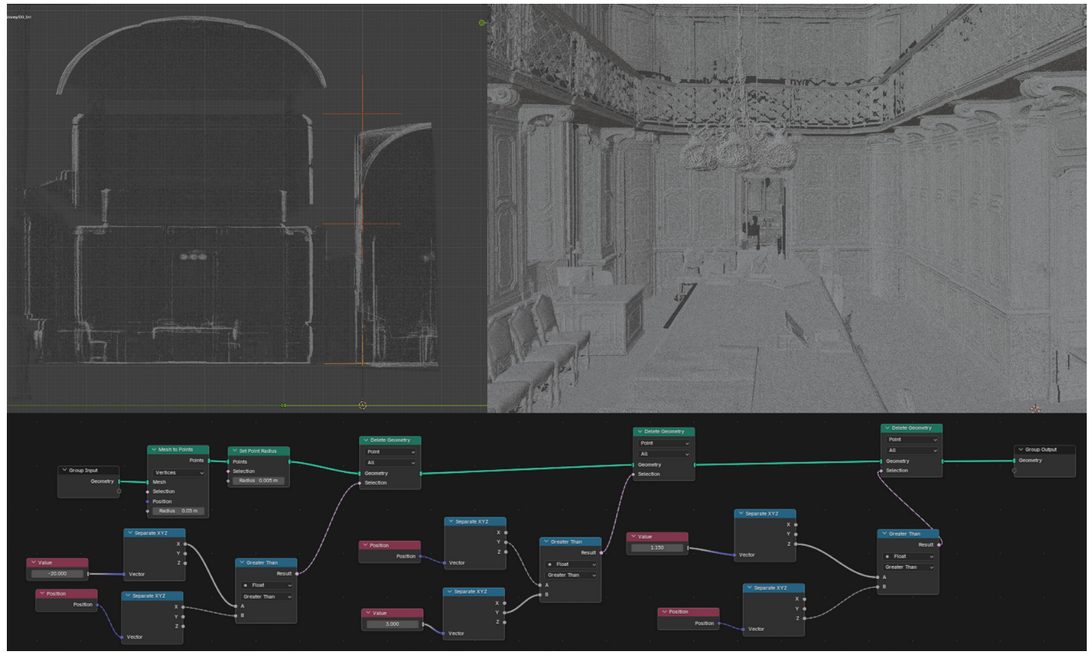


Fig. 4: Flusso di lavoro di *scripting* visuale con *Geometry Nodes* parametrici per il sezionamento interattivo della nuvola di punti e la vista risultante dopo il ritaglio.

Fig. 4: Parametric Geometry Nodes visual scripting workflow for interactive point cloud sectioning and the resulting clipped view.

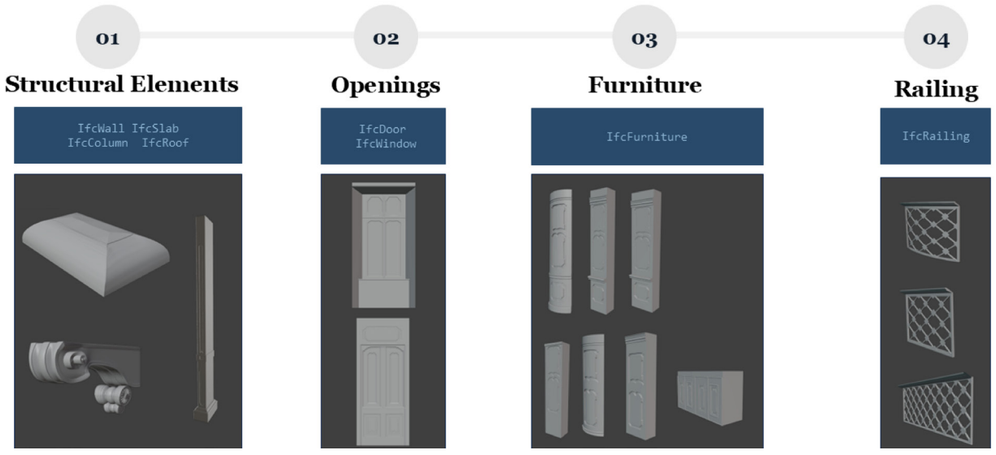


Fig. 5: Classificazione tipologica degli elementi architettonici ricostruiti e approcci di modellazione associati applicati nella fase di ricostruzione geometrica.

Fig. 5: Typological classification of reconstructed architectural elements and associated modelling approaches applied in the geometric reconstruction phase.

integralmente individuale a causa della variabilità geometrica dei singoli elementi. Porte e aperture sono state gestite tramite Bonsai BIM, generando componenti parametrici mediante sottrazione booleana dal volume murario. La volta a padiglione è stata modellata tracciando manualmente *spline* adattate alla geometria della nuvola di punti, utilizzando le sezioni generate come riferimento diretto. I profili risultanti sono stati interpolati per produrre una *mesh* continua, successivamente tassellata per soddisfare i requisiti geometrici IFC. Nel complesso, il flusso di lavoro di ricostruzione ha consentito un'integrazione coerente di elementi architettonici eterogenei preservando la precisione geometrica derivata dai dati di rilievo, come illustrato in (Fig. 6).

Classificazione IFC: Criteri e Applicazione

La strutturazione semantica del modello attraverso l'assegnazione delle entità IFC costituisce un contributo metodologico chiave di questo flusso di lavoro. Il *plugin* BonsaiBIM, che integra nativamente lo schema IFC, le classi di entità, i *property set* e la gerarchia spaziale possono essere definiti e modificati *in-place*, senza esportare il modello in ambienti *software* esterni. (Tab. 1) riassume le classi di entità IFC assegnate agli elementi del modello, indicando il numero di istanze modellate, le caratteristiche geometriche principali e le note di classificazione pertinenti. La

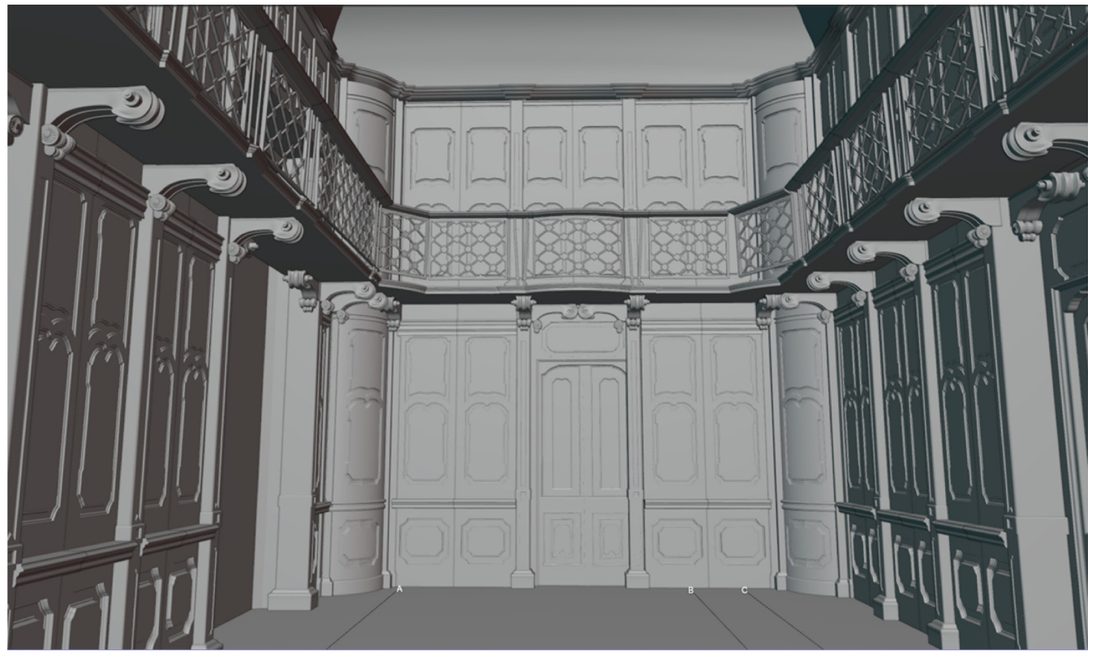


Fig. 6: Visualizzazione tridimensionale dell'ambiente architettonico finale ricostruito risultante dal processo di modellazione geometrica.

Fig. 6: Three-dimensional visualisation of the final reconstructed architectural environment resulting from the geometric modelling process.

points, preserving geometric detail while improving computational performance in subsequent modelling phases (Fig. 3).

Point Cloud Integration in Blender

The decimated point cloud is imported in .ply format into Blender (v. 5.0). Rather than converting the dataset into a mesh, a Geometry Nodes workflow is adopted to preserve it as a native point cloud object, maintaining the discrete and scalar nature of the data. Sectioning is achieved through conditional filtering nodes that generate interactive clipping planes along the principal axes (XY, XZ, YZ), controlled by adjustable threshold values applied to point coordinates. This allows selective visualization of any spatial subset of the cloud without altering the underlying dataset. The point cloud is assigned to a dedicated collection, set as non-renderable and non-selectable, and used solely as a geometric reference throughout the process.

Geometric HBIM Reconstruction

The geometric reconstruction phase constitutes the operative core of the workflow,

strategia di classificazione privilegia la coerenza semantica rispetto alla conformità letterale: quando un elemento storico poteva essere affidabilmente mappato a una classe IFC sulla base della sua funzione o posizione spaziale, tale mappatura è stata preferita; quando la corrispondenza era genuinamente ambigua, la decisione interpretiva è stata documentata nell'attributo *Description* dell'elemento. Questo approccio riflette una sfida riconosciuta nella pratica HBIM. Lo schema IFC, formalizzato come

Categoria	Classe IFC	Elemento Architettonico	Note Geometriche
Strutturale	IfcWall	Pareti perimetrali e divisorie	Pianta irregolare, spessore variabile
Strutturale	IfcSlab	Solaio	Piano terra e livello ammezzato
Strutturale	IfcRoof	Volta a padiglione (intradosso)	Modellata in Blender; successivamente convertita in oggetto IFC tramite Bonsai BIM mediante tassellazione geometrica
Strutturale	IfcColumn	Lesene lignee	Elementi verticali decorativi-strutturali; classificati come colonne sulla base della corrispondenza geometrica e posizionale
Strutturale	IfcBeam	Travi lignee della galleria al piano ammezzato	Modellate in Blender; successivamente convertite in oggetti IFC tramite Bonsai BIM mediante tassellazione geometrica
Arredo	IfcFurniture	Corpo inferiore delle scaffalature lignee a parete	Sistema modulare; 3 tipologie di modulo distinte per adattarsi alla variazione geometrica tra campate
Arredo	IfcFurniture	Corpo superiore delle scaffalature lignee a parete	Continuo con il livello della galleria; 4 tipologie di modulo distinte
Apertura	IfcDoor	Porte principali e porte interne	Telaio e anta modellati separatamente
Apertura	IfcWindow	Finestre rettangolari	Elemento finestra modellato come componente parametrico integrato nel sistema murario, con geometria definita dai vincoli dell'apertura.
Decorativo	IfcRailing	Balaustra in ferro battuto	Modellata in Blender; successivamente convertita in oggetto IFC tramite Bonsai BIM mediante tassellazione geometrica
Circolazione	IfcStair	Scala di accesso alla galleria	Pedate irregolari; altezza delle alzate variabile
Circolazione	IfcRailing	Corrimano della scala	Collegato a IfcStair; profilo estruso
Finitura	IfcCovering	Finitura del pavimento	Modellata come strato di copertura sul solaio strutturale

Tab. 1: Schema di classificazione IFC per gli elementi del modello HBIM.

with differentiated strategies applied according to element typology (Fig. 5).

Walls and slabs were reconstructed by extruding polygonal profiles adapted to the surveyed geometry, preserving documented out-of-plumb deviations and continuous thickness variations rather than correcting them. Timber beams were approximated

Category	IFC Class	Architectural Element	Geometric Notes
Structural	IfcWall	Perimeter and partition walls	Irregular plan, variable thickness
Structural	IfcSlab	Floor slab	Ground floor and mezzanine level
Structural	IfcRoof	Pavilion vault (intrados)	Modelled in Blender; subsequently converted into an IFC object via Bonsai BIM through geometric tessellation
Structural	IfcColumn	Timber pilasters	Vertical decorative-structural elements; classified as columns on the basis of their geometric and positional correspondence
Structural	IfcBeam	Timber beams of the mezzanine gallery	Modelled in Blender; subsequently converted into an IFC object via Bonsai BIM through geometric tessellation
Furnishing	IfcFurniture	Wall-integrated timber shelving lower body	Modular system; 3 distinct module typologies to accommodate geometric variation across bays
Furnishing	IfcFurniture	Wall-integrated timber shelving upper body	Continuous with gallery level; 4 distinct module typologies
Opening	IfcDoor	Main doors and internal doors	Frame and leaf modelled separately
Opening	IfcWindow	Rectangular windows	Window element modelled as a parametric component integrated within the wall system, with geometry defined by the opening constraints.
Decorative	IfcRailing	Iron balustrade	Modelled in Blender; subsequently converted into an IFC object via Bonsai BIM through geometric tessellation
Circulation	IfcStair	Access staircase to gallery	Irregular treads
Circulation	IfcRailing	Stair handrail	Linked to IfcStair; extruded profile
Finishing	IfcCovering	Floor finishing	Modelled as covering layer over structural slab

Tab. 1: IFC classification schema for the HBIM model elements

ISO 16739-1:2018 [International Organization for Standardization, 2018], costituisce lo standard aperto internazionalmente riconosciuto per la descrizione e lo scambio di informazioni sugli edifici, ma è stato concepito principalmente per il settore delle costruzioni contemporanee e non fornisce criteri di classificazione regolamentati per gli edifici storici esistenti [Diara & Rinaudo, 2020].

In assenza di classi di entità specifiche per il patrimonio, l'assegnazione di tipi IFC agli elementi architettonici storici comporta necessariamente scelte interpretive che non possono essere pienamente risolte attraverso l'applicazione meccanica dello standard, e che richiedono pertanto un'esplicita documentazione come parte della metodologia di modellazione.

from point cloud sections with a tolerance of ±5 mm. The wall-integrated shelving system, the most complex element, was approached through a hybrid modular-adaptive strategy: a base module, comprising vertical stiles, horizontal rails, shelf boards, and back panel, was replicated along the perimeter and manually adjusted at each bay, with three typological variants defined for the lower floor and four for the upper, reflecting their geometric heterogeneity; bespoke transition components were

Discussione

Il flusso di lavoro dimostra che gli strumenti *open-source* possono supportare *pipeline* HBIM con una qualità geometrica e semantica paragonabile alle alternative proprietarie. Il paradigma basato su *mesh* di Blender è intrinsecamente più adatto alle geometrie irregolari del patrimonio storico costruito rispetto alle librerie di oggetti parametrici dei *software* proprietari, che tendono a imporre una regolarizzazione geometrica. L'integrazione IFC nativa in BonsaiBIM elimina i passaggi intermedi di conversione, producendo file conformi a IFC 4 accessibili su tutti i principali *viewer* e piattaforme. L'assenza di costi di licenza abbassa sostanzialmente la soglia di accesso per istituzioni e gruppi di ricerca che operano in contesti con risorse limitate, rendendo praticabile l'apprendimento autonomo. I formati aperti migliorano ulteriormente le condizioni di condivisione dei dati con le pubbliche amministrazioni e gli enti del patrimonio, che si trovano frequentemente di fronte a barriere di compatibilità e licenza nell'accesso a modelli prodotti con strumenti commerciali. Infine, le API Python esposte da Blender, CloudCompare e BonsaiBIM, insieme a IfcOpenShell, consentono l'automazione di attività ripetitive e l'interrogazione programmatica del modello, aprendo a una potenziale integrazione con banche dati esterne o sistemi di gestione della conservazione.

Limitazioni

Il flusso di lavoro presenta diverse limitazioni che ne definiscono i margini operativi di utilizzo, strettamente connesse al livello di competenza tecnica richiesto, alla complessità dei dati e alla scala del progetto. La ripida curva di apprendimento richiede una competenza specialistica in Blender, BonsaiBIM, CloudCompare e nel modello dati IFC, che va ben oltre la formazione standard in BIM o rilievo del patrimonio. L'assenza di *template* predefiniti e dizionari di dati condivisi scarica sull'operatore la piena responsabilità della coerenza semantica, con conseguenti rischi per l'interoperabilità del modello. La coesistenza di geometria *mesh* ed entità IFC richiede protocolli di gestione sistematici, in particolare in contesti collaborativi. La scalabilità rimane una preoccupazione per modelli di maggiori dimensioni, mitigabile attraverso strategie di modellazione federata. Infine, lo schema IFC stesso non è stato concepito per il patrimonio costruito storico: l'assenza di classi specifiche per il patrimonio costringe a soluzioni interpretive che introducono imprecisioni semantiche, una sfida per l'intera comunità di documentazione, indipendente dalla scelta della *toolchain*. Queste limitazioni non invalidano il flusso di lavoro, ma ne circoscrivono l'applicazione responsabile ai contesti in cui un'adeguata competenza, protocolli chiari e un'appropriata complessità del progetto giustificano l'adozione di un ambiente flessibile e non standardizzato.

Conclusioni

Questo contributo ha presentato e discusso criticamente un flusso di lavoro *open-source* di tipo *scan-to-HBIM* applicato a un interno storico complesso caratterizzato da una stratificazione di tessuto architettonico e decorativo. L'integrazione di *laser scanning* mobile, elaborazione in CloudCompare, modellazione *mesh* in Blender e strutturazione semantica in BonsaiBIM si è dimostrata tecnicamente valida e produttiva, generando un modello a LOD 300–350 con classificazione IFC, categorie materiali, convenzioni di denominazione e *property set* specifici per il patrimonio.

Il contributo metodologico più significativo è la discussione sistematica della classificazione IFC per gli elementi architettonici storici: la proposta di una convenzione di denominazione strutturata, di un *property set* personalizzato per il patrimonio e di criteri espliciti per la gestione delle ambiguità semantiche fornisce un quadro concreto per ricercatori e professionisti che operano in questo dominio.

Gli strumenti open-source, pur richiedendo un elevato livello di competenza tecnica, offrono un grado di flessibilità geometrica e trasparenza dei dati che li rende particolarmente adatti alla ricerca applicata sul patrimonio. Il flusso di lavoro qui descritto non è concepito come una procedura rigida ma come un quadro metodologico adattabile, fondato sull'interoperabilità tra strumenti aperti e sull'allineamento con gli standard internazionali sui dati.

La visione più ampia che sottende questo lavoro è quella dell'HBIM come un'infrastruttura informativa aperta e condivisibile, capace di supportare l'intero ciclo di vita del patrimonio architettonico, dalla fase iniziale di rilievo e documentazione attraverso la gestione attiva della conservazione fino alla trasmissione culturale a lungo termine.

Bibliografia

Argasiński K., & Tomczak A. (2025). Enhancing Semantic Interoperability of Heritage BIM-Based Asset Preservation. In *Heritage*, n. 8(10), art. 410. *https://doi.org/10.3390/heritage8100410*

Bonsai Development Team. (2025). *Bonsai — Open Source IFC Authoring for Blender* (Version 0.8.4). IfcOpenShell Project. *https://bonsaibim.org*

Brumana R., Della Torre S., Previtali M., Barazzetti L., Cantini L., Oreni D., & Banfi F. (2018). Generative HBIM modelling to embody complexity (LOD, LOG, LOA, LOI): surveying, preservation, site intervention — the Basilica di Collemaggio (L'Aquila). In *Applied Geomatics*, n. 10(4), pp. 545–567.

Diara F., & Rinaudo F. (2020). IFC Classification for FOSS HBIM: Open Issues and a Schema Proposal for Cultural Heritage Assets. In *Applied Sciences*, n. 10(23), art. 8320. *https://doi.org/10.3390/app10238320*

Dore C., & Murphy M. (2017). Current state of the art Historic Building Information Modelling. In *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. XLII-2/W5, pp. 185–192.

International Organization for Standardization. (2018). *Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries — Part 1: Data Schema* (ISO Standard No. 16739-1:2018). *https://www.iso.org/standard/70303.html*

developed at junctions with structural elements. Cornices, architraves, and mouldings were generated by extruding profiles drawn from multiple point cloud cross-sections, while the wrought-iron balustrade required fully individual modelling due to the geometric variability of individual balusters. Doors and openings were managed through Bonsai BIM, generating parametric components via Boolean subtraction from the masonry volume. The pavilion vault is modelled by manually tracing splines fitted to the point cloud geometry, using the generated sections as a direct reference. The resulting profiles are interpolated to produce a continuous mesh, which is then tessellated to meet IFC geometric requirements. Overall, the reconstruction workflow enabled a consistent integration of heterogeneous architectural elements while preserving geometric accuracy derived from the survey data, as illustrated in (Fig. 6).

IFC Classification: Criteria and Application

The semantic structuring of the model through IFC entity assignment constitutes a key methodological contribution of this workflow. The BonsaiBIM add-on, which natively integrates the IFC schema, entity classes, property sets, and spatial hierarchy can be defined and edited in-place, without exporting the model to external software environments. (Tab. 1) summarises the IFC entity classes assigned to the elements of the model, indicating the number of instances modelled, key geometric characteristics, and relevant classification notes. The classification strategy prioritises semantic coherence over literal compliance: when a historic element could be reliably mapped to an IFC class on the basis of its function or spatial position, that mapping was preferred; when correspondence was genuinely ambiguous, the interpretive decision was documented in the Description attribute of the element. This approach reflects a recognised challenge in HBIM practice. The IFC schema, formalised as ISO 16739-1:2018 [International Organization for Standardization, 2018], constitutes the internationally recognised open standard for the description and exchange of building information, but was conceived primarily for the contemporary construction industry and does not provide regularised classification criteria for historic existing buildings [Diara & Rinaudo, 2020]. In the absence of heritage-specific entity classes, the assignment of IFC types to historic architectural elements necessarily involves interpretive choices that cannot be fully resolved through mechanical application of the standard, and that therefore require explicit documentation as part of the modelling methodology.

Discussion

The workflow demonstrates that open-source tools can support HBIM pipelines at a geometric and semantic quality comparable to proprietary alternatives. Blender's mesh-based paradigm is inherently better suited to the irregular geometries of historic fabric than the parametric object libraries of proprietary, which tend to enforce geometric regularisation. Native IFC integration in BonsaiBIM eliminates intermediate conversion steps, producing IFC 4-compliant files accessible across all major viewers and platforms. The absence of licensing costs substantially lowers the entry threshold for institutions and research groups operating in resource-constrained contexts makes self-directed learning practicable. Open formats further improve data-sharing conditions with public administrations and heritage bodies, which frequently face compatibility and licensing barriers when accessing models produced with commercial tools. Finally, the Python APIs exposed by Blender, CloudCompare, and BonsaiBIM, together with IfcOpenShell, allow automation of repetitive tasks and programmatic model querying, enabling potential integration with external databases or conservation management systems.

Limitations

The workflow presents several limitations that define its operational margins of use, which are closely related to the required level of technical expertise, data complexity, and project scale. The steep learning curve demands specialised proficiency in Blender, BonsaiBIM, CloudCompare, and the IFC data model, exceeding standard BIM or heritage survey training.

Logothetis S., Delinasiou A., & Stylianidis E. (2015). Building Information Modelling for cultural heritage: a review. In *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. II-5/W3, pp. 177–183.

Murphy M., McGovern E., & Pavia S. (2009). Historic Building Information Modelling (HBIM). In *Structural Survey*, n. 27(4), pp. 311–327.

Murphy M., McGovern E., & Pavia S. (2013). Historic Building Information Modelling — Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n. 76, pp. 89–102.

Rocha G., Mateus L., Fernández J., & Ferreira V. (2020). A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. In *Heritage*, n. 3(1), pp. 47–67. https://doi.org/10.3390/HERITAGE3010004

The absence of predefined templates and shared data dictionaries shifts full responsibility for semantic consistency onto the operator, with consequent risks for model interoperability. The coexistence of mesh geometry and IFC entities requires systematic management protocols, particularly in collaborative settings. Scalability remains a concern for larger models, mitigable through federated modelling strategies. Finally, the IFC schema itself was not conceived for historic built fabric: the absence of heritage-specific classes forces interpretive workarounds that introduce semantic imprecision, a challenge for the broader documentation community, independent of toolchain choice. These limitations do not invalidate the workflow but circumscribe its responsible application to contexts where adequate expertise, clear protocols, and appropriate project complexity justify the adoption of a flexible, non-standardised environment.

Conclusions

This paper has presented and critically discussed an open-source scan-to-HBIM workflow applied to a complex historical interior characterised by layered architectural and decorative fabric. The integration of mobile laser scanning, CloudCompare processing, Blender mesh modelling, and BonsaiBIM semantic structuring has proven technically viable and productive, generating a model at LOD 300–350 with a IFC classification, material categories, naming conventions, and heritage-specific property sets. The most significant methodological contribution is the systematic discussion of IFC classification for historic architectural elements: the proposal of a structured naming convention, a custom heritage property set, and explicit criteria for managing semantic ambiguities provides a concrete framework for researchers and practitioners working in this domain. Open-source tools, while demanding in terms of technical expertise, offer a degree of geometric flexibility and data transparency that makes them well suited to applied heritage research. The workflow described here is not conceived as a rigid procedure but as an adaptable methodological framework, grounded in interoperability between open tools and alignment with international data standards.

The broader vision underpinning this work is one of HBIM as an open, shareable information infrastructure capable of supporting the full life cycle of architectural heritage, from initial survey and documentation through active conservation management to long-term cultural transmission.

Autori

Chadi El Khoury[1]
Elena Gigliarelli[1]
Luciano Cessari[1]

Email

chadielkhoury@cnr.it
elena.gigliarelli@cnr.it
luciano.cessari@cnr.it

[1] Consiglio Nazionale delle Ricerche – ISPC, Roma, Italia / Rome, Italy

Algoritmi VPL per l'HBIM: Automazione e Modellazione Parametrica della Kasbah di Mehdya

VPL-Based Algorithms for HBIM: Automation and Parametric Modeling of the Kasbah of Mehdya

Keywords

HBIM
SCAN-TO-BIM
PARAMETRIC MODELING
VISUAL PROGRAMMING LANGUAGE
CULTURAL HERITAGE

Abstract

Il contributo presenta un *workflow* scan-to-HBIM per la *Kasbah* di Mehdya (Marocco), sviluppato nel progetto MAECI del CNR-ISPC con l'UIR. Un algoritmo VPL in Grasshopper ricostruisce semi-automaticamente pareti ed elementi strutturali dalla nuvola di punti mediante sezionatura adattiva e superfici *best-fit*, poi convertiti in oggetti BIM conformi a IFC con VisualARQ. La validazione C2M mostra una coerenza entro ±3 cm, riducendo la modellazione manuale e preservando la fedeltà morfologica.

This paper presents a scan-to-HBIM workflow for the *Kasbah* of Mehdya (Morocco), developed within a MAECI-funded project led by CNR-ISPC with UIR. A custom VPL algorithm in Grasshopper semi-automatically reconstructs walls and structural elements from the point cloud through adaptive sectioning and best-fit surfaces, then converts them into IFC-compliant BIM objects via VisualARQ. C2M validation shows consistency within ±3 cm, reducing manual modeling while preserving morphological fidelity.

Introduzione

Nell'ultimo decennio, le metodologie scan-to-HBIM sono diventate un campo di ricerca centrale per la documentazione digitale del patrimonio culturale. L'integrazione delle tecnologie di rilievo 3D con gli ambienti di *Building Information Modeling* (BIM) consente la creazione di modelli ricchi di informazioni, in grado di supportare la pianificazione della conservazione, l'analisi strutturale e la gestione del patrimonio. Diversi studi hanno esplorato strategie automatizzate e semi-automatizzate per convertire nuvole di punti in modelli BIM [Murphy et al., 2013; Avena et al., 2024; Salah et al., 2025], riducendo progressivamente il divario tra i dati grezzi del rilievo e le rappresentazioni digitali semanticamente strutturate.

Tuttavia, nonostante questi progressi, la ricostruzione di geometrie storiche irregolari rimane una sfida significativa. Gli approcci HBIM standard si basano ampiamente su famiglie parametriche predefinite — librerie di oggetti standardizzati progettati principalmente per le costruzioni contemporanee — che si adattano mal alla complessità morfologica, all'eterogeneità materiale e ai *pattern* di deformazione caratteristici della muratura storica [Liu & Li, 2024]. Ne consegue che la fase finale di modellazione richiede ancora un eccessivo sforzo di interpretazione e correzione manuale, limitando la scalabilità e la riproducibilità dei *workflow scan-to*-HBIM in contesti di patrimonio.

Questa limitazione è particolarmente evidente nelle *kasbah* marocchine tradizionali, le cui costruzioni in terra e pietra presentano morfologie complesse, pareti che si discostano significativamente dalla verticalità, e configurazioni strutturali irregolari risultanti da secoli di costruzione, riparazione e crollo parziale. La documentazione di tali strutture attraverso *workflow* HBIM convenzionali è al tempo stesso dispendiosa in termini di tempo e soggetta ad approssimazioni geometriche.

La Kasbah di Mehdya è stata selezionata come caso studio pilota nell'ambito del progetto "Studio, Conservazione e Valorizzazione delle *kasbah* in Marocco", finanziato dal MAECI e condotto dal CNR-ISPC in collaborazione con l'UIR. Il progetto mira a testare e dimostrare strategie computazionali capaci di supportare la transizione dai dati di rilievo ai modelli HBIM attraverso strumenti di modellazione algoritmica.

Situata sulla costa atlantica, vicino alla foce del fiume Sebou, la *kasbah* è un complesso sito fortificato contraddistinto da una lunga e stratificata storia. Le sue origini e le prime fasi rimangono dibattute, mentre la sua configurazione attuale riflette le principali trasformazioni avvenute durante i periodi iberico e alauita, in particolare tra il XVII e il XVIII secolo. Il suo sviluppo storico precoce è stato recentemente ricostruito attraverso l'analisi combinata di fonti storiche, stratigrafia, studi comparativi e rilievo digitale (Gigliarelli et al., 2026).

Basandosi su questo lavoro precedente, il presente studio estende il *framework* di rilievo multiscala e interpretativo verso un *workflow* VPL per la modellazione algoritmica e la ricostruzione parametrica di elementi architettonici irregolari. Il sito include mura di cinta, torri, una moschea con minareto, un complesso palatino e un'estesa infrastruttura idraulica. Oggi è interessato da un significativo degrado strutturale, rendendo la documentazione digitale una priorità urgente per la conservazione e la futura valorizzazione.

La ricerca propone un *workflow* computazionale VPL personalizzato sviluppato in Grasshopper che affronta le specifiche sfide geometriche dell'architettura storica in terra e pietra. Invece di adattare i dati di rilievo a famiglie BIM predefinite, l'approccio proposto deriva algoritmicamente la geometria BIM dai dati di rilievo stessi, producendo elementi parametrici che rappresentano fedelmente la morfologia reale e irregolare del manufatto esistente.

Introduction

Over the last decade, scan-to-HBIM methodologies have become a central research field for the digital documentation of cultural heritage. The integration of 3D survey technologies and Building Information Modeling (BIM) environments enables the creation of information-rich models capable of supporting conservation planning, structural analysis, and heritage management. Several studies have explored automated and semi-automated strategies for converting point clouds into BIM models [Murphy et al., 2013; Avena et al., 2024; Salah et al., 2025], progressively narrowing the gap between raw survey data and semantically structured digital representations.

However, despite these advances, the reconstruction of irregular historical geometries remains a significant challenge. Standard HBIM approaches rely heavily on predefined parametric families — standardized object libraries designed primarily for contemporary construction — which are poorly suited to the morphological complexity, material heterogeneity, and deformation patterns characteristic of historic masonry [Liu & Li, 2024]. The result is that the final modeling stage still requires a disproportionate amount of manual interpretation and correction effort, limiting the scalability and reproducibility of scan-to-HBIM pipelines in heritage contexts.

This limitation is particularly evident in traditional Moroccan Kasbahs, whose earthen and stone constructions present complex morphologies, walls that deviate significantly from verticality, and irregular structural configurations resulting from centuries of construction, repair, and partial collapse. The documentation of such structures through conventional HBIM workflows is both time-consuming and prone to geometric approximation.

The Kasbah of Mehdya was selected as a pilot case study within the framework of the project "Study, Conservation and Valorisation of the Kasbahs in Morocco", funded by the Italian Ministry of Foreign Affairs and International Cooperation, MAECI, and carried out by CNR-ISPC in collaboration with the International University of Rabat (UIR). The project aims to test and demonstrate computational strategies capable of supporting the transition from survey data to HBIM models through algorithmic modelling tools.

Strategia di Rilievo ed Elaborazione dei Dati

Strategia di Acquisizione Multiscala

Il *dataset* 3D è stato acquisito attraverso una strategia di rilievo multiscala (Fig. 1) che combina scansione LiDAR SLAM portabile, fotogrammetria sferica e fotogrammetria UAV, scelte per le loro complementari capacità nel catturare i volumi spaziali, la morfologia irregolare e la texture materica della Kasbah. Il rilievo geometrico primario è stato effettuato con il GeoSLAM ZEB Horizon, uno *scanner* LiDAR SLAM portabile che consente un'acquisizione rapida e continua di nuvole di punti tridimensionali mentre l'operatore si muove nel sito. Questo approccio si è rivelato particolarmente adatto agli spazi interni strutturalmente compromessi del complesso palatino e della moschea, dove le configurazioni con *scanner* statici sarebbero state impraticabili e dispendiose in termini di tempo.

In parallelo, è stata eseguita la fotogrammetria sferica con una fotocamera omnidirezionale Insta360 Pro 2. Le immagini panoramiche sferiche sono state acquisite a intervalli sistematici in tutto il sito ed elaborate in Agisoft Metashape Pro per generare dense nuvole di punti fotogrammetriche ad alta fedeltà radiometrica. Questi *dataset* hanno arricchito i dati geometrici con informazioni cromatiche e materiche — *texture*, finitura superficiale e *pattern* di degrado — essenziali per la valutazione della conservazione e la visualizzazione fotorealistica. La fotogrammetria UAV con un DJI Phantom 4 Pro è stata inoltre impiegata per le facciate esterne e le mura di cinta, fornendo copertura nadir e obliqua delle superfici inaccessibili a livello del suolo.

Registrazione della Nuvola di Punti e Controllo della Qualità

Le nuvole di punti acquisite dai diversi sistemi sensori sono state allineate e registrate utilizzando l'algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP) implementato in CloudCompare. Prima della registrazione, è stato eseguito un allineamento grossolano manuale utilizzando caratteristiche geometriche identificabili comuni ai *dataset* sovrapposti. La registrazione ICP finale ha raggiunto residui sub-centimetrici, garantendo la coerenza metrica del *dataset* integrato.

Un'analisi della rugosità è stata eseguita in CloudCompare per valutare la variabilità geometrica locale della nuvola di punti registrata. Questa analisi ha servito un duplice scopo: quantificare i livelli di rumore del sensore per guidare le soglie di elaborazione successive, e identificare irregolarità superficiali strutturalmente significative — rigonfiamenti, fessurazioni e deformazioni — rilevanti per la valutazione della conservazione. Le mappe di rugosità sono state conservate come prodotti di documentazione accanto al modello geometrico, fornendo un registro spazialmente continuo delle condizioni superficiali difficile da catturare con i metodi di ispezione convenzionali.

Survey Strategy and Data Processing

Multi-Scale Acquisition Strategy

The 3D dataset was acquired through a multi-scale survey strategy combining handheld SLAM-based LiDAR scanning, and spherical photogrammetry, and UAV photogrammetry (Fig. 1) chosen for their complementary strengths in capturing the spatial volumes and irregular morphology, and

Located on the Atlantic coast, near the mouth of the Sebou River, the Kasbah is a complex fortified site marked by a long and stratified history. Its origins and early phases remain debated, while its current configuration reflects major transformations carried out during the Iberian and Alaouite periods, particularly between the seventeenth and eighteenth centuries. Its early historical development has recently been reconstructed through the combined analysis of historical sources, stratigraphy, comparative studies and digital survey (Gigliarelli et al., 2026).

Building on this previous work, the present study extends the multiscale survey and interpretative framework towards a VPL-based workflow for the algorithmic modelling and parametric reconstruction of irregular architectural elements. The site includes enclosure walls, towers, and a mosque with minaret, a palace complex and an extensive hydraulic infrastructure. Today, it is affected by significant structural deterioration, making digital documentation an urgent priority for conservation and future valorisation.

The research proposes a custom VPL-based computational workflow developed in Grasshopper that addresses the specific geometric challenges of earthen and stone heritage architecture. Rather than adapting survey data to fit predefined BIM families, the proposed approach derives BIM geometry algorithmically from the survey data itself, producing parametric elements that faithfully represent the actual, irregular morphology of the existing fabric.

The present VPL-based workflow builds upon the multiscale survey and HBIM-GIS framework previously developed for the Kasbah of Mehdya, extending it towards algorithmic modelling and parametric reconstruction of irregular architectural elements [Gigliarelli et al., 2026].

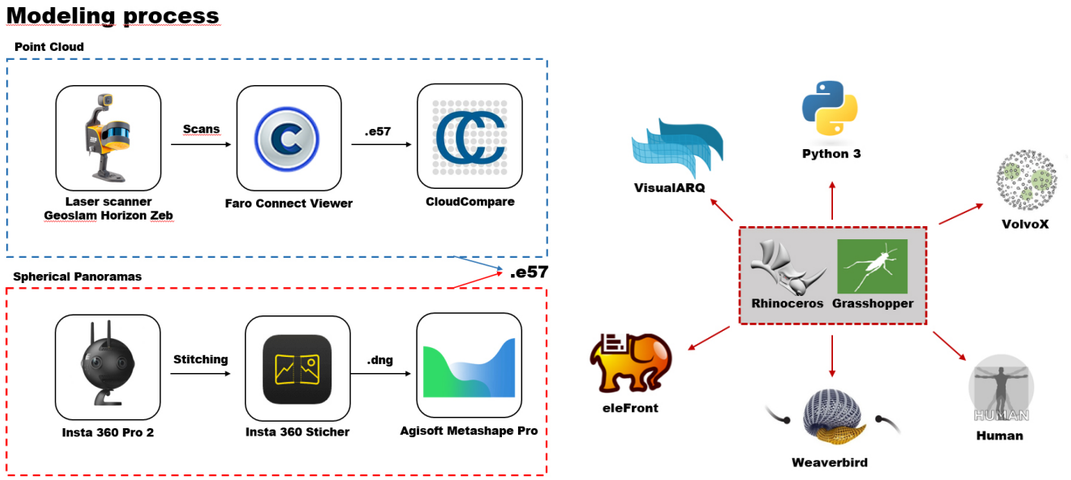


Fig. 1: *Workflow* metodologico *Scan-to*-HBIM proposto. (Sinistra) Acquisizione dati e pre-elaborazione: integrazione multi-sensore di dati LiDAR (GeoSLAM Zeb Horizon) e panorami sferici fotogrammetrici (Insta360 Pro 2) tramite FARO Connect, CloudCompare e Agisoft Metashape. (Destra) Fase di modellazione parametrica: *pipeline* VPL personalizzata in Grasshopper che utilizza Volvox per la voxelizzazione e il sottocampionamento della nuvola di punti, VisualARQ per la generazione di oggetti BIM semantici nell'ambiente Rhinoceros, e *plug-in* specializzati aggiuntivi per gestire l'interoperabilità e gli attributi avanzati dei dati.

Fig. 1: Proposed Scan-to-HBIM methodological workflow. (Left) Data acquisition and pre-processing: multi-sensor integration of LiDAR data (GeoSLAM Zeb Horizon) and photogrammetric spherical panoramas (Insta360 Pro 2) via FARO Connect, CloudCompare, and Agisoft Metashape. (Right) Parametric modeling stage: custom VPL pipeline in Grasshopper utilizing Volvox for point cloud voxelization and downsampling, VisualARQ for the generation of semantic BIM objects within the Rhinoceros environment, and additional specialized plug-ins to manage interoperability and advanced data attributes.

Modellazione Algoritmica (VPL) per l'HBIM

Ambiente Computazionale

L'ambiente di modellazione HBIM è stato costruito su Rhinoceros 3D e Grasshopper come piattaforma VPL centrale, esteso attraverso un ecosistema di *plugin* dedicati. La scelta di un ambiente VPL rispetto agli strumenti BIM convenzionali è motivata dalla necessità di piena programmabilità geometrica: la capacità di definire algoritmi personalizzati per l'estrazione della geometria, il *fitting* delle superfici e la generazione di elementi BIM che rispondano alle specifiche condizioni morfologiche di ciascuna parte della struttura.

L'ecosistema di *plugin* comprendeva: Volvox per il caricamento, la voxelizzazione e il campionamento spaziale della nuvola di punti in Grasshopper; VisualARQ per la modellazione BIM e l'esportazione IFC in Rhinoceros; Weaverbird per la suddivisione delle mesh e il lisciamento delle superfici; eleFront per la gestione di geometria e attributi; Human per utilità di visualizzazione estesa; e componenti di *scripting* Python 3 integrati per la logica algoritmica personalizzata e l'integrazione di dati esterni. Questa combinazione fornisce un *toolkit* completo ed estensibile in grado di affrontare l'intera gamma di compiti di modellazione incontrati in un sito storico complesso.

Elaborazione e Segmentazione della Nuvola di Punti

La nuvola di punti registrata è stata caricata nell'ambiente Grasshopper tramite Volvox e pre-elaborata attraverso voxelizzazione per regolarizzare la densità dei punti e ridurre il carico computazionale a livelli gestibili. Il passo di voxelizzazione è critico nei contesti di patrimonio dove i *dataset* MLS grezzi possono contenere decine di milioni di punti a densità variabili, creando colli di bottiglia nell'elaborazione senza fornire proporzionali guadagni informativi geometrici.

Il contributo centrale della ricerca risiede nello sviluppo di un algoritmo VPL personalizzato per la segmentazione semi-automatica e la ricostruzione di geometrie di muratura storica. L'algoritmo procede attraverso le seguenti operazioni sequenziali (Fig. 2):

Sezionatura automatizzata. La nuvola di punti viene tagliata attraverso una serie di piani orizzontali a intervalli verticali regolari (configurabili dall'operatore in base alla scala strutturale dell'elemento da modellare). Ogni sezione orizzontale produce una distribuzione di punti 2D che rappresenta il profilo planimetrico delle pareti e degli elementi strutturali a quella quota. Sezioni verticali vengono generate lungo gli assi principali per estrarre i profili di elevazione e identificare aperture, cornici e discontinuità strutturali.

Estrazione di coordinate e analisi dei centroidi. Da ciascun sottoinsieme di punti sezionati, l'algoritmo estrae le coordinate reali e calcola i centroidi locali. Le sequenze di centroidi lungo le sezioni verticali tracciano l'asse effettivo di ciascuna parete, catturando le deviazioni dalla verticalità — una caratteristica critica della muratura storica della Kasbah in terra, pietra e materiale misto che andrebbe perduta in un processo di modellazione manuale che assume pareti idealmente dritte.

Generazione adattiva di superfici *best-fit*. I sottoinsieme di punti estratti vengono elaborati attraverso procedure *best-fit* adattive per generare superfici parametriche. A differenza del *fitting* planare standard, la procedura adattiva consente una deviazione controllata dalla planarità, producendo superfici rigate o curve che approssimano geometrie non planari pur mantenendo la continuità con gli elementi adiacenti. Il grado di deviazione superficiale dalla planarità è un parametro controllabile dall'utente, che consente all'operatore di bilanciare la fedeltà geometrica rispetto alla complessità del modello in base all'uso previsto.

Conversione in elementi BIM. Le superfici parametriche generate vengono successivamente convertite in elementi BIM nativi tramite VisualARQ, consentendo l'integrazione di informazioni semantiche — classificazione materiale, fase costruttiva, condizione di conservazione — accanto alla rappresentazione geometrica. Gli oggetti VisualARQ incorporano *property set* conformi allo standard IFC, garantendo che i dati semantici vengano preservati attraverso l'esportazione verso le piattaforme standard di gestione BIM.

Modellazione Parametrica di Elementi Architettonici Complessi

Al di là del tessuto murario, la Kasbah presenta una serie di elementi architettonicamente significativi che richiedono strategie di modellazione parametrica dedicate. La moschea e il suo minareto, il portale monumentale (*bab*) con il suo arco riccamente decorato, e il sistema di arcate della sala di preghiera sono stati modellati attraverso definizioni parametriche appositamente sviluppate in VisualARQ.

Una libreria di profili di archi parametrici è stata sviluppata per coprire le principali tipologie riscontrate *in situ*: archi a ferro di cavallo, archi a ferro di cavallo ogivali, archi polilobati e l'arco del portale cerimoniale con la sua cornice a *muqarnas* intagliata. Ogni profilo è definito come una famiglia di curve parametriche, consentendo l'istanziazione a scale diverse pur preservando le relazioni proporzionali. Questo approccio a libreria consente una modellazione efficien-

material texture of the Kasbah. The primary geometric survey was carried out using the GeoSLAM ZEB Horizon, a handheld SLAM-based LiDAR scanner that rapid, continuous acquisition of three-dimensional point clouds while the operator moves through the site. This approach proved particularly well-suited to the structurally compromised interior spaces of the palace complex and mosque, where static scanner setups would have been impractical and time-consuming.

In parallel, spherical photogrammetry was performed using an Insta360 Pro 2 omnidirectional camera. Spherical panoramic images were captured at systematic intervals throughout the site and processed in Agisoft Metashape Pro to generate dense photogrammetric point clouds with high radiometric fidelity. These datasets enriched the geometric data with chromatic and material information — texture, surface finish, and weathering patterns — essential for conservation assessment and photorealistic visualization. UAV photogrammetry with a DJI Phantom 4 Pro was additionally deployed for the exterior facades and enclosure walls, providing nadir and oblique coverage of surfaces inaccessible at ground level.

Point Cloud Registration and Quality Control

The point clouds acquired from the different sensor systems were aligned and registered using the Iterative Closest Point (ICP) algorithm implemented in CloudCompare. Prior to registration, manual coarse alignment was performed using identifiable geometric features common to overlapping datasets. The final ICP registration achieved sub-centimeter residuals, ensuring the metric coherence of the integrated dataset.

A roughness analysis was performed in CloudCompare to evaluate local geometric variability across the registered point cloud. This analysis served a dual purpose: quantifying sensor noise levels to guide subsequent processing thresholds, and identifying structurally significant surface irregularities — bulging, cracking, and deformation — relevant to conservation assessment. The roughness maps were retained as documentation products alongside the geometric model, providing a spatially continuous record of surface condition that is difficult to capture through conventional inspection methods.

Algorithmic Modeling (VPL) for HBIM

Computational Environment

The HBIM modeling environment was built on Rhinoceros 3D and Grasshopper as the central VPL platform, extended through a purpose-built plugin ecosystem. The choice of a VPL environment over conventional BIM authoring tools was motivated by the need for full geometric programmability: the capacity to define custom algorithms for geometry extraction, surface fitting, and BIM element generation that respond to the specific morphological conditions of each part of the structure.

The plugin ecosystem comprised: Volvox for point cloud loading, voxelization, and spatial sampling within Grasshopper; VisualARQ for BIM-authoring and IFC export within Rhinoceros; Weaverbird for mesh subdivision and surface smoothing; eleFront for geometry and attribute management; Human for extended display utilities; and embedded Python 3 scripting components for custom algorithmic logic and external data integration. This combination provides a comprehensive and ex-

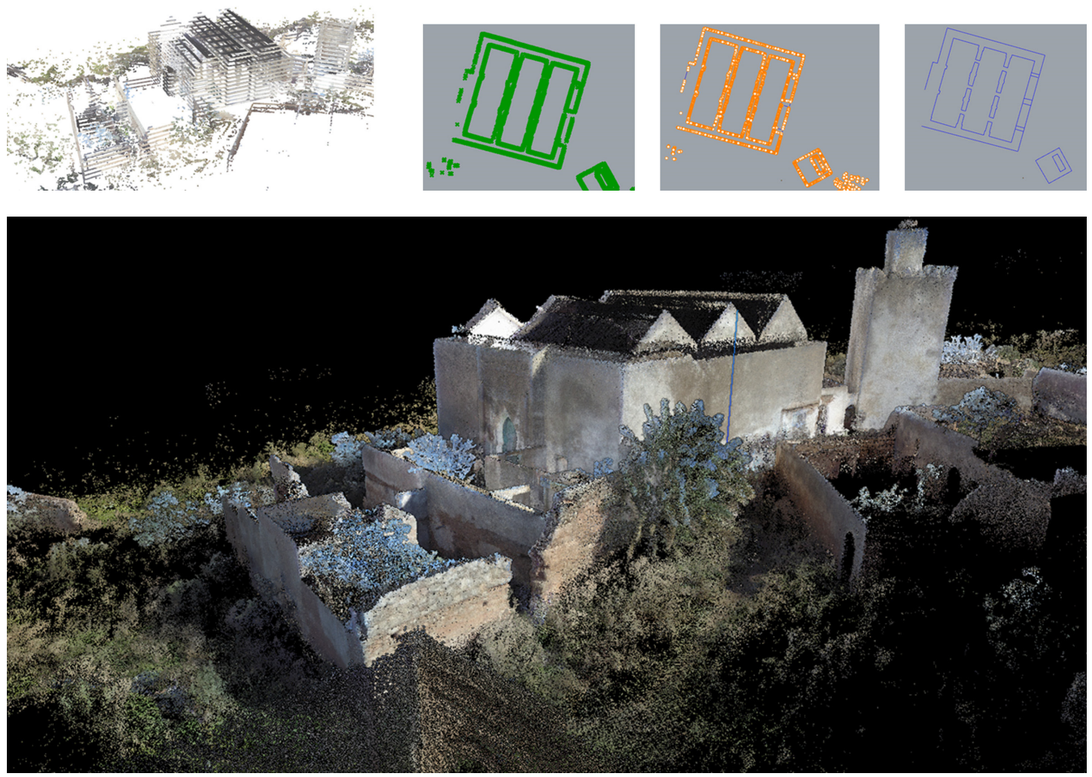


Fig. 2: *Workflow* VPL Volvox applicato alla nuvola di punti della Kasbah di Mehdya. La sequenza illustra la transizione algoritmica dai dati grezzi alla geometria strutturale: (a) sezionatura automatizzata della nuvola di punti; (b) estrazione delle coordinate reali e dei centroidi dai punti campionati; (c) generazione di curve parametriche dai *dataset* sezionati; e (d) ricostruzione finale del modello HBIM ad alta fedeltà.

Fig. 2: Volvox VPL workflow applied to the point cloud of the Kasbah of Mehdya. The sequence illustrates the algorithmic transition from raw data to structural geometry: (a) automated sectioning of the point cloud; (b) extraction of real-world coordinates and centroids from the sampled points; (c) generation of parametric curves from the sliced datasets; and (d) final reconstruction of the high-fidelity HBIM model.

te di elementi tipologicamente simili che ricorrono in tutto il sito, pur accomodando le variazioni dimensionali misurate dalla nuvola di punti.

Il minareto è stato modellato come un oggetto completamente parametrico con sezione trasversale del fusto regolabile, dimensioni delle fasce interpiano, profilo della cornice e parapetto merlato. La definizione parametrica è stata guidata direttamente dalle misurazioni estratte dalla nuvola di punti attraverso l'algoritmo VPL, producendo un modello che rappresenta accuratamente la forma costruita esistente — inclusa la visibile inclinazione della parte superiore del fusto documentata nel rilievo — piuttosto che una ricostruzione idealizzata.

Trasferimento della Texture Fotogrammetrica tramite Script Python

Una *pipeline* Python 3 dedicata è stata sviluppata per trasferire le informazioni di colore e materiale fotogrammetrico dal progetto fotogrammetrico di Agisoft Metashape direttamente sulla mesh HBIM nell'ambiente Grasshopper, consentendo la visualizzazione fotorealistica del *Digital Twin* senza ricorrere al *mapping UV* manuale o a *software* di *rendering* post-produzione. La *pipeline* (Fig. 3)

tensible toolkit capable of addressing the full range of modeling tasks encountered in a complex heritage site.

Point Cloud Processing and Segmentation

The registered point cloud was loaded into the Grasshopper environment via Volvox and preprocessed through voxelization to regularize point density and reduce computational load to manageable levels. The voxelization step is critical in heritage contexts where raw MLS datasets may contain tens of millions of points at variable densities, creating processing bottlenecks without providing proportional geometric information gains.

The core contribution of the research lies in the development of a custom VPL algorithm for the semi-automatic segmentation

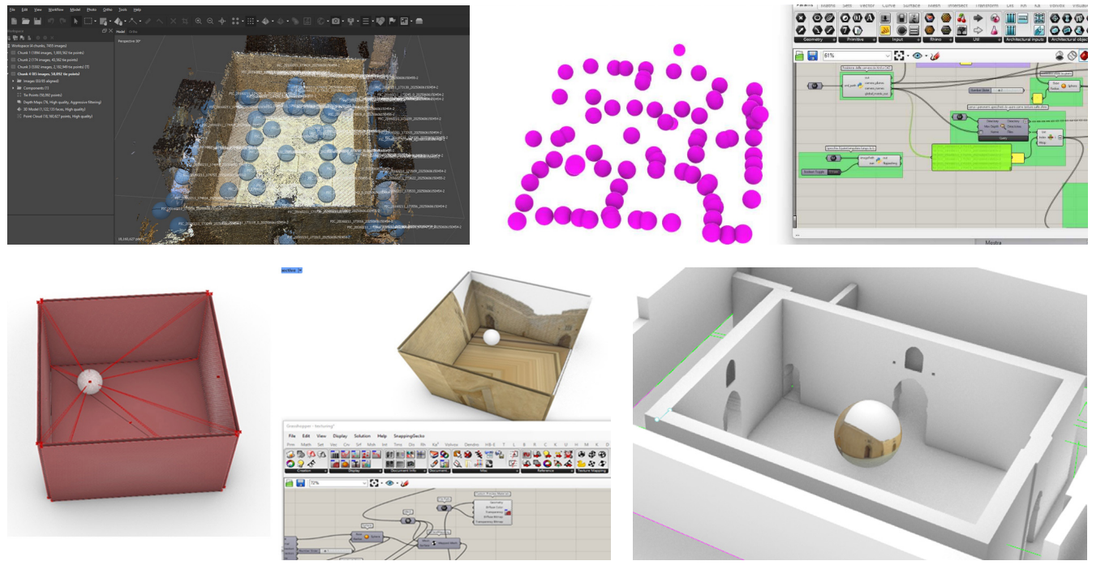


Fig. 3: *Pipeline* di trasferimento della *texture* fotogrammetrica tramite *script* Python. (In alto a sinistra) Area di lavoro Agisoft Metashape che mostra il modello fotogrammetrico del cortile interno con le posizioni delle camere allineate visualizzate come *marker* sferici. (In alto al centro-destra) Posizioni delle camere importate in Grasshopper tramite esportazione CSV e ricostruite come piani orientati. (In basso a sinistra) Geometria di *ray-casting* che illustra lo schema di proiezione dalla camera più vicina. (In basso al centro-destra) Mesh con colori *vertex* risultante in Rhinoceros.

Fig. 3: Python-scripted photogrammetric texture transfer pipeline. (Top left) Agisoft Metashape workspace showing the photogrammetric model of the inner courtyard with aligned camera positions visualised as spherical markers. (Top center–right) Camera positions imported into Grasshopper via CSV export and reconstructed as oriented planes; spherical markers generated by the Python component confirm spatial coverage within the HBIM scene. (Bottom left) Ray-casting geometry illustrating the nearest-camera projection scheme used for UV coordinate computation. (Bottom center–right) Resulting vertex-coloured mesh in Rhinoceros, showing photogrammetric texture sampled from Insta360 Pro 2 imagery applied to the courtyard interior model.

comprende due *script* che operano in sequenza: il primo viene eseguito all'interno di Metashape ed esporta i dati delle camere in un file CSV strutturato; il secondo viene eseguito come componente Python all'interno di Grasshopper e utilizza tali dati per proiettare i colori delle immagini sulle posizioni dei vertici della mesh.

Esportazione dei dati delle camere da Metashape. Il primo *script* viene eseguito tramite l'interfaccia di scripting di Metashape. Itera su tutte le camere allineate nel blocco attivo e scrive un file CSV contenente, per ciascuna camera: etichetta, posizione XYZ nello spazio mondo, matrice di rotazione 3×3 e percorso completo all'immagine sorgente. La matrice di rotazione viene estratta dalla trasformazione *camera-to-world* 4×4 fornita dall'API Metashape, codificando l'orientamento dell'asse ottico e del piano immagine nel sistema di coordinate del progetto.

Importazione delle camere e visualizzazione della scena in Grasshopper. Il secondo *script*, incorporato come componente Python 3 nel *canvas* Grasshopper, legge il CSV e ricostruisce ciascuna camera come un piano Rhino completamente orientato. Questi piani vengono esposti come parametri di *output* Grasshopper, consentendo la connessione diretta a componenti di anteprima o a strumenti analitici *downstream*. *Marker* sferici vengono generati in ciascuna posizione della camera per fornire un *audit* spaziale immediato della copertura del rilievo all'interno della scena HBIM.

and reconstruction of historical masonry geometries. The algorithm proceeds through the following sequential operations (Fig. 2):

Automated sectioning. The point cloud is sliced through a series of horizontal planes at regular vertical intervals (configurable by the operator based on the structural scale of the element being modeled). Each horizontal section yields a 2D point distribution representing the plan profile of walls and structural elements at that elevation. Vertical sections are additionally generated along principal axes to extract elevation profiles and identify openings, cornices, and structural discontinuities.

Coordinate extraction and centroid analysis. From each sectioned point subset, the algorithm extracts real-world coordinates and computes local centroids. Centroid sequences along vertical sections trace the actual axis of each wall, capturing deviations from verticality, a critical characteristica critical feature of the Kasbah's historic masonry made of earth, stone, and

Trasferimento del colore del vertice dalla camera più vicina. L'operazione di *texturing* centrale applica le informazioni di colore fotogrammetrico alla mesh HBIM tramite un algoritmo di proiezione dalla camera più vicina. Per ciascun vertice della mesh di *input*, lo *script* identifica la posizione di camera spazialmente più vicina utilizzando la distanza euclidea al quadrato. Il vertice viene quindi proiettato sul piano immagine di quella camera attraverso una decomposizione a prodotto scalare lungo gli assi destro e alto della camera, producendo coordinate UV normalizzate nel *range* [0, 1]. Il colore del pixel corrispondente viene campionato dall'immagine sorgente — caricata come oggetto System.Drawing.Bitmap all'interno del *runtime* .NET disponibile in Rhino — e assegnato al vertice della mesh tramite la raccolta VertexColors della geometria mesh Rhino.

Risultati

Modello HBIM

Il *workflow* proposto ha consentito la generazione semi-automatica di geometrie HBIM derivate direttamente dai dati di rilievo. Il processo di modellazione algoritmica ha supportato la ricostruzione di morfologie complesse — incluse superfici murarie non planari, configurazioni planimetriche irregolari ed elementi strutturalmente deformati — riducendo significativamente lo sforzo di modellazione manuale tipicamente richiesto nei processi *scan-to*-HBIM (Fig. 4).

Il modello risultante comprende: l'intero sistema di mura di cinta con torri e bastioni; il complesso della moschea inclusi sala di preghiera, annessi laterali e minareto; il complesso palatino con cortile centrale, sale di ricevimento e spazi di servizio; il portale monumentale con arco parametrico; e gli elementi visibili dell'infrastruttura idraulica. Ogni componente è modellato come un oggetto BIM VisualARQ che contiene dati geometrici e semantici, organizzati all'interno di una gerarchia spaziale IFC (sito > edificio > piano > spazio).

Accuratezza Geometrica

Una validazione geometrica quantitativa è stata eseguita calcolando le distanze *Cloud-to-Mesh* (C2M) tra le superfici HBIM generate e la nuvola di punti registrata originale in CloudCompare. Il confronto dimostra una coerenza geometrica entro ±3 cm sulle superfici modellate, comparabile con i risultati riportati in recenti studi *scan-to*-HBIM sulla muratura storica a scale analoghe.

Questa accuratezza è coerente con i requisiti della documentazione di conservazione alla scala architettonica. Le deviazioni residue si concentrano nelle zone strutturalmente deformate — sezioni di parete rigonfie e aree parzialmente crollate — dove i dati della nuvola di punti sono localmente insufficienti per una ricostruzione superficiale affidabile e dove sarebbe necessario un affinamento manuale per un'analisi strutturale dettagliata.

Interoperabilità ed Esportazione Multi-Piattaforma

L'esportazione IFC da VisualARQ (Fig. 5) consente l'interoperabilità basata su IFC, garantendo che il modello sia trasferibile alle piattaforme standard di gestione BIM e accessibile a ingegneri della conservazione e autorità del patrimonio al di là del *team* di ricerca. Le implicazioni di questi risultati per il più ampio campo *scan-to*-HBIM sono discusse nella sezione seguente.

mixed material that would be lost in a manual modeling process that assumes idealized straight walls.

Adaptive best-fit surface generation. The extracted point subsets are processed through adaptive best-fit procedures to generate parametric surfaces. Unlike standard planar fitting, the adaptive procedure allows controlled deviation from planarity, producing ruled or curved surfaces that approximate non-planar geometries while maintaining continuity with adjacent elements. The degree of surface deviation from planarity is a user-controlled parameter, allowing the operator to balance geometric fidelity against model complexity depending on the intended use of the model.

BIM element conversion. The generated parametric surfaces are subsequently converted into BIM-native elements through VisualARQ, enabling the integration of semantic information — material classification, construction phase, conservation condition — alongside the geometric representation. The VisualARQ objects carry IFC-compliant property sets, ensuring that the semantic data is preserved through export to standard BIM management platforms.

Parametric Modeling of Complex Architectural Elements

Beyond the wall fabric, the Kasbah presents a range of architecturally significant elements requiring dedicated parametric modeling strategies. The mosque and its minaret, the monumental gateway (*bab*) with its elaborately decorated arch, and the arcade system of the prayer hall were modeled through purpose-built parametric definitions in VisualARQ.

A library of parametric arch profiles was developed to cover the main typologies encountered on site: horseshoe arches, pointed horseshoe arches, multifoil arches, and the ceremonial gateway arch with its carved *muqarnas* cornice. Each profile is defined as a parametric curve family, allowing instantiation at different scales while preserving proportional relationships. This library approach enables efficient modeling of typologically similar elements that recur across the site, while accommodating the dimensional variations measured from the point cloud.

The minaret was modeled as a fully parametric object with adjustable shaft cross-section, inter-floor band dimen-



Fig. 4: Viste renderizzate del modello HBIM con *texture* fotogrammetrica applicata tramite la *pipeline* Python di trasferimento del colore *vertex*: (sinistra) arcata interna della moschea con *texture* di colonne in pietra e archi campionate da immagini Insta360 Pro 2; (destra) vista esterna del complesso moschea e minareto con mappatura della *texture* materica dalla fotogrammetria UAV.

Fig. 4: Rendered views of the HBIM model with photogrammetric texture applied via the Python vertex-colour transfer pipeline: (left) mosque interior arcade with stone column and arch textures sampled from Insta360 Pro 2 imagery; (right) exterior view of the mosque and minaret complex with material texture mapping from UAV photogrammetry.

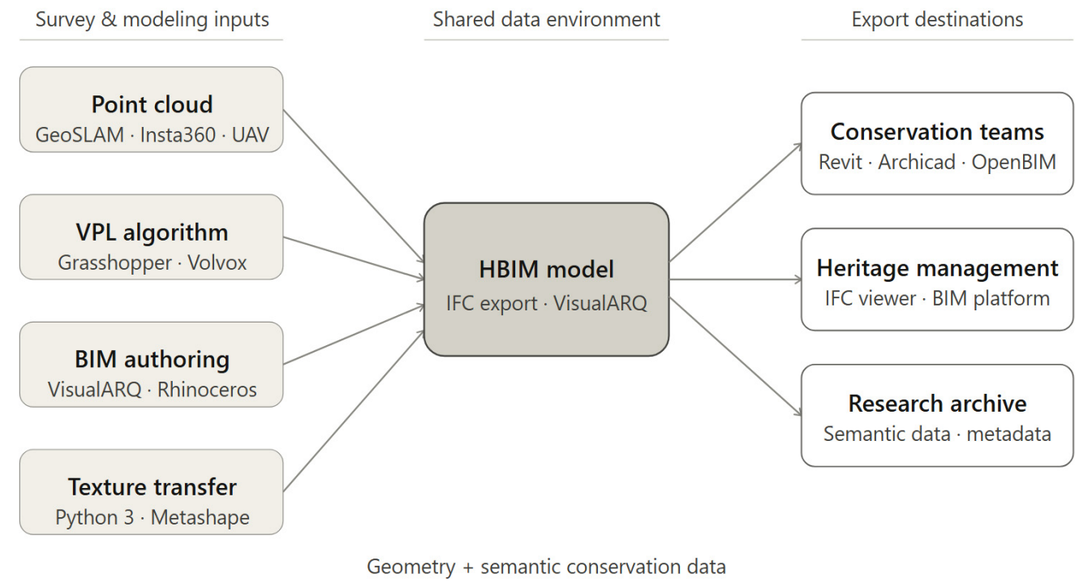


Fig. 5: Schema di esportazione IFC: il modello HBIM come ambiente dati condiviso che consente il trasferimento di dati geometrici e semantici alle piattaforme di gestione BIM per la documentazione della conservazione e la gestione collaborativa del patrimonio.

Fig. 5: IFC export schema: the HBIM model as a shared data environment enabling transfer of geometric and semantic data to BIM management platforms for conservation documentation and collaborative heritage management.

Discussione

Il punto interpretativo chiave che emerge da questo lavoro è l'inversione della logica di modellazione. La pratica *scan-to*-HBIM convenzionale adatta i dati di rilievo a famiglie di oggetti preesistenti, sacrificando inevitabilmente informazioni morfologiche ai vincoli

sions, cornice profile, and battlemented parapet. The parametric definition was driven directly by measurements extracted from the point cloud through the VPL algorithm, producing a model that accurately represents the existing built form — includ-

delle librerie parametriche standardizzate. L'algoritmo VPL proposto inverte questa relazione: la geometria BIM è derivata dai dati di rilievo attraverso procedure di sezionatura adattiva e *best-fit*, così il modello eredita l'irregolarità effettiva del manufatto piuttosto che sopprimerla. Questa inversione non è meramente un perfezionamento tecnico — cambia ciò che il modello può esprimere. Le deviazioni dalla verticalità, le superfici murarie non planari e le configurazioni strutturali asimmetriche vengono preservate come proprietà geometriche degli elementi BIM piuttosto che essere trattate come rumore da correggere.

La coerenza geometrica entro ±3 cm è una condizione necessaria ma non sufficiente per la validità dell'approccio. Più significativo è che questa accuratezza viene raggiunta semi-automaticamente su superfici morfologicamente eterogenee — incluse pareti in terra non planari e muratura deformata — senza calibrazione manuale specifica del sito. Le deviazioni residue si concentrano in modo prevedibile in due condizioni: zone di attivo cedimento strutturale dove i dati della nuvola di punti sono localmente insufficienti, e superfici molto regolari dove la procedura adattiva introduce gradi di libertà non necessari. La prima condizione è un limite intrinseco di qualsiasi metodo basato sul rilievo; la seconda suggerisce che l'algoritmo trarrebbe beneficio da un pre-passaggio di rilevamento della regolarità che selezioni la strategia di *fitting* appropriata per regione superficiale, piuttosto che applicare uniformemente la procedura adattiva.

La libreria di archi parametrici solleva una questione che si estende al di là di questo caso studio: a che punto una libreria tipologica specifica del sito diventa una risorsa disciplinare riutilizzabile? La tradizione della *kasbah* marocchina condivide famiglie di archi — a ferro di cavallo, a ferro di cavallo ogivali, polilobati — con un ampio spettro di siti patrimoniali maghrebini e andalusi. Se la libreria viene strutturata con relazioni proporzionali documentate e *property set* compatibili con IFC, potrebbe funzionare come punto di partenza condiviso per future campagne HBIM nella regione, riducendo lo sforzo di modellazione da zero e consentendo il confronto tipologico intersito [Lo Turco et al., 2019].

Una condizione per la generalizzabilità del *workflow* è la disponibilità di una nuvola di punti sufficientemente densa e registrata — la qualità del *fitting* adattivo delle superfici è delimitata dalla qualità dei dati di *input*. Su siti dove i vincoli di accesso impediscono una copertura MLS completa, le prestazioni dell'algoritmo si degraderanno in proporzione alle lacune nella nuvola di punti. Questa non è una limitazione specifica dell'approccio VPL, ma deve essere dichiarata chiaramente: il *workflow* amplifica il contenuto informativo di buoni dati di rilievo; non compensa i dati di rilievo di scarsa qualità.

Conclusioni

Questo articolo ha presentato un *workflow scan-to*-HBIM basato su VPL per la documentazione della Kasbah di Mehdya, sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca bilaterale MAECI 2024–2026. La metodologia integra tecniche di rilievo 3D multiscala con un algoritmo Grasshopper personalizzato per la ricostruzione semi-automatica di geometrie di muratura storica irregolari, producendo modelli HBIM conformi allo standard IFC con accuratezza geometrica dimostrata entro ±3 cm.

ing the visible inclination of the upper shaft documented in the survey — rather than an idealized reconstruction.

Python-Scripted Photogrammetric Texture Transfer

A dedicated Python 3 pipeline was developed to transfer photogrammetric colour and material information from the Agisoft Metashape photogrammetric project directly onto the HBIM mesh within the Grasshopper environment, enabling photorealistic visualization of the Digital Twin without reliance on manual UV-mapping or post-production rendering software. The pipeline (Fig. 3) comprises two scripts operating in sequence: the first runs inside Metashape and exports camera data to a structured CSV file; the second runs as a Python component inside Grasshopper and uses that data to project image colours onto mesh vertex positions.

Camera data export from Metashape. The first script is executed via the Metashape scripting interface (Tools > Run Script). It iterates over all aligned cameras in the active chunk and writes a CSV file containing, for each camera: label, world-space XYZ position, 3×3 rotation matrix, and full path to the source image. The rotation matrix is extracted from the 4×4 camera-to-world transform provided by the Metashape API, encoding the orientation of the optical axis and image plane in the project coordinate system. Only cameras with a valid alignment (i.e., non-null transform) are included. This file constitutes the bridge between the photogrammetric reconstruction environment and the Grasshopper modeling environment.

Camera import and scene visualization in Grasshopper. The second script, embedded as a Python 3 component in the Grasshopper canvas, reads the CSV and reconstructs each camera as a fully oriented Rhino plane: position from the XYZ columns, X-axis from rotation column 0 (camera right vector), and Y-axis from rotation column 1 (camera up vector). These planes are exposed as Grasshopper output parameters, enabling direct connection to preview components or to downstream analytical tools. Spherical markers are additionally generated at each camera position — as visible in the Grasshopper canvas views documented during the research — to provide an immediate spatial audit of survey coverage within the HBIM scene.

L'integrazione di strategie di modellazione computazionale nei *workflow scan-to*-HBIM rappresenta una direzione promettente per la documentazione di architetture storiche complesse. L'approccio VPL proposto dimostra come gli strumenti algoritmici possano supportare la ricostruzione semi-automatica di geometrie di muratura irregolari derivate da dati di nuvola di punti, riducendo lo sforzo manuale migliorando al contempo la fedeltà geometrica. Il caso studio della Kasbah di Mehdya evidenzia il potenziale dei metodi di modellazione computazionale per migliorare l'efficienza e l'affidabilità della generazione HBIM in contesti patrimoniali dove le librerie di oggetti BIM convenzionali sono insufficienti.

Il lavoro futuro si concentrerà su tre direzioni: (1) integrazione della segmentazione della nuvola di punti assistita dall'IA per ridurre ulteriormente l'intervento manuale nella fase di rilevamento degli elementi; e (2) arricchimento dei dati semantici IFC con attributi delle condizioni di conservazione e caratterizzazione materiale, consolidando il modello come strumento completo di gestione della conservazione. Il progetto della Kasbah di Mehdya contribuisce così al crescente corpo di evidenze sull'efficacia delle metodologie di progettazione computazionale nella trasformazione digitale della documentazione e gestione del patrimonio culturale.

Bibliografia

Avena, M., Patrucco, G., Remondino, F., & Spanò, A. (2024). A scalable approach for automating *scan-to*-BIM processes in the heritage field. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-2/W4-2024, pp. 25-31. Göttingen: Copernicus Publications. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-25-2024

Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M., & Schiantarelli, G. (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. In *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 57, pp. 71-87. Amsterdam: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004

Brumana, R., Della Torre, S., Previtali, M., Barazzetti, L., Cantini, L., Oreni, D., & Banfi, F. (2018). Generative HBIM modelling to embody complexity (LOD, LOG, LOA, LOI): surveying, preservation, site intervention—the Basilica di Collemaggio (L'Aquila). In *Applied Geomatics*, vol. 10, n. 4, pp. 545-567. Berlin-Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/s12518-018-0233-3

Gigliarelli, E., Cangi, G., Cessari, L., Cursi, S., El Khoury, C., El Ganadi, Y., Verticchio, E., Pola, A. P., Vecchiotti, A., Martinelli, L., & Calcerano, F. (2026a). Multiscale digital survey and HBIM-GIS integration for the conservation of the Kasbah of Mehdya (Morocco). In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-2/W12-2026, pp. 159-166. Göttingen: Copernicus Publications. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W12-2026-159-2026

Gigliarelli, E., Pola, A. P., Cursi, S., Calcerano, F., Martinelli, L., El Ganadi, Y., & Cessari, L. (2026b). The Kasbah of Mehdiya, the early historical development of a Moroccan fortress. In Russo M., Acierno

Nearest-camera vertex colour transfer. The core texturing operation applies photogrammetric colour information to the HBIM mesh via a nearest-camera projection algorithm. For each vertex of the input mesh, the script identifies the spatially closest camera position using squared Euclidean distance. The vertex is then projected onto that camera's image plane through a dot-product decomposition along the camera's right and up axes, yielding normalised UV coordinates in the [0, 1] range. The corresponding pixel colour is sampled from the source image — loaded as a System.Drawing.Bitmap object within the .NET runtime available in Rhino — and assigned to the mesh vertex via the VertexColors collection of the Rhino mesh geometry. Images are pre-loaded into a dictionary cache before the vertex loop to avoid repeated disk reads, making the process computationally efficient even for high-resolution survey datasets. The field-of-view extent parameter governing the UV projection is user-configurable, allowing calibration to the specific sensor geometry of the acquisition cameras.

The result is a vertex-coloured mesh that embeds the radiometric information of the photogrammetric survey directly into the HBIM model geometry, producing the material-rich visualizations of the Kasbah mosque interior and courtyard documented in the results (Figs. 3-5). This approach circumvents the need for separate UV-unwrapping and texture-baking operations, keeping the entire texturing workflow within the Grasshopper VPL environment and maintaining a direct parametric link between survey data and visualization output.

Results

HBIM Model

The proposed workflow enabled the semi-automatic generation of HBIM geometries derived directly from survey data. The algorithmic modeling process supported the reconstruction of complex morphologies — including non-planar wall surfaces, irregular plan configurations, and structurally deformed elements — while significantly reducing the manual modeling effort typically required in scan-to-HBIM processes (Fig. 4).

The resulting model encompasses: the full enclosure wall system with towers and bastions; the mosque complex including

M. (a cura di). *FORTMED 2026. Defensive Architecture of the Mediterranean*, vol. XXIII, pp. 115-122. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

Liu, J., & Li, B. (2024). Heritage Building Information Modelling (HBIM): A review of published case studies. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-1-2024, pp. 387-393. Göttingen: Copernicus Publications. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-387-2024

Lo Turco, M., Giovannini, E. C., & Tomalini, A. (2022). Parametric and visual programming BIM applied to museums, linking container and content. In *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 11, n. 7, 411. Basel: MDPI. https://doi.org/10.3390/ijgi11070411

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 76, pp. 89-102. Amsterdam: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006

Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. In *Remote Sensing*, vol. 3, n. 6, pp. 1104-1138. Basel: MDPI. https://doi.org/10.3390/rs3061104

Salah, R., Géczy, N., & Ajtayné Károlyfi, K. (2026). Architectural heritage digitization: A classification-driven semi-automated *scan-to*-HBIM *workflow*. In *Buildings*, vol. 16, n. 1, 21. Basel: MDPI. https://doi.org/10.3390/buildings16010021

prayer hall, lateral annexes, and minaret; the palace complex with central courtyard, reception halls, and service spaces; the monumental gateway with parametric arch; and the visible elements of the hydraulic infrastructure. Each component is modeled as a VisualARQ BIM object carrying geometric and semantic data, organized within an IFC spatial hierarchy (site > building > floor > space).

Geometric Accuracy

A quantitative geometric validation was performed by computing Cloud-to-Mesh (C2M) distances between the generated HBIM surfaces and the original registered point cloud in CloudCompare. The comparison demonstrates geometric consistency within ±3 cm across the modeled surfaces, comparable with results reported in recent scan-to-HBIM studies on heritage masonry at similar scales.

This accuracy is consistent with the requirements of conservation documentation at the architectural scale. Residual deviations concentrate at structurally deformed zones — bulging wall sections and partially collapsed areas — where point cloud data is locally insufficient for reliable surface reconstruction and where manual refinement would be required for detailed structural analysis.

Interoperability and Multi-Platform Export

The IFC export from VisualARQ (Fig. 5) enables IFC-based interoperability, ensuring the model is transferable to standard BIM management platforms and accessible to conservation engineers and heritage authorities beyond the research team. The implications of these results for the broader scan-to-HBIM field are discussed in the following section.

Discussion

The key interpretive point emerging from this work is the inversion of the modeling logic. Conventional scan-to-HBIM practice fits survey data to pre-existing object families, inevitably sacrificing morphological information to the constraints of standardised parametric libraries. The proposed VPL algorithm inverts this relationship: BIM geometry is derived from the survey data through adaptive sectioning and best-fit procedures, so the model inherits the actual irregularity of the fabric rather than suppressing it. This inversion is not merely a technical refinement — it changes what the model can express. Deviations from verticality, non-planar wall surfaces, and asymmetric structural configurations are preserved as geometric properties of the BIM elements rather than being treated as noise to be corrected.

The geometric consistency within ±3 cm is a necessary but not sufficient condition for the validity of the approach. More significant is that this accuracy is achieved semi-automatically across morphologically heterogeneous surfaces — including non-planar earthen walls and deformed masonry — without site-specific manual calibration. The residual deviations concentrate predictably at two conditions: zones of active structural failure where point cloud data is locally insufficient, and highly regular surfaces where the adaptive procedure introduces unnecessary degrees of freedom. The first condition is an inherent limit of any survey-based method; the second suggests that the algorithm would benefit from a regularity-detection pre-pass that selects the appropriate fitting strategy per surface region, rather than applying the adaptive procedure uniformly.

The parametric arch library raises a question that extends beyond this case study: at what point does a site-specific typological library become a reusable disciplinary resource? The Moroccan Kasbah tradition shares arch families — horseshoe, pointed horseshoe, multifoil — with a broad range of Maghrebi and Andalusian heritage sites. If the library is structured with documented proportional relationships and IFC-compatible property sets, it could function as a shared starting point for future HBIM campaigns across the region, reducing from-scratch modeling effort and enabling cross-site typological comparison [Lo Turco et al., 2019]. This potential transfers value from the individual project to the broader heritage documentation community.

A condition for the generalisability of the workflow is the availability of a sufficiently dense and registered point cloud — the quality of the adaptive surface fitting is bounded by the quality of the input data. On sites where access constraints prevent comprehensive MLS coverage, the algorithm's performance will degrade in proportion to point cloud gaps. This is not a limitation specific to the VPL approach, but it should be stated clearly: the workflow amplifies the informational content of good survey data; it does not compensate for poor survey data.

Conclusions

This paper has presented a VPL-based scan-to-HBIM workflow for the documentation of the Kasbah of Mehdya, developed within the MAECI 2024–2026 bilateral research project. The methodology integrates multi-scale 3D survey techniques with a custom Grasshopper algorithm for the semi-automatic reconstruction of irregular historical masonry geometries, producing IFC-compliant HBIM models with demonstrated geometric accuracy within ±3 cm.

The integration of computational modeling strategies within scan-to-HBIM workflows represents a promising direction for the documentation of complex heritage architectures. The proposed VPL-based approach demonstrates how algorithmic tools can support the semi-automatic reconstruction of irregular masonry geometries derived from point cloud data, reducing manual effort while improving geometric fidelity. The case study of the Kasbah of Mehdya highlights the potential of computational modeling methods for improving the efficiency and reliability of HBIM generation in heritage contexts where conventional BIM object libraries are insufficient.

Future work will focus on three directions: (1) integration of AI-assisted point cloud segmentation to further reduce manual intervention in the element detection phase; and (2) enrichment of IFC semantic data with conservation condition attributes and material characterization, consolidating the model as a full conservation management tool. The Kasbah of Mehdya project thus contributes to the growing body of evidence for the effectiveness of computational design methodologies in the digital transformation of cultural heritage documentation and management.

Autori

Filippo Cornacchini[1]
Fabio Bianconi[1]
Marco Filippucci[1]
Andrea Migliosi[1]
Claudia Cerbai[1]

[1]Università degli Studi di Perugia

Email

filippo.cornacchini@unipg.it
fabio.bianconi@unipg.it
marco.filippucci@unipg.it
andrea.migliosi@unipg.it
claudia.cerbai@dottorandi.unipg.it

Keywords

HBIM
HERITAGE DIGITIZATION
AI FOR BIM
PARAMETRIC MODELING
SINGLE-IMAGE RECONSTRUCTION

Workflow AI-based per la digitalizzazione HBIM degli apparati decorativi

AI-based workflow for the HBIM digitization of decorative elements

Abstract

Il contributo presenta un *workflow* semi-automatico (SIDe-HBIM) per la creazione e l'integrazione in ambiente BIM di elementi decorativi ottenuti da una singola immagine tramite intelligenza artificiale. La sperimentazione sulla Basilica di Santa Maria degli Angeli analizza potenzialità e criticità dell'inserimento nel modello BIM.

This contribution presents a semi-automatic workflow (SIDe-HBIM) for the creation and integration of decorative elements generated from a single image through artificial intelligence within an HBIM environment. The experimentation on the Basilica di Santa Maria degli Angeli analyses the potential and critical issues related to their integration into the BIM model.

Introduzione

Negli ultimi anni, la progressiva integrazione delle tecnologie digitali nei processi di documentazione, analisi e gestione del patrimonio architettonico ha profondamente trasformato il modo in cui gli edifici storici vengono rappresentati, interpretati e resi disponibili all'interno di sistemi conoscitivi complessi [Rocha, 2024; Alshawabkeh, 2024]. In tale scenario, l'*Heritage Building Information Modeling* (HBIM) si configura come un sistema informativo capace di connettere dati geometrici, attributi materici, informazioni storiche, elementi diagnostici e contenuti documentari [Yang, 2020; Croce, 2023]. L'adozione di modelli HBIM e di strategie di Digital Twin sta progressivamente spostando la documentazione del patrimonio costruito verso un paradigma informativo, nel quale il dato tridimensionale diviene parte integrante di un ecosistema interrogabile, aggiornabile e semanticamente strutturato [Parrinello, 2023].

L'avvento dell'intelligenza artificiale e degli algoritmi generativi ha introdotto nuove possibilità operative orientate all'automazione dei processi di ricostruzione, interpretazione e produzione geometrica, in particolare per apparati decorativi con elementi plastici, bassorilievi, modanature, cornici e sculture [Gupta, 2024; Zhuang 2025]. Tali componenti concorrono in maniera determinante alla definizione dell'identità figurativa, simbolica e culturale dell'edificio storico, ma rappresentano ancora oggi uno degli aspetti più problematici all'interno dei processi di modellazione HBIM [Miky, 2024]. Attualmente esistono differenti strategie per la digitalizzazione e la modellazione degli apparati decorativi. Tra queste, la modellazione manuale direttamente in ambiente BIM consente un elevato controllo parametrico, ma risulta spesso estremamente onerosa in termini di tempo e rigidità operativa, soprattutto nella restituzione di forme organiche o fortemente articolate [Docci, 2007]. Parallelamente, tecniche di rilievo e ricostruzione ad alta densità informativa, come fotogrammetria o *workflow Scan-to-BIM*, permettono di ottenere restituzioni geometricamente accurate e formalmente dettagliate, ma producono frequentemente modelli caratterizzati da un elevato peso computazionale, soprattutto quando derivati da *mesh* dense o nuvole di punti ad alta risoluzione [Bianconi, 2024]. In alcuni contesti, come il *facility management* o l'organizzazione informativa del patrimonio costruito, l'adozione di modelli geometricamente sovrastrutturati rischia di compromettere l'efficienza operativa, rendendo quindi necessaria la definizione di procedure metodologiche che garantiscano un equilibrio ottimale tra la fedeltà morfologica, la leggerezza geometrica, la tempestività dei tempi di produzione e la densità informativa dei dati integrati [Nieto-Julián, 2021].

All'interno di questo quadro si colloca la metodologia SIDe-H-BIM (*Single Image Depth–HBIM*), una *pipeline* semi-automatica basata sull'inferenza della profondità da singola immagine, sulla valutazione computazionale delle *depth map* generate e sulla successiva conversione parametrica in geometrie tridimensionali integrabili in ambiente BIM. Il presupposto teorico e operativo della metodologia è che l'immagine fotografica possa essere assunta come matrice informativa dalla quale derivare una geometria tridimensionale coerente e sufficientemente riconoscibile. Rispetto ai *workflow* tradizionali basati su acquisizioni dense e ricostruzioni ad alta precisione, l'approccio proposto privilegia la rapidità di produzione e la sostenibilità computazionale del risultato finale. Inoltre, la semplificazione delle operazioni di acquisizione, derivanti dalla possibilità di basare il *workflow* su una singola immagine, consente di ridurre la dipendenza da strumentazioni specialistiche e campagne di rilievo particolarmente onerose. Per ottenere l'immagine di input è sufficiente l'impiego di dispositivi di uso comune, come smartphone dotati di fotocamere ad alta risoluzione, così da contenere tempi e costi di acquisizione e di affrontare più agevolmente problematiche legate all'accessibilità fisica degli elementi decorativi [Bianconi, 2026].

Il presente contributo si concentra sull'ultima fase del *workflow*, relativa alla trasformazione della geometria derivata da *depth map* in una famiglia parametrica caricabile all'interno di Autodesk Revit, superando la generazione tridimensionale dell'apparato decorativo già affrontata in precedenti studi[Bianconi, 2026]. L'applicazione metodologica attuale è stata sviluppata sulla Basilica di Santa Maria degli Angeli ad Assisi, selezionando un singolo elemento ornamentale ritenuto particolarmente significativo per analizzare le problematiche connesse alla generazione automatizzata della famiglia BIM, alla sua parametrizzazione e alla successiva integrazione all'interno del modello informativo.

Materiali e metodi

L'approccio proposto si configura come un *workflow* computazionale integrato finalizzato alla trasformazione di una singola immagine fotografica in un oggetto parametrico interoperabile all'interno di un ambiente HBIM (Fig. 1). Il processo connette quattro ambienti tecnologici: modelli di intelligenza artificiale per la generazione di *depth map*, un modulo algoritmico di valutazione automatizzata, un sistema di modellazione parametrica in Dynamo integrato in Autodesk Revit e l'inserimento dell'oggetto parametrico ottenuto all'interno del modello BIM sviluppato nello stesso software (Fig. 2).

La prima fase consiste nell'acquisizione di un'immagine fotografica dell'elemento decorativo, che costituisce il punto di partenza dell'intero processo. La configurazione ideale prevede una ripresa quanto più possibile ortogonale al soggetto, per ridurre le distorsioni prospettiche e facilitare l'inferenza della profondità. Il metodo rimane comunque efficace per elementi in quota o difficilmente accessibili, dove è possibile operare solo da distanza maggiore o in modo non perfettamente allineato. A differenza delle procedure fotogrammetriche tradizionali, non sono richieste condizioni di illuminazione controllate: ombre e variazioni luminose possono anzi migliorare la leggibilità delle differenze di profondità.

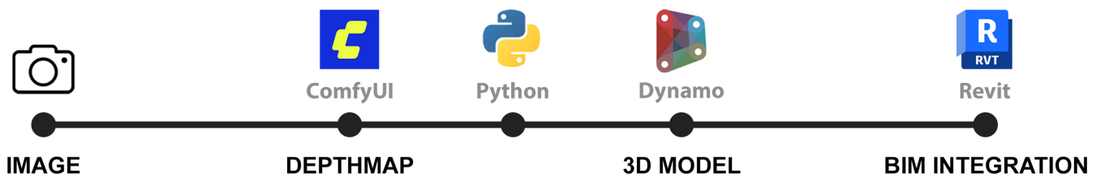


Fig. 1: Schema concettuale del *workflow* per la generazione dell'oggetto parametrico da inserire in ambiente BIM.

Fig. 1: Conceptual diagram of the workflow for generating the parametric object to be inserted into the BIM environment.

Introduction

In recent years, the progressive integration of digital technologies into the processes of documentation, analysis and management of architectural heritage has profoundly transformed the ways in which historic buildings are represented, interpreted and made available within complex knowledge systems [Rocha, 2024; Alshawabkeh, 2024].

Within this framework, Heritage Building Information Modeling (HBIM) is configured as an information system capable of connecting geometric data, material attributes, historical information, diagnostic elements and documentary contents [Yang, 2020; Croce, 2023].

The adoption of HBIM models and Digital Twin strategies is progressively shifting the documentation of the built heritage towards an information-based paradigm, in which three-dimensional data become an integral part of an interrogable, updatable and semantically structured ecosystem [Parrinello, 2023].

The advent of artificial intelligence and generative algorithms has introduced new operational possibilities aimed at the automation of reconstruction, interpretation and geometric production processes, particularly for decorative apparatuses comprising plastic elements, bas-reliefs, mouldings, cornices and sculptures [Gupta, 2024; Zhuang, 2025].

These components play a decisive role in defining the figurative, symbolic and cultural identity of historic buildings, yet they still represent one of the most problematic aspects within HBIM modeling processes [Miky, 2024]. At present, different strategies exist for the digitization and modeling of decorative apparatuses. Among these, manual modeling directly within a BIM environment allows for a high degree of parametric control, but it often proves extremely demanding in terms of time and operational rigidity, especially when representing organic or highly articulated forms [Docci, 2007]. In parallel, survey and reconstruction techniques with a high informational density, such as photogrammetry or Scan-to-BIM workflows, make it possible to obtain geometrically accurate and formally detailed representations, but they frequently produce models characterized by a high computational load, particularly when derived from dense meshes or high-resolution point clouds [Bianconi, 2024]. In certain contexts, such as facility management or the information organization of built heritage, the adoption of geometrically over-structured models risks compromising operational efficiency, thus making it necessary to define methodological procedures capable of ensuring an optimal balance between morphological fidelity, geometric lightness, production speed and the informational density of the integrated data [Nieto-Julián, 2021].

Within this framework, the SIDe-HBIM methodology (Single Image Depth–HBIM) is positioned as a semi-automatic pipeline based on depth inference from a single image, the computational evaluation of the generated depth maps and their subsequent parametric conversion into three-dimensional geometries that can be integrated into a BIM environment. The theoretical and operational assumption of the methodology is that the photographic image can be understood as an informational matrix from which a coherent and sufficiently recognizable three-dimensional geometry may be derived. Compared with traditional workflows based on dense acquisitions and high-precision reconstructions, the proposed approach prioritizes production speed and the computational sustainability of the final result. Moreover, the simplification of acquisition operations, resulting from the possibility of basing the workflow on a single image, reduces dependence on specialized equipment and particularly demanding survey campaigns. To obtain the input image, the use of commonly available devices, such as smartphones equipped with high-resolution cameras, is sufficient, thereby reducing acquisition time and costs and allowing issues related to the physical accessibility of decorative elements to be addressed more easily [Bianconi, 2026].

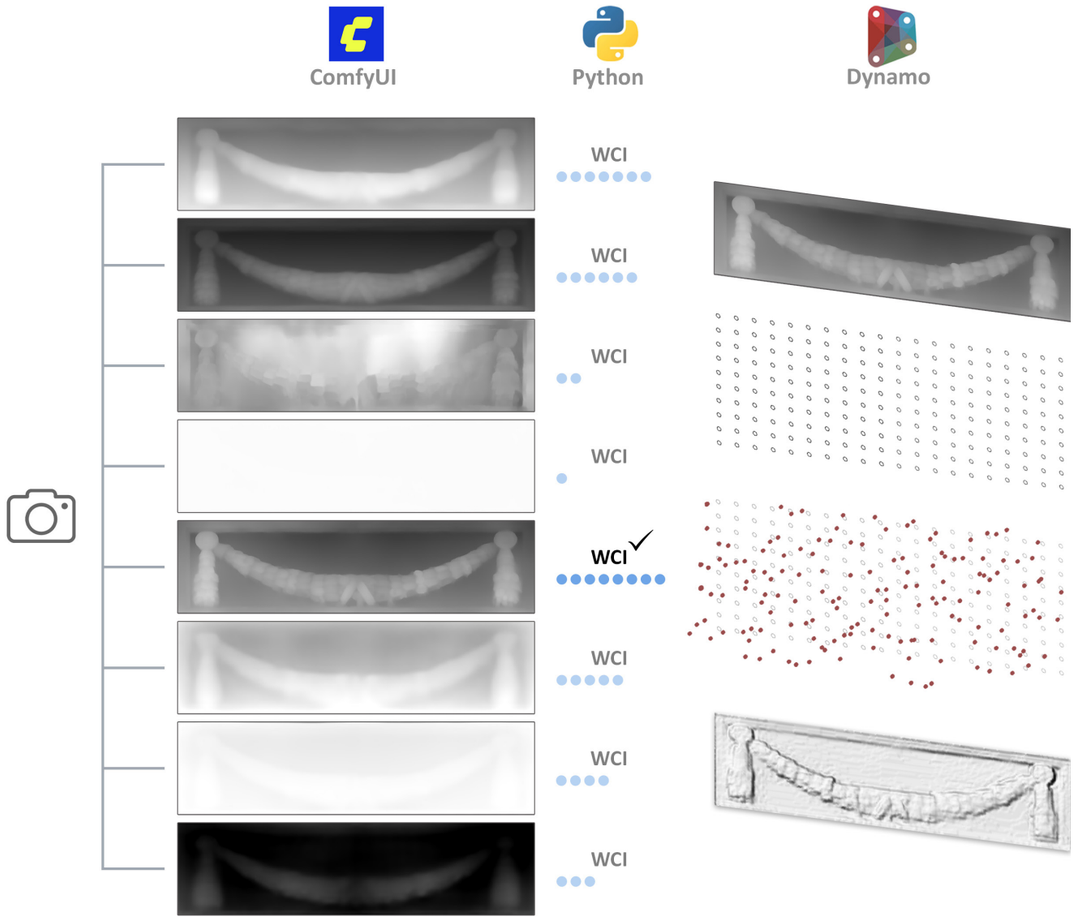


Fig. 2: *Pipeline* di valutazione e selezione delle depth map tramite indicatore (WCI) e successiva discretizzazione geometrica dell'elemento decorativo in ambiente Dynamo.

Fig. 2: Pipeline for the evaluation and selection of depth maps through the Weighted Composite Index (WCI), followed by the geometric discretization of the decorative element in the Dynamo environment.

Successivamente il *workflow* utilizza ComfyUI, piattaforma open-source che consente la costruzione di *pipeline* modulari tramite nodi configurabili. A partire dall'immagine di input, vengono eseguiti in parallelo diversi modelli di image-to-depth, selezionati per diversità metodologica. Ciascun modello privilegia specifici criteri di rappresentazione, generando output differenziati e ampliando il ventaglio delle possibili interpretazioni morfologiche. Per isolare l'oggetto di interesse viene applicata una maschera in modo da limitare l'inferenza alla sola porzione decorativa selezionata, riducendo rumore informativo e carico computazionale.

Le *depth map* generate vengono valutate tramite un processo automatizzato in Python, volto a ridurre la soggettività della selezione visiva. La procedura adotta un sistema di ranking fondato su indicatori quantitativi: contrasto, preservazione dei bordi, similarità strutturale rispetto all'immagine originaria ed entropia della distribuzione dei valori di profondità, così da escludere mappe eccessivamente uniformi o rumorose, selezionando quella più idonea alla modellazione parametrica. Le metriche, normalizzate e aggregate in un indice composito (WCI), rendono trasparente e replicabile il processo decisionale, consentendo il confronto coerente tra output differenti.

La fase finale trasforma la *depth map* selezionata in un oggetto tridimensionale parametrico integrato in Autodesk Revit tramite Dynamo. Qui la *depth map* è reinterpretata come campo scalare bidimensionale campionato, in cui ogni valore di intensità rappresenta la profondità relativa. I dati vengono trasferiti in un dominio parametrico (u,v) attraverso una griglia regolare bidimensionale a cui viene assegnata la coordinata Z in funzione dei valori cromatici. Il risultato è una lattice coerente con la morfologia dell'elemento decorativo che viene convertita in una NURBS. La geometria risultante è esportabile in formati interoperabili standard (obj, fbx) oppure direttamente integrabile in Revit come massa concettuale o famiglia caricabile, pronta per l'implementazione di parametri informativi e catalografici. L'intero sistema si inserisce in un framework già validato attraverso il confronto della griglia tridimensionale con dati ottenuti da rilievi laser scanning e fotogrammetrici degli stessi elementi dell'apparato decorativo, mediante analisi *cloud-to-cloud* eseguita in CloudCompare.

Il passaggio da geometria generata in ambiente Dynamo a famiglia caricabile in Revit rappresenta un momento centrale del *workflow*, in quanto segna la transizione da una rappresentazione puramente geometrica a un oggetto nativamente integrato nel sistema BIM. Ai fini dell'integrazione nel modello, la geometria ottenuta può essere predisposta, già nella fase di elaborazione parametrica, per una prima classificazione tipologica dell'elemento. La successiva importazione in ambiente Revit consente inoltre di trasformare tale geometria in un oggetto informativo semanticamente implementabile mediante parametri di tipo, di istanza o condivisi. Tali parametri possono includere dati descrittivi, materici, dimensionali e posizionali, oltre a collegamenti a fonti documentali esterne. In questo modo, il modello diviene un componente interrogabile e progressivamente implementabile all'interno dell'ecosistema HBIM (Fig. 3).

Applicazione al caso studio e discussione dei risultati

Per verificare l'efficacia del *workflow*, la sperimentazione è stata applicata a un elemento decorativo scultoreo situato nella Basilica di Santa Maria degli Angeli ad Assisi. L'oggetto è collocato in una nicchia sopraelevata di uno dei pilastri della crociera, parte del sistema strutturale che sostiene la cupola (Fig. 4). L'elemento selezionato presenta elevata complessità morfologica, dovuta ad articolazioni volumetriche profonde, sovrapposizioni plastico-anatomiche e dinamiche del panneggio, oltre all'integrazione con il sistema architettonico. A tali aspetti si aggiunge la difficile accessibilità fisica dell'elemento, che impedisce il rilievo diretto e rende problematica anche l'acquisizione mediante laser scanning o fotogrammetria da terra. Nonostante la precedente sperimentazione abbia evidenziato alcune criticità nella ricostruzione di elementi caratterizzati da forte complessità plastica, il caso studio è stato

Materials and Methods

The proposed approach is configured as an integrated computational workflow aimed at transforming a single photographic image into an interoperable parametric object within an HBIM environment (Fig. 1). The process connects four technological environments: artificial intelligence models for depth map generation, an algorithmic module for automated evaluation, a parametric modeling system in Dynamo integrated within Autodesk Revit and the insertion of the resulting parametric object into the BIM model developed in the same software environment (Fig. 2).

The first phase consists of acquiring a photographic image of the decorative element, which constitutes the starting point of the entire process. The ideal configuration involves a shot taken as orthogonally as possible to the subject, in order to reduce perspective distortions and facilitate depth inference. Nevertheless, the method remains effective for elevated or difficult-to-access elements, where acquisition can only be performed from a greater distance or from a position that is not perfectly aligned. Unlike traditional photogrammetric procedures, controlled lighting conditions are not required; shadows and lighting variations may, in fact, improve the legibility of depth differences.

The workflow subsequently employs ComfyUI, an open-source platform that enables the construction of modular pipelines through configurable nodes. Starting from the input image, several image-to-depth models are executed in parallel, selected on the basis of their methodological diversity. Each model prioritizes specific representational criteria, generating differentiated outputs and broadening the range of possible morphological interpretations. To isolate the object of interest, a mask is applied in order to limit the inference process to the selected decorative portion, thereby reducing informational noise and computational load.

The generated depth maps are evaluated through an automated Python-based process aimed at reducing the subjectivity of visual selection. The procedure adopts a ranking system based on quantitative indicators: contrast, edge preservation, structural similarity with respect to the original image and entropy of the distribution of depth values. This allows excessively

This contribution focuses on the final phase of the workflow, concerning the transformation of the geometry derived from depth maps into a parametric family loadable within Autodesk Revit, moving beyond the three-dimensional generation of the decorative apparatus already addressed in previous studies[Bianconi, 2026]. The current methodological application was developed on the Basilica of Santa Maria degli Angeli in Assisi, selecting a single ornamental element considered particularly significant for analyzing the issues related to the automated generation of the BIM family, its parametrization and its subsequent integration within the information model.

comunque selezionato in quanto particolarmente significativo per affrontare le sfide specifiche della fase metodologica oggetto del presente contributo, ossia l'integrazione dell'oggetto generato all'interno del modello BIM. La scelta di un elemento collocato in

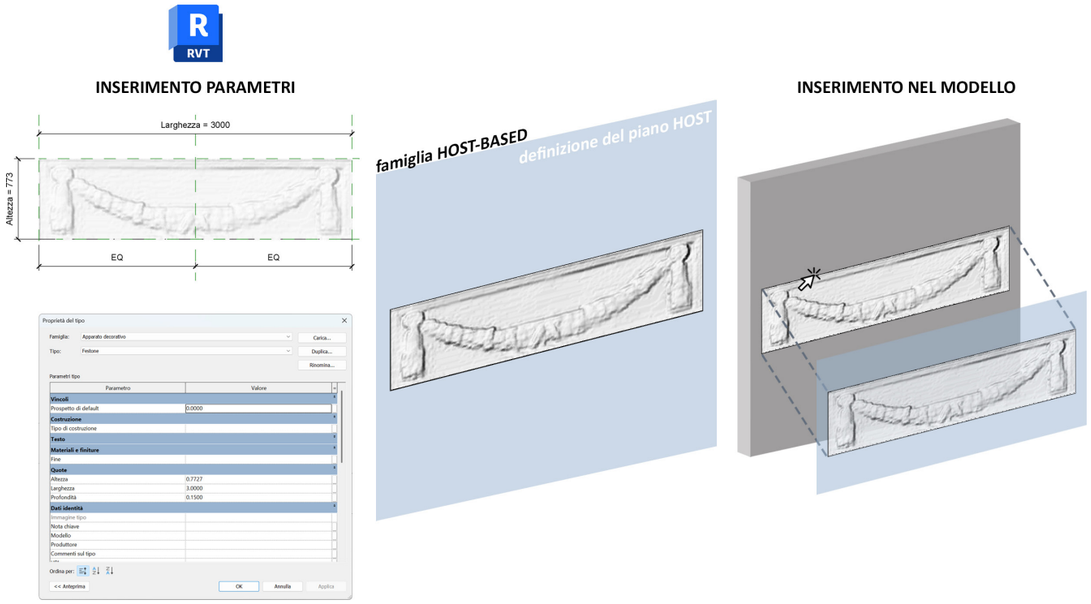


Fig. 3: Processo di popolamento informativo dell'oggetto geometrico e sua successiva collocazione geometrica nel modello HBIM.

Fig. 3: Process of information enrichment of the geometric object and its subsequent geometric placement within the HBIM model.

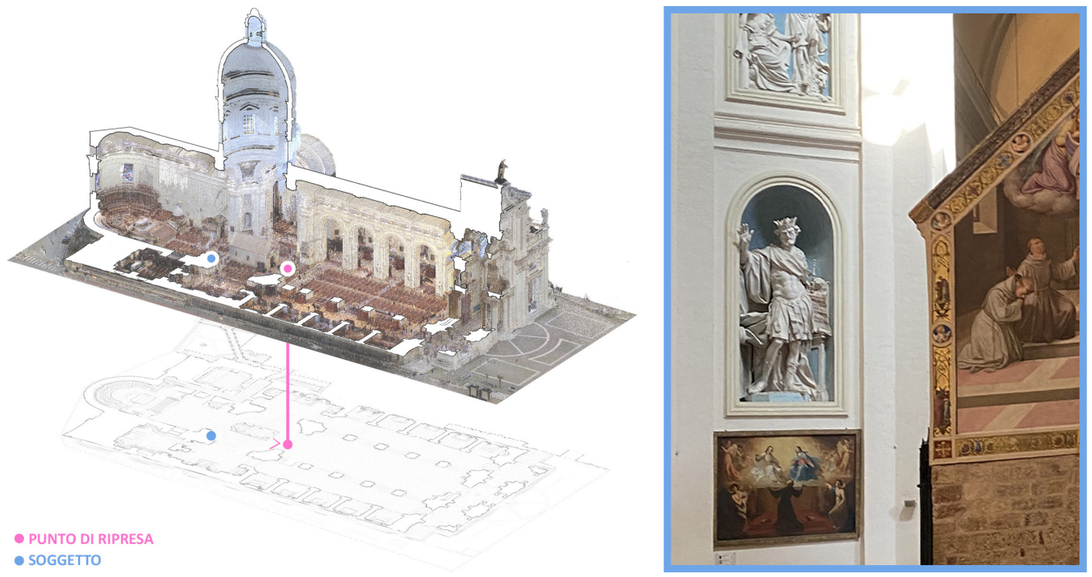


Fig. 4: Individuazione del caso studio e del punto di ripresa all'interno della Basilica di Santa Maria degli Angeli.

Fig. 4: Case study identification and acquisition point within the Basilica of Santa Maria degli Angeli.

uniform or noisy maps to be excluded, selecting the one most suitable for parametric modeling. The metrics, normalized and aggregated into a composite index (WCI), nicchia consente infatti di indagare in modo più approfondito le problematiche legate agli elementi rientranti, che richiedono strategie di inserimento più articolate rispetto ai componenti semplicemente aggettanti e sovrapposti alla superficie muraria.

Per iniziare, è stata acquisita un'immagine ad alta risoluzione della scultura, con orientamento il più possibile ortogonale, riducendo distorsioni prospettiche e deformazioni potenzialmente critiche per le fasi successive. La valutazione automatizzata ha confrontato otto *depth map*, evidenziando differenze significative nella rappresentazione della morfologia. La soluzione prodotta da Depth Anything V2 Relative ha ottenuto il punteggio più alto del *Weighted Composite Index* (WCI = 0.934), con SSIM pari a 1.000 ed elevata entropia (0.991), indicativa di buona capacità di rappresentazione della complessità superficiale (Fig. 5).

La *depth map* selezionata è stata utilizzata nel processo di modellazione in Dynamo, dove la conversione in griglia e successiva interpolazione ha prodotto una superficie continua coerente con la geometria dell'elemento, priva di artefatti significativi e capace di restituire in modo leggibile le principali articolazioni volumetriche della scultura, comprese le pieghe del panneggio e le sovrapposizioni tra figura e sfondo (Fig. 6). Nonostante l'efficacia complessiva della *pipeline*, l'applicazione ha evidenziato alcuni limiti, soprattutto nelle aree ad alta frequenza geometrica, come mani, volti e texture sottili, e nelle zone in ombra o a basso contrasto, dove la ricostruzione tende a perdere dettaglio e a produrre una certa rigidità dei microvolumi. Tuttavia, la coerenza macro-formale dell'elemento è stata preservata, confermando l'idoneità del *workflow* e ottenendo un livello qualitativo compatibile con un LOD 300–350, adeguato a usi museali, documentari e gestionali.

La geometria generata in Dynamo è stata successivamente integrata in Revit come famiglia caricabile, assumendo una categorizzazione coerente con la tassonomia adottata nel modello HBIM della Basilica. Al fine di trasformare il componente in un elemento informativo funzionale ai processi di organizzazione e consultazione dei dati del modello, la famiglia è stata implementata con parametri descrittivi, dimensionali e documentali, relativi alla denominazione, alla tipologia, al materiale, allo stato di conservazione, alle principali misure e ai collegamenti con fonti esterne. In particolare, sono stati associati campi informativi riferiti alle campagne di rilievo, all'archivio storico, alla documentazione fotografica e agli interventi di restauro, secondo la struttura già prevista nel sistema informativo HBIM della Basilica (*HERITAGE DOCUMENTATION_survey, HERITAGE DOCUMENTATION_archive, HERITAGE DOCUMENTATION_photo* e *HERITAGE DOCUMENTATION_restoration work*). Per l'effettivo inserimento dell'oggetto nel modello, l'elemento è stato pensato come famiglia *host-based*, destinata all'ancoraggio su superfici architettoniche del modello.

Nel caso degli elementi aggettanti, il componente può essere direttamente posizionato sulla superficie di riferimento, mentre nei casi in cui l'elemento risulti parzialmente incassato, inserito in nicchia o strettamente connesso alla muratura, è necessario prevedere un adattamento geometrico più complesso. Nel caso analizzato, la geometria parametrica è stata infatti combinata con la parametrizzazione di un elemento di vuoto, così da permettere il corretto alloggiamento e limitare le interferenze con la muratura esistente (Fig. 7-8).

make the decision-making process transparent and replicable, enabling a coherent comparison between different outputs. The final phase transforms the selected depth map into a parametric three-dimensional object integrated into Autodesk Revit through Dynamo. Here, the depth map is reinterpreted as a sampled two-dimensional scalar field, in which each intensity value represents relative depth. The data are transferred into a parametric domain (u,v) through a regular two-dimensional grid, to which the Z coordinate is assigned according to the chromatic value. The result is a lattice consistent with the morphology of the decorative element, which is then converted into a NURBS surface. The resulting geometry can be exported in standard interoperable formats (OBJ, FBX) or directly integrated into Revit as a conceptual mass or loadable family, ready for the implementation of informational and cataloguing parameters. The entire system is situated within a framework already validated through the comparison of the three-dimensional grid with data obtained from laser scanning and photogrammetric surveys of the same elements of the decorative apparatus, using cloud-to-cloud analysis performed in CloudCompare. The transition from geometry generated in the Dynamo environment to a loadable family in Revit represents a central stage of the workflow, as it marks the shift from a purely geometric representation to an object natively integrated within the BIM system. For the purposes of integration into the model, the resulting geometry can already be prepared during the parametric processing phase for an initial typological classification of the element. Its subsequent import into the Revit environment also makes it possible to transform this geometry into a semantically implementable information object through type, instance, or shared parameters. These parameters may include descriptive, material, dimensional and positional data, as well as links to external documentary sources. In this way, the model becomes an interrogable and progressively implementable component within the HBIM ecosystem (Fig. 3).

Application to the Case Study and Discussion of the Results

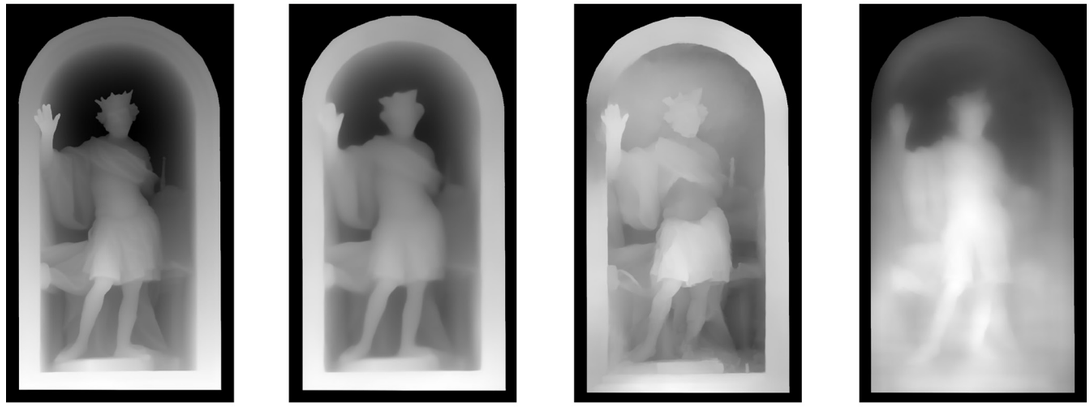
To verify the effectiveness of the workflow, the experimentation was applied to a

Depth Anything v2 Relative	
CONTRAST	0.848
EDGE PRESERVATION	0.858
SSIM	1.000
DEPTH DISTRIBUTION	0.991
INDICE SINTETICO PONDERATO	**0.934**

Depth Anything	
CONTRAST	0.880
EDGE PRESERVATION	0.956
SSIM	0.786
DEPTH DISTRIBUTION	0.977
INDICE SINTETICO PONDERATO	**0.891**

LeReS DepthMap	
CONTRAST	0.930
EDGE PRESERVATION	0.989
SSIM	0.612
DEPTH DISTRIBUTION	0.547
INDICE SINTETICO PONDERATO	**0.783**

MiDaS DepthMap	
CONTRAST	0.912
EDGE PRESERVATION	0.314
SSIM	0.607
DEPTH DISTRIBUTION	0.878
INDICE SINTETICO PONDERATO	**0.632**



Zoe Depth Map	
CONTRAST	0.768
EDGE PRESERVATION	0.478
SSIM	0.413
DEPTH DISTRIBUTION	0.179
INDICE SINTETICO PONDERATO	**0.482**

Zoe Depth Anything (outdoor)	
CONTRAST	0.812
EDGE PRESERVATION	0.681
SSIM	0.015
DEPTH DISTRIBUTION	0.129
INDICE SINTETICO PONDERATO	**0.461**

Zoe Depth Anything (indoor)	
CONTRAST	0.823
EDGE PRESERVATION	0.672
SSIM	0.009
DEPTH DISTRIBUTION	0.077
INDICE SINTETICO PONDERATO	**0.359**

Metric3D Depth Map	
CONTRAST	0.198
EDGE PRESERVATION	0.004
SSIM	0.002
DEPTH DISTRIBUTION	0.000
INDICE SINTETICO PONDERATO	**0.048**



Fig. 5: Analisi comparativa delle depth map e dei relativi indici statistici per l'individuazione del risultato ottimale per il caso studio.

Fig. 5: Comparative analysis of the depth maps and their related statistical indices for identifying the optimal result for the case study.

Conclusioni

L'applicazione del *workflow* SIDe-HBIM al caso studio della Basilica di Santa Maria degli Angeli ha evidenziato come il metodo consenta di modellare rapidamente apparati decorativi complessi, integrandoli all'interno del modello HBIM come componenti informativi interrogabili attraverso l'associazione di dati descrittivi e documentali. Grazie a parametri dedicati e richiami strutturati, infatti, la famiglia può diventare un nodo di accesso a fotografie, fonti archivistiche e documenti tecnici, favorendo processi di organizzazione e gestione delle informazioni maggiormente strutturati ed efficienti.

La parametrizzazione dei vuoti permette inoltre di controllare con maggiore precisione le relazioni geometriche tra apparato sculptural decorative element located in the Basilica of Santa Maria degli Angeli in Assisi. The object is placed in an elevated niche on one of the crossing pillars, which forms part of the structural system supporting the dome (Fig. 4). The selected element presents a high degree of morphological complexity, due to deep volumetric articulations, plastic-anatomical overlaps and dynamic drapery configurations, as well as its integration with the architectural system. These aspects are further compounded by the difficult physical accessibility of the

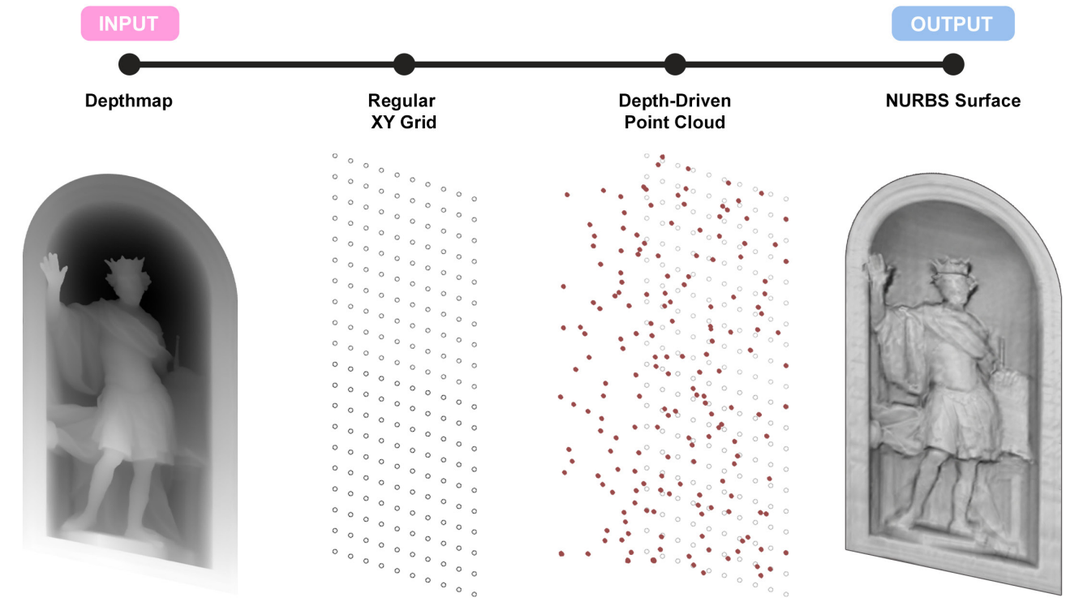


Fig. 6: Processo di conversione della depth map individuata in nuvola di punti e successiva e interpolazione finale in NURBS.

Fig. 6: Converting process of the selected depth map into a point cloud, followed by its final interpolation into a NURBS surface.

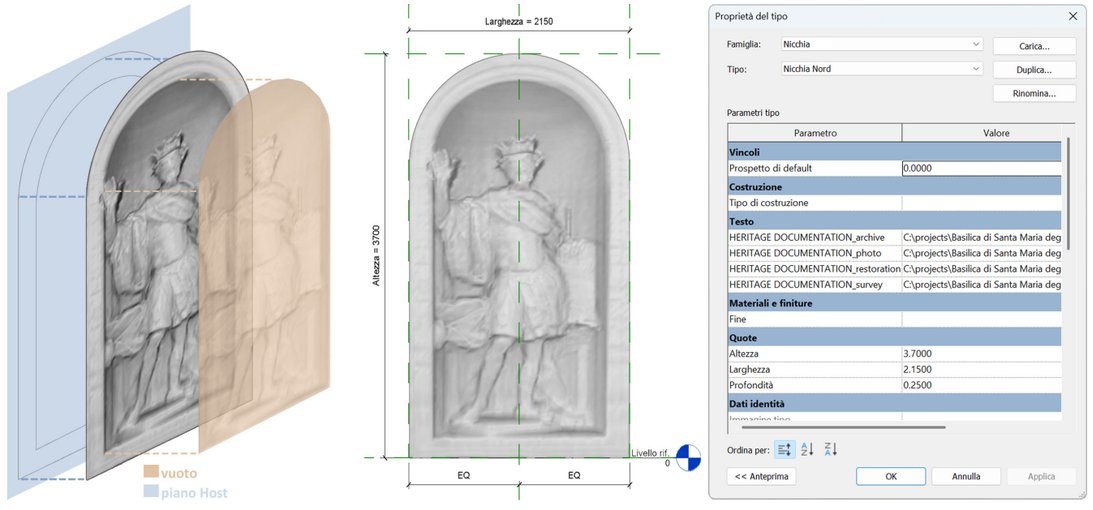


Fig. 7: Processo di definizione della famiglia caricabile in ambiente Revit: assegnazione del piano di host e combinazione con solidi di vuoto per garantire un corretto alloggiamento nel modello (a sinistra) e strutturazione dei parametri dimensionali e informativi (a destra).

Fig. 7: Process for defining the loadable family in Revit environment: assignment of the host plane and combination with void solids to ensure correct accommodation within the model (left) and structuring of the information and dimensional parameters (right).

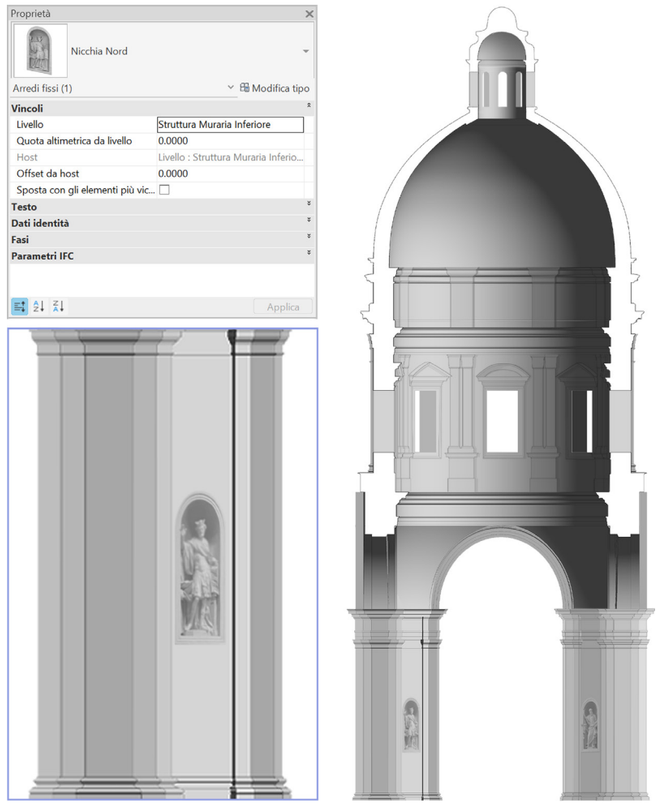


Fig. 8: Integrazione dell'elemento parametrico nel contesto architettonico.

Fig. 8: Integration of the parametric element within the architectural context.

decorativo e superficie architettonica ospitante, rendendo più efficace l'integrazione del componente all'interno del modello HBIM. Tale soluzione contribuisce a una miglior accuratezza della rappresentazione e alla compatibilità dell'elemento con le logiche parametriche, pur senza appesantire eccessivamente il modello. Questo approccio permette infatti di ottenere componenti caratterizzati da un buon equilibrio tra dettaglio geometrico e sostenibilità computazionale, risultando particolarmente adatto nei processi di facility management e nella gestione operativa del patrimonio costruito, nei quali rapidità di interrogazione, fluidità di navigazione e stabilità del modello assumono un ruolo centrale.

Il *workflow* proposto si configura pertanto come una metodologia capace di trasformare rapidamente l'apparato decorativo da elemento marginale e difficilmente modellabile a componente informativo attivo all'interno del sistema HBIM, apportando una maggiore efficacia operativa nella gestione integrata delle informazioni e supportando procedure di consultazione e controllo del patrimonio.

element, which prevents direct surveying and also makes acquisition through laser scanning or ground-based photogrammetry problematic.

Although previous experimentation had highlighted certain critical issues in the reconstruction of elements characterized by strong plastic complexity, the case study was nevertheless selected as it is particularly significant for addressing the specific challenges of the methodological phase examined in the present contribution, namely the integration of the generated object within the BIM model. The choice of an element located within a niche makes it possible to investigate in greater depth the issues related to recessed elements, which require more articulated insertion strategies than components that are simply projecting from or superimposed onto the wall surface.

As an initial step, a high-resolution image of the sculpture was acquired, with an orientation as orthogonal as possible, thereby reducing perspective distortions and deformations that could potentially affect the subsequent phases. The automated evaluation compared eight depth maps, highlighting significant differences in the representation of morphology. The solution produced by Depth Anything V2 Relative obtained the highest score in the Weighted Composite Index (WCI = 0.934), with an SSIM value of 1.000 and high entropy (0.991), indicating a good capacity to represent surface complexity (Fig. 5).

The selected depth map was used in the modeling process in Dynamo, where its conversion into a grid and subsequent interpolation produced a continuous surface consistent with the geometry of the element, free from significant artifacts and capable of legibly restituting the main volumetric articulations of the sculpture, including the folds of the drapery and the overlaps between figure and background (Fig. 6). Despite the overall effectiveness of the pipeline, the application revealed certain limitations, particularly in areas with high geometric frequency, such as hands, faces and fine textures, as well as in shadowed or low-contrast zones, where the reconstruction tends to lose detail and produce a certain rigidity in the micro-volumes. Nevertheless, the macro-formal coherence of the element was preserved, confirming the suitability of the workflow and achieving a qualitative level compatible with LOD 300–350, appropriate for museum, documentary and management purposes.

The geometry generated in Dynamo was subsequently integrated into Revit as a loadable family, adopting a categorization consistent with the taxonomy used in the HBIM model of the Basilica. In order to transform the component into an information object functional to the processes of data organization and consultation within the model, the family was implemented with descriptive, dimensional and documentary parameters relating to its designation, typology, material, state of conservation, main measurements and links to external sources. In particular, information fields were associated with survey campaigns, the historical archive, photographic documentation and restoration interventions, according to the structure already established in the HBIM information system of the Basilica: HERITAGE DOCUMENTATION_survey, HERITAGE DOCUMENTATION_archive, HERITAGE DOCUMENTATION_photo and HERITAGE DOCUMENTATION_restoration work. For the actual insertion of the object into the model, the element was conceived as a host-based family, intended to be anchored to the architectural surfaces of the model. In the case of projecting elements, the component can be positioned directly on the reference surface, whereas in cases where the element is partially embedded, located within a niche, or closely connected to the masonry, a more complex geometric adaptation must be provided. In the case analyzed, the parametric geometry was therefore combined with the parametrization of a void element, allowing for correct accommodation and limiting interference with the existing masonry (Fig. 7-8).

Conclusions

The application of the SIDe-HBIM workflow to the case study of the Basilica of Santa Maria degli Angeli has highlighted how the method enables the rapid modeling of complex decorative apparatuses, integrating them into the HBIM model as interrogable information components through the association of descriptive and documentary data. With dedicated parameters and structured references, the family can in fact become an access node to photographs, archival sources and technical

Bibliografia

Alshawabkeh Y., Baik A., Miky Y. (2024). HBIM for conservation of built heritage. In ISPRS International Journal of Geo-Information, n. 13(7), art. 231. Basel: MDPI. https://doi.org/10.3390/ijgi13070231

Bianconi F., Filippucci M., Cerbai C., Cornacchini F., Migliosi A. (2026). SIDe-HBIM: Single-image depth inference as a tool for semi-automatic decorative modeling. In Heritage, n. 9(2), art. 70. Basel: MDPI. https://doi.org/10.3390/heritage9020070

Bianconi F., Filippucci M., Cornacchini F., Migliosi A. (2024). The impact of Google's APIs on landscape virtual representation. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLVIII-4/W9-2024, pp. 91-98. Göttingen: Copernicus Publications. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-91-2024

Croce V., Caroti G., Piemonte A., De Luca L., Véron P. (2023). H-BIM and artificial intelligence: Classification of architectural heritage for semi-automatic scan-to-BIM reconstruction. In Sensors, n. 23(5), art. 2497. Basel: MDPI. https://doi.org/10.3390/s23052497

Docci M. (2007). Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la realizzazione di modelli virtuali dell'architettura della città. Roma: Gangemi editore.

Gupta P., Ding B., Guan C., Ding D. (2024). Generative AI: A systematic review using topic modelling techniques. In Data and Information Management, n. 8(2), art. 100066. Amsterdam: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.dim.2024.100066

Miky Y., Alshawabkeh Y., Baik A. (2024). Using deep learning for enrichment of heritage BIM: Al Radwan house in historic Jeddah as a case study. In Heritage Science, n. 12(1), art. 255. Berlin: Springer. https://doi.org/10.1186/s40494-024-01382-3

Nieto-Julián J. E., Lara L., Moyano J. (2021). Implementation of a TeamWork-HBIM for the management and sustainability of architectural heritage. In Sustainability, n. 13(4), art. 2161. Basel: MDPI. https://doi.org/10.3390/su13042161

Parrinello S., Sanseverino A., Fu H. (2023). HBIM modelling for the architectural valorisation via a maintenance digital eco-system. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLVIII-M-2-2023, pp. 1157-1164. Göttingen: Copernicus Publications. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1157-2023

Rocha G., Mateus L. (2024). Using Dynamo for automatic reconstruction of BIM elements from point clouds. In Applied Sciences, n. 14(10), art. 4078. Basel: MDPI. https://doi.org/10.3390/app14104078

Yang X., Grussenmeyer P., Koehl M., Macher H., Murtiyoso A., Landes T. (2020). Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. In Journal of Cultural

Heritage, n. 46, pp. 350-360. Amsterdam: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008

Zhuang X., Zhu P., Yang A., Caldas L. (2025). Machine learning for generative architectural design: Advancements, opportunities, and challenges. In Automation in Construction, n. 174, art. 106129. Amsterdam: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106129

documents, supporting more structured and efficient processes of information organization and management.

The parametrization of voids also makes it possible to control more precisely the geometric relationships between the decorative apparatus and the hosting architectural surface, making the integration of the component within the HBIM model more effective. This solution contributes to greater accuracy in representation and to the compatibility of the element with parametric logics, without excessively increasing the weight of the model. Indeed, this approach makes it possible to obtain components characterized by a balanced relationship between geometric detail and computational sustainability, proving particularly suitable for facility management processes and for the operational management of built heritage, in which rapid querying, smooth navigation and model stability play a central role.

The proposed workflow can therefore be understood as a methodology capable of rapidly transforming the decorative apparatus from a marginal and difficult-to-model element into an active information component within the HBIM system, providing greater operational effectiveness in the integrated management of information and supporting procedures for the consultation and control of heritage assets.

Autori

Ivan Paduano[1]

[1] Sapienza Università di Roma

Email

ivan.paduano@uniroma1.it

Keywords

GENAI
3D GAUSSIAN SPLATTING
BIM
NERF
COMPUTATIONAL ARCHITECTURE

IA Generativa per l'Architettura 3D: dai NeRF al BIM

Generative AI for 3D Architecture: from NeRFs to BIM

Abstract

L'articolo analizza la transizione dell'architettura verso l'IA Generativa, dai NeRF al 3D Gaussian Splatting. Confrontando Rodin, Tripo e Meshy, si evidenziano le sfide topologiche (geometrie non-manifold) e semantiche per l'integrazione nei flussi BIM, prospettando il futuro workflow AI-to-BIM.

The paper analyzes architecture's transition to Generative AI, from NeRFs to 3D Gaussian Splatting. Comparing Rodin, Tripo, and Meshy, it highlights the topological (non-manifold geometries) and semantic challenges for BIM integration, envisioning the future AI-to-BIM workflow.

La Transizione Epistemologica nel Design

L'architettura contemporanea sta vivendo una fase di transizione epistemologica senza precedenti, guidata dal dirompente avvento dell'Intelligenza Artificiale Generativa (GenAI). Se l'ultimo ventennio della progettazione architettonica è stato indiscutibilmente definito dal paradigma parametrico, basato su relazioni algoritmiche esplicite e su una logica deterministica dello spazio, l'attuale frontiera si sposta rapidamente verso la generazione implicita e statistica dello spazio architettonico [Carpo, 2017]. In questo nuovo scenario, il ruolo dell'architetto subisce una profonda evoluzione: si passa dalla definizione diretta e manuale della geometria (vertici, spigoli, facce) alla curatela di input testuali e visivi. Attraverso il prompt engineering, il progettista guida la sintesi di forme tridimensionali complesse, delegando all'algoritmo probabilistico l'onere della modellazione esecutiva della forma pura.

Fondamenti Tecnologici: dai NeRF al 3D Gaussian Splatting

Fino alla fine del 2023, la tecnologia dominante per la sintesi 3D spaziale è stata rappresentata dai Neural Radiance Fields (NeRF). Questo approccio rivoluzionario codifica un'intera scena tridimensionale non attraverso la geometria convenzionale, ma immagazzinando i dati di densità volumetrica e colore nei pesi di una rete neurale multistrato (MLP) (Fig. 1).

Nonostante la straordinaria capacità di catturare dettagli fotorealistici estremi, compresi riflessi e trasparenze complesse, i NeRF presentano limitazioni critiche per la progettazione professionale. Tra questi spiccano i costi computazionali elevatissimi per il *rendering* e, soprattutto, un'intrinseca "opacità geometrica". L'estrazione di una *mesh* esplicita da questi campi di densità neurale produce quasi sempre una topologia irregolare, non strutturata e affetta da gravosi artefatti visivi e spaziali, rendendo il modello risultante inagibile nei software CAD tradizionali [Mildenhall, 2020]. Il biennio 2024-2025 ha segnato tuttavia un

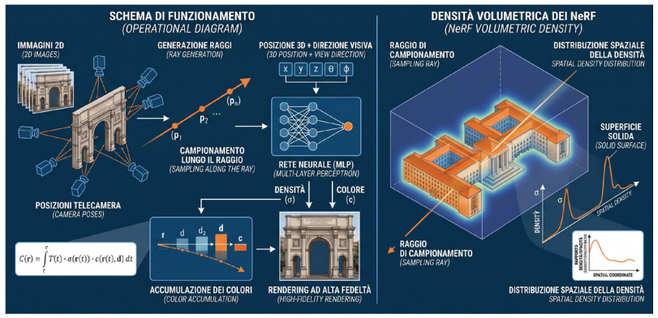


Fig. 1: Schema di funzionamento e densità volumetrica dei Neural Radiance Fields (NeRF).

Fig. 1: Operational diagram and volumetric density of Neural Radiance Fields (NeRFs).

The Epistemological Transition in Design

Contemporary architecture is experiencing an unprecedented phase of epistemological transition, driven by the disruptive advent of Generative Artificial Intelligence (GenAI). While the last two decades of architectural design were undeniably defined by the parametric paradigm, based on explicit algorithmic relationships and a deterministic logic of space, the current frontier is rapidly shifting towards the implicit and statistical generation of architectural space [Carpo, 2017]. In this new scenario, the role of the architect undergoes a profound evolution: shifting from the direct and manual definition of geometry (vertices, edges, faces) to the curation of textual and visual inputs. Through prompt engineering, the designer guides the synthesis of complex three-dimensional forms, delegating the burden of executive modeling of pure form to the probabilistic algorithm.

Technological Foundations: from NeRFs to 3D Gaussian Splatting

Until the end of 2023, the dominant technology for 3D spatial synthesis was represented by Neural Radiance Fields (NeRFs). This revolutionary approach encodes an entire three-dimensional scene not through conventional geometry, but by storing volumetric density and color data in the weights of a Multi-Layer Perceptron (MLP) neural network (Fig. 1). Despite their extraordinary ability to capture extreme photorealistic details, including complex reflections and transparencies, NeRFs present critical limitations for professional design. Chief among these are the very high computational costs for rendering and, above all, an intrinsic "geometric opacity". Extracting an explicit mesh from these neural density fields almost always produces an irregular, unstructured topology plagued by severe visual and spatial artifacts, rendering the resulting model unusable in traditional CAD software [Mildenhall, 2020]. However, the 2024-2025 biennium marked a rapid and radical shift towards 3D Gaussian Splatting (3DGS). Unlike NeRFs, 3DGS utilizes a completely explicit representation of

rapido e radicale spostamento verso il 3D Gaussian Splatting (3DGS). A differenza dei NeRF, il 3DGS utilizza una rappresentazione completamente esplicita dello spazio, basata su nuvole sparse di primitive gaussiane, paragonabili a minuscoli ellissoidi tridimensionali.

Ognuno di questi ellissoidi possiede coordinate spaziali, rotazione, scala, colore e livello di opacità predefiniti (Fig. 2). Questo approccio ha permesso *rendering* fluidi *in real-time* tramite un processo di rasterizzazione ottimizzato, restituendo agli utenti la possibilità di una manipolazione diretta della geometria [Kerbl, 2023]. Nonostante questi traguardi, la sfida tecnica principale rimane ancorata alla generazione *text-to-3D*, che si appoggia spesso ad algoritmi di Score Distillation Sampling (SDS) [Poole, 2022].

Questa tecnica di campionamento soffre tipicamente del cosiddetto "Problema di Giano": l'IA tende a generare oggetti architettonici con incoerenze spaziali (es. facciate multiple sovrapposte o prospetti identici su tutti i lati), un difetto fatale per la logica distributiva e la coerenza che l'architettura esige.

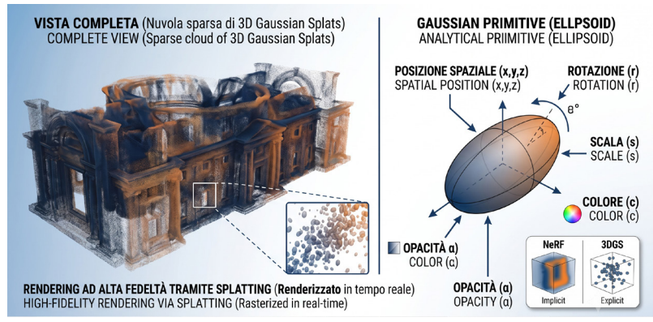


Fig. 2: Rappresentazione esplicita spaziale generata tramite 3D Gaussian Splatting.

Fig. 2: Explicit spatial representation generated via 3D Gaussian Splatting.

Analisi Comparativa delle Piattaforme (SOTA 2024-2025)

Il panorama odierno delle piattaforme generative si è fortemente frammentato, offrendo soluzioni che presentano specifici compromessi tra qualità della geometria e velocità di esecuzione (inferenza). La piattaforma Rodin (sviluppata da Deemos-Tech) rappresenta attualmente l'apice qualitativo per l'alta fedeltà geometrica e materica. Sfruttando un modello di diffusione 3D nativo e una rappresentazione ibrida a voxel, Rodin eccelle nella generazione di quad-mesh pulite e continue. Questo aspetto è essenziale per la successiva mappatura UV e per un editing CAD controllato, posizionando la piattaforma come lo strumento d'elezione per visualizzazioni *high-end* e design di prodotto.

Al contrario, Tripo AI punta tutto sull'estrema velocità di generazione, appoggiandosi a Large Reconstruction Models (LRM) basati su architettura Transformer. Tripo permette di sintetizzare *asset* tridimensionali in meno di 10 secondi tramite inferenza *feed-forward* (Fig. 3). Questa rapidità lo rende il candidato ideale per il *massing* volumetrico urbano e per le prime fasi di gara,

space based on sparse clouds of Gaussian primitives, comparable to tiny three-dimensional ellipsoids. Each of these ellipsoids possesses predefined spatial coordinates, rotation, scale, color, and opacity levels (Fig. 2). This approach has enabled fluid, real-time rendering through an optimized rasterization process, restoring users' ability to directly manipulate the geometry [Kerbl, 2023]. Despite these achievements, the main technical challenge remains tethered to text-to-3D generation, which often relies on Score Distillation Sampling (SDS) algorithms [Poole, 2022]. This sampling technique typically suffers from the so-called "Janus Problem": the AI tends to generate architectural objects with spatial inconsistencies (e.g., overlapping multiple facades or identical elevations on all sides), a fatal flaw for the distributive logic and coherence that architecture demands.

Comparative Analysis of Platforms (SOTA 2024-2025)

The current landscape of generative platforms is highly fragmented, offering solutions that present specific trade-offs between geometric quality and execution speed (inference). The Rodin platform (developed by DeemosTech) currently represents the qualitative pinnacle for high geometric and material fidelity. By leveraging a native 3D diffusion model and a hybrid voxel representation, Rodin excels in generating clean and continuous quad-meshes. This aspect is essential for subsequent UV mapping and controlled CAD editing, positioning the platform as the tool of choice for high-end visualizations and product design.

Conversely, Tripo AI focuses entirely on extreme generation speed, relying on Large Reconstruction Models (LRMs) based on Transformer architecture. Tripo can synthesize three-dimensional assets in less than 10 seconds via feed-forward inference (Fig. 3). This rapidity makes it the ideal candidate for urban volumetric massing and early competition phases, although the topological definition is often noticeably inferior compared to slow iterative methods. Finally, Meshy AI stands out in the market with its decoupled architecture: it clearly separates geometric generation from texturing. This provides de-

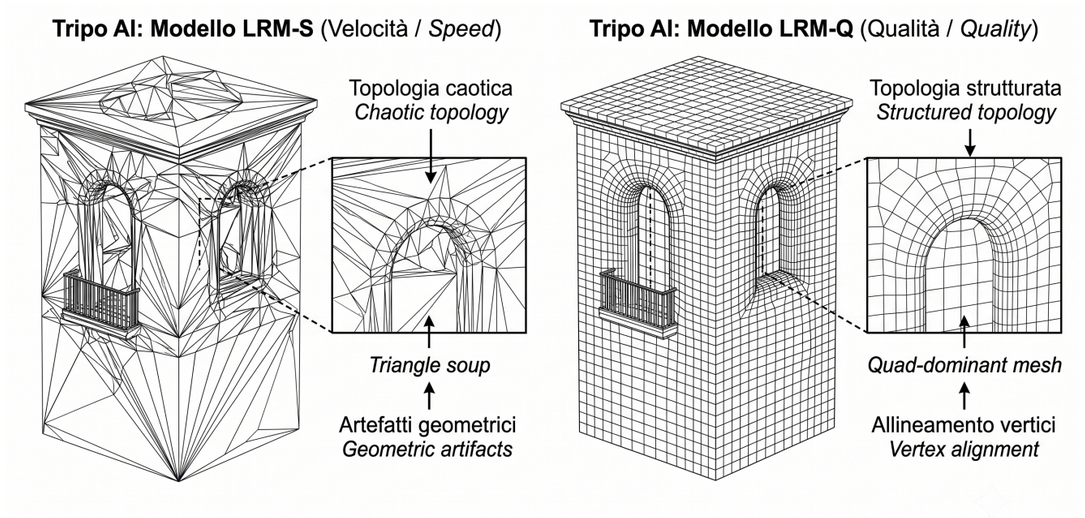


Fig. 3: Confronto della topologia geometrica generata dai modelli LRM (Tripo AI).

Fig. 3: Comparison of geometric topology generated by LRM models (Tripo AI).

sebbene la definizione topologica risulti spesso sensibilmente inferiore rispetto ai metodi iterativi lenti. Infine, Meshy AI si distingue nel mercato per la sua architettura disaccoppiata: separa nettamente la generazione geometrica dal *texturing*. Questo garantisce ai progettisti strumenti rapidissimi per la prototipazione di varianti materiche *in itinere*, pur pagando occasionalmente il prezzo di una topologia interna caotica, che si rivela inadatta in caso di deformazioni o analisi strutturali.

Il Nodo Gordiano: dal Generativo al BIM

Nonostante i formidabili progressi visivi descritti, l'integrazione degli *asset* generati dall'IA all'interno dei rigidi flussi di lavoro BIM (Building Information Modeling) incontra ostacoli che potremmo definire strutturali. Un modello BIM, per definizione, richiede oggetti solidi, parametrici e dotati di proprietà fisiche reali e computabili. L'IA, allo stato attuale, genera prevalentemente geometrie "non-manifold" (Fig. 4): pareti prive di spessore reale, compenetrazioni impossibili, e vertici isolati (*floating vertices*).

Inoltre, emergono continue "allucinazioni geometriche", come colonne portanti che non si allineano logicamente con le travi di intradosso. Nel dominio dell'ingegneria e dell'architettura costruita, la mera verosimiglianza estetica risulta insufficiente: i modelli esigono accuratezza metrica assoluta, chiusura ermetica dei volumi (*manifoldness*) e una corretta segmentazione gerarchica delle parti. I classici algoritmi *Scan-to-BIM* faticano ad interpretare le *mesh* dell'IA proprio a causa di questo estremo "rumore" topologico, rendendo vana la semplice conversione automatica [Eastman, 2011].

signers with extremely fast tools for prototyping material variants in itinere, although occasionally paying the price of chaotic internal topology, which proves unsuitable for structural deformations or analysis.

The Gordian Knot: from Generative to BIM

Despite the formidable visual progress described, integrating AI-generated assets into rigid Building Information Modeling (BIM) workflows encounters obstacles that could be defined as structural. A BIM model, by definition, requires solid, parametric objects endowed with real and computable physical properties. Currently, AI predominantly generates "non-manifold" geometries (Fig. 4): walls lacking actual thickness, impossible intersections, and floating vertices.

Furthermore, continuous "geometric hallucinations" emerge, such as load-bearing columns that fail to logically align with soffit beams. In the domain of engineering and built architecture, mere aesthetic verisimilitude is insufficient: models demand absolute metric accuracy, hermetic volume closure (manifoldness), and proper hierarchical segmentation of parts. Classic Scan-to-BIM algorithms struggle to interpret AI meshes precisely because of this extreme topological "noise," making simple automatic conversion futile [Eastman, 2011].

Prospettive Future: SemanticSplat e Intelligenza Costruttiva

Per poter finalmente colmare il divario esistente tra la "*mesh* colorata" prodotta dall'algoritmo e l'"elemento costruttivo" richiesto dalla professione, la frontiera della ricerca si sta muovendo verso la generazione semanticamente consapevole. Le nuove tecnologie, identificate sotto il termine ombrello di SemanticSplat, non si limitano a colorare lo spazio, ma arricchiscono le gaussiane 3D con vettori semantici profondi. Questo significa che il modello generato diventa direttamente interrogabile: l'utente può chiedere al software di "selezionare tutte le finestre", permettendo la conversione automatica di specifiche porzioni di geometria in famiglie BIM pre-parametrizzate.

Il futuro di questo settore, dunque, non è solo visivo, ma vedrà la nascita di una vera e propria "IA Costruttiva". Si tratterà di modelli multimodali addestrati non più esclusivamente su dataset di immagini bidimensionali, ma direttamente su banche dati BIM, disegni CAD e standard costruttivi IFC.

Questo inedito *training* consentirà all'algoritmo di apprendere la logica portante, riducendo drasticamente le allucinazioni e comprendendo, *a priori*, che una colonna possiede una specifica funzione statica e non puramente estetica. L'adozione di standard aperti inter-operabili come USD (Universal Scene Description) e IFC (Industry Foundation Classes) rappresenterà il ponte finale per facilitare il passaggio fluido, continuo e privo di perdite di dati dai "sogni" latenti dell'IA Generativa alla tangibile realtà del cantiere edile.

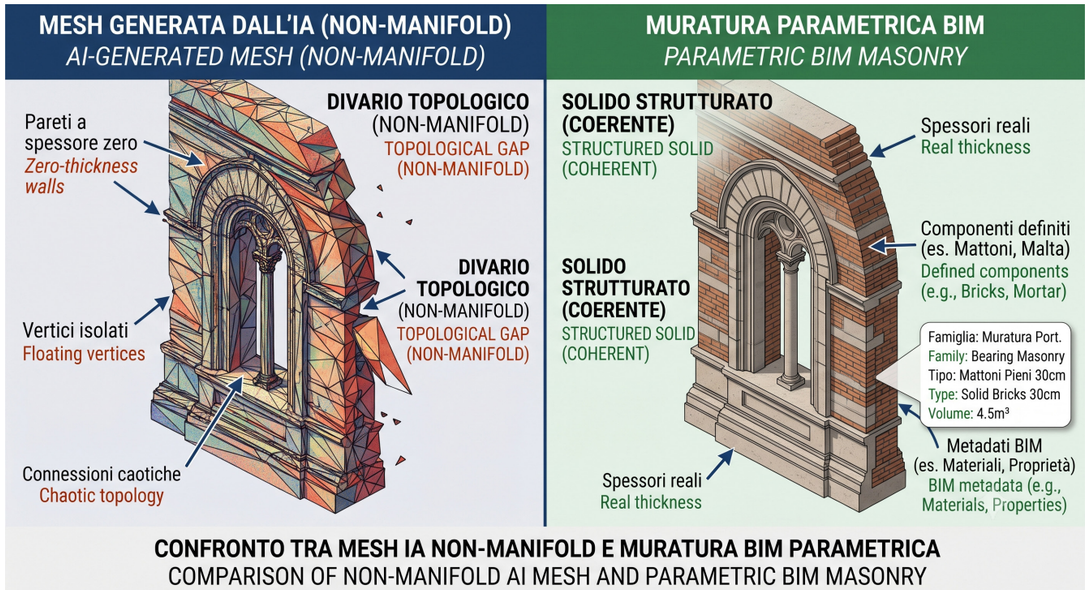


Fig. 4: Il divario topologico: mesh non-manifold generata dall'IA a confronto con una muratura BIM parametrica.

Fig. 4: The topological gap: non-manifold AI-generated mesh compared to parametric BIM masonry.

Future Perspectives: SemanticSplat and Constructive Intelligence

To finally bridge the existing gap between the "colored mesh" produced by the algorithm and the "constructive element" required by the profession, the research frontier is moving towards semantically aware generation. New technologies, identified under the umbrella term SemanticSplat, do not merely color space but enrich 3D Gaussians with deep semantic vectors. This means the generated model becomes directly queryable: the user can ask the software to "select all windows," enabling the automatic conversion of specific geometry portions into pre-parameterized BIM families. The future of this sector, therefore, is not solely visual but will see the birth of a true "Constructive AI." These will be multimodal models trained no longer exclusively on two-dimensional image datasets, but di-

Bibliografia

Carpo, M. (2017). *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*. Cambridge: MIT Press.

Eastman, C. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. Hoboken: John Wiley & Sons.

Kerbl, B. (2023). 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. In *ACM Transactions on Graphics*, n. 42, pp. 1-14. New York: Association for Computing Machinery.

Mildenhall, B. (2020). NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis. In Vedaldi, A. (a cura di). *Computer Vision – ECCV 2020*, pp. 405-421. Cham: Springer.

Poole, B. (2022). DreamFusion: Text-to-3D using 2D Diffusion. In *The Eleventh International Conference on Learning Representations (ICLR)*, pp. 1-23. Kigali: ICLR.

rectly on BIM databases, CAD drawings, and IFC construction standards. This unprecedented training will allow the algorithm to learn structural logic, drastically reducing hallucinations and understanding, a priori, that a column possesses a specific static function rather than a purely aesthetic one. The adoption of open, interoperable standards such as USD (Universal Scene Description) and IFC (Industry Foundation Classes) will represent the final bridge to facilitate the fluid, continuous, and lossless transition from the latent “dreams” of Generative AI to the tangible reality of the construction site.

Autori

Andrea Tomalini[1]
Melanie Nicole Giler Pinargote[2]

Email

andrea.tomalini@polito.it
melanie.giler@polito.it

[1] Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design (DAD)
[2] Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design (DAD)

Keywords

HBIM
VPL
INTEROPERABILITY
DATABASE
CULTURAL HERITAGE

Sfide della gestione informativa: tra database museali e modelli HBIM

Limits and challenges of information management: between museum databases and HBIM models

Abstract

L'integrazione SiME-HBIM evidenzia criticità nell'eterogeneità dei dati. Un workflow VPL con bounding boxes supporta il facility management, pur rivelando limiti di interoperabilità e rischi di degrado per la precisione scientifica del patrimonio.

The SiME-HBIM integration highlights critical issues in data heterogeneity. A VPL workflow with bounding boxes supports facility management, while also revealing interoperability limits and risks of degradation to the scientific accuracy of the heritage.

Introduzione

Nel contesto delle collezioni museali, la trasformazione digitale promette una gestione integrata e olistica del patrimonio. Sebbene esistano metodologie consolidate e *software* dedicati alla razionalizzazione dei processi, la pratica operativa rivela una persistente frammentazione informativa che ne riduce l'efficacia. Il contributo analizza il caso del Museo Egizio di Torino, soffermandosi sul passaggio dal *database* gestionale SiME (Sistema Gestionale del Museo Egizio) all'ambiente HBIM, per evidenziare come l'innovazione tecnologica debba accompagnarsi a una riflessione critica sulla qualità e sulla struttura dei dati. L'obiettivo più ampio è avvicinarsi a un modello olistico dell'ecosistema museale, in cui l'apparato informativo superi per importanza la sola rappresentazione tridimensionale del bene.

Modellazione informativa della collezione

L'apparato informativo, ancora più della rappresentazione tridimensionale, è il *corpus* con cui i professionisti del settore museale si confrontano per gestire la collezione: monitoraggio dello stato di conservazione tramite verifiche termo-igrometriche, programmazione di interventi manutentivi (sulle collezioni e sulla struttura museale) e controlli sulla conformità "culturale" del bene in fase di progettazione delle esposizioni. In questo contesto i linguaggi grafici emergono come sistemi complementari fondamentali: l'infografica e la visualizzazione dei dati facilitano la comprensione delle informazioni, rendendo visibili strutture e modelli intrinseci altrimenti occulti [Bocconcino, 2018]. Da Playfair a Bertin, fino a Tufte, Cairo e Lima, la grafica dell'informazione mira a rivelarne le informazioni nascoste, sostenendo l'idea che il dato, in quanto nuova materia prima, acquisisca valore solo attraverso operazioni di filtro, valutazione e rappresentazione, non limitandosi a una trasposizione visuale. Nel contesto museale tale approccio si è finora focalizzato su piccole esperienze progettuali [Bortoloni & Benedetti, 2022], su manuali di buone pratiche per la divulgazione [Da Milano & Sciacchitano, 2015] o sull'analisi di opere per identificarne una grammatica comune [Castagnolo, Dilauro & Maiorano, 2022; Montenegro & Monno, 2015], senza esplorare pienamente il potenziale dell'informazione grafica nel rivelare la complessità interna alle collezioni.

Il presente studio ha quindi indagato l'applicazione di questi metodi al *database* del Museo Egizio. L'accesso al sistema di gestione delle collezioni SiME, sebbene in fase di aggiornamento, ha evidenziato connessioni tra parametri quali collocazione, categoria, materiale, periodo storico, dinastia, origine, metodo di acquisizione e stato di conservazione (Fig. 1).

Nello specifico, sono stati esaminati 185 reperti, collocati in due sale espositive comprendenti 16 vetrine, un basamento e quattro cornici, classificati dagli egittologi in 12 categorie. Tre risultano predominanti: gli ushabti e contenitori per ushabti (25,41%, 47 oggetti, perlopiù del Terzo Periodo Intermedio e dalle campagne di Schiaparelli, in *faience*, argilla e terracotta); i sarcofagi e canopi (23,78%, 44 pezzi nella "galleria dei sarcofagi", in legno e pietra calcarea, con frequenti lacune e danni alla pellicola pittorica); gli amuleti e oggetti cerimoniali e votivi (22,7%, soprattutto dalla Valle delle Regine, in *faience*). La distribuzione e la localizzazione di questi oggetti riflettono l'importanza tematica delle categorie e l'attenzione dedicata alla conservazione, lasciando intuire le intenzioni del curatore. Le informazioni strutturate rappresentano un asset fondamentale per gli studi sul patrimonio: l'interazione tra oggetti e parametri omogenei offre prospettive innovative, fino alla potenziale semplificazione della catalogazione, e, se rese fruibili tramite piattaforme web-based, diverrebbero risorse preziose per nuove configurazioni espositive e per studi su reperti affini.

Introduction

In the context of museum collections, digital transformation promises an integrated and holistic management of heritage. Although consolidated methodologies and dedicated software for streamlining processes do exist, operational practice reveals a persistent informational fragmentation that reduces their effectiveness. This contribution analyses the case of the Museo Egizio in Turin, focusing on the transition from the SiME collection-management database (Sistema Gestionale del Museo Egizio) to the HBIM environment, in order to show how technological innovation must be accompanied by critical reflection on the quality and structure of data. The broader aim is to move towards a holistic model of the museum ecosystem, in which the informational apparatus outweighs in importance the mere three-dimensional representation of the asset.

Information modelling of the collection

The informational apparatus, even more than three-dimensional representation, is the *corpus* that museum professionals work with to manage the collection: monitoring the state of conservation through thermo-hygrometric checks, scheduling maintenance interventions (on the collections and on the museum structure) and verifying the "cultural" conformity of the asset during exhibition design. In this context, graphic languages emerge as fundamental complementary systems: infographics and data visualization facilitate the understanding of information, making visible intrinsic structures and patterns that would otherwise remain hidden [Bocconcino, 2018]. From Playfair to Bertin, and on to Tufte, Cairo and Lima, information graphics aim to reveal the information hidden behind the data, supporting the idea that data, as a new raw material, acquire value only through operations of filtering, evaluation and representation, rather than a mere visual transposition. Within the museum field, this approach has so far focused on small design experiences [Bortoloni & Benedetti, 2022], on best-practice manuals for public dissemination [Da Milano & Sciacchitano, 2015] or on the analysis of artworks to identify a common grammar [Castagnolo, Dilauro & Maiorano, 2022; Montenegro & Monno, 2015], without fully exploring the potential of information graphics in revealing the internal complexity of collections.

The present study therefore investigated the application of these methods to the Museo Egizio database. Access to the SiME collection-management system, although undergoing an update, revealed connections among parameters such as location, category, material, historical period, dynasty, origin, acquisition method and state of conservation (Fig. 1).

Specifically, 185 artefacts were examined, located in two exhibition rooms comprising 16 display cases, one plinth and four frames, classified by Egyptologists into 12 categories. Three are predominant: the shabti and shabti containers (25.41%, 47 objects, mostly from the Third Intermediate Period and from Schiaparelli's campaigns, in faience, clay and terracotta); the sarcophagi and canopic jars (23.78%, 44 pieces in the "gallery of sarcophagi", in wood and limestone, with frequent gaps and damage to the paint layer); and the amulets and ceremonial and votive objects (22.7%, mostly from the Valley of the Queens, in faience). The distribution and location of these objects reflect the thematic importance of the categories and the attention devoted to their conservation, hinting at the curator's intentions. Structured information is a fundamental asset for heritage studies: the interaction between objects and homogeneous parameters offers innovative perspec-

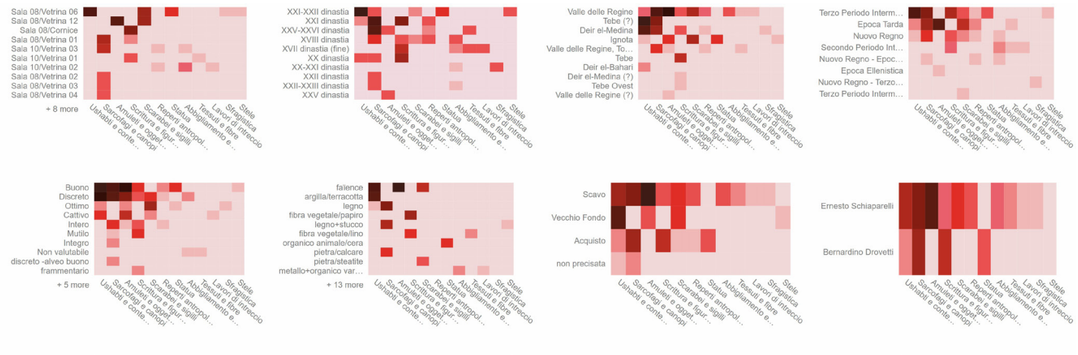


Fig. 1: Rappresentazione grafica della collezione presente in Sala 08, Galleria dei Sarcofagi, e Sala 10, Valle delle Regine.

Fig. 1: Graphic representation of the collection in Room 08, Gallery of Sarcophagi, and Room 10, Valley of the Queens.

Connessione tra ambiente BIM e apparato informativo delle collezioni

Le metodologie del *Building Information Modeling* (BIM) possono apportare innovazione in questo contesto. Infatti, utilizzando componenti parametrici archiviati in librerie digitali, è possibile riportare l'apparato informativo delle collezioni all'interno della fabbrica modellata, mettendo i dati in relazione con il contenitore che li ospita. La sfida principale è applicare metodologie tipicamente rivolte ai componenti architettonici alle opere delle collezioni; la ricerca si è quindi concentrata sulla strategia più adeguata e meno onerosa per caratterizzarle informativamente e proporre processi semiautomatici di modellazione geometrica e inserimento nel modello BIM (Fig. 2).

Le collezioni sono state caratterizzate come "Modelli Generici", non esistendo una categoria apposita negli applicativi BIM, mentre gli elementi espositivi come "Arredi". Le informazioni dettagliate sono state estratte dalle "schede oggetto" del *database* SiME; in ogni famiglia sono stati inseriti campi per collegare direttamente le informazioni alle relative schede e parametri testuali e grafici (categoria, datazione, localizzazione, esami non invasivi, numero di inventario, condizioni di conservazione, immagini).

Per le sale 08 e 10 è stato possibile digitalizzare le opere mediante 97 famiglie di "Modello Generico". Poiché lo scopo non è

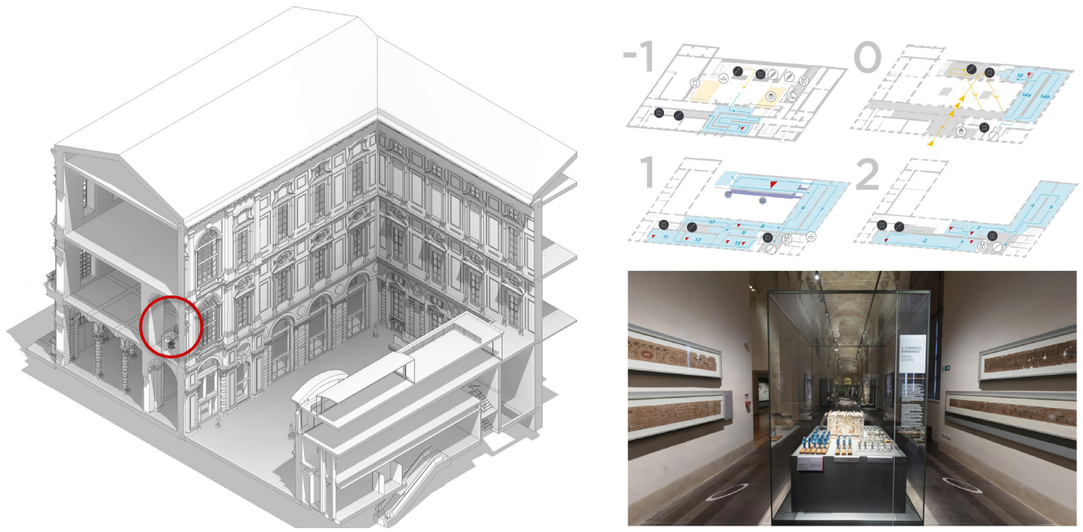


Fig. 2: Spaccato assonometrico del modello BIM della fabbrica di Collegio dei Nobili e visione delle planimetrie del museo e immagine del virtual tour del caso studio.

Fig. 2: Axonometric cross-section of the BIM model of the Collegio dei Nobili building, along with a view of the museum's floor plans and an image of the virtual tour of the case study.

gestire la geometria complessa degli artefatti bensì il loro apparato informativo, ciascun oggetto è stato rappresentato dal solido che poteva effettivamente contenerlo (*bounding box*). Pur estremamente semplificata, tale rappresentazione consente, dal punto di vista del *Facility Management*, di visualizzare l'ingombro nello spazio, di associare le corrette informazioni e di effettuare operazioni di *clash detection* per verificare la conformità dimensionale all'ambiente (Fig. 3).

A ogni opera sono stati associati i parametri del *database* SiME. Il materiale è particolarmente utile: riferendosi alla tabella dell'Atto di indirizzo (Ambito VI, Sottoambito 1, in Appendice alle Norme per la conservazione e il restauro), è stato possibile mettere in relazione la collezione con il contenitore per verificare la conformità delle condizioni ambientali. Per ciascuna famiglia sono stati definiti quattro parametri HVAC — limiti di temperatura massima e minima e intervallo di umidità relativa consigliato — determinati in conformità con il D.M. 10 maggio 2001 mediante un algoritmo sviluppato in Grasshopper.

Il codice attuale, ancora prototipale, si basa sull'esportazione dei dati da SiME verso Excel; per ottimizzare il flusso si suggerisce l'implementazione futura di richieste API dirette al *database online*. La metodologia, elaborata con il supporto di Rhino.*Inside* Revit, identifica i volumi destinati alle opere tramite la denominazione delle vetrine, allineata al parametro "*Stable Location*" di SiME, e popola i volumi corrispondenti in Revit con le famiglie dimensionate secondo il *database*. Permane una limitazione, dopo l'inserimento automatico le opere vanno posizionate manualmente per replicare la disposizione reale, ma il processo semplifica notevolmente la modellazione, minimizza gli errori di trascrizione e, data l'estensione della collezione (considerando che la collezione estives, up to the potential simplification of cataloguing, and, if made available through web-based platforms, it would become a valuable resource for new exhibition layouts and for studies on related artefacts.

Connection between the BIM environment and the information apparatus of collections

The methodologies of Building Information Modeling (BIM) can bring innovation to this context. Indeed, by using parametric components stored in digital libraries, it is possible to bring the informational apparatus of collections within the modelled building, relating the data to the container that houses them. The main challenge is to apply methodologies typically aimed at architectural components to the works of the collections; the research therefore focused on the most suitable and least burdensome strategy to characterise them informationally and to propose semi-automatic processes of geometric modelling and insertion into the BIM model (Fig. 2).

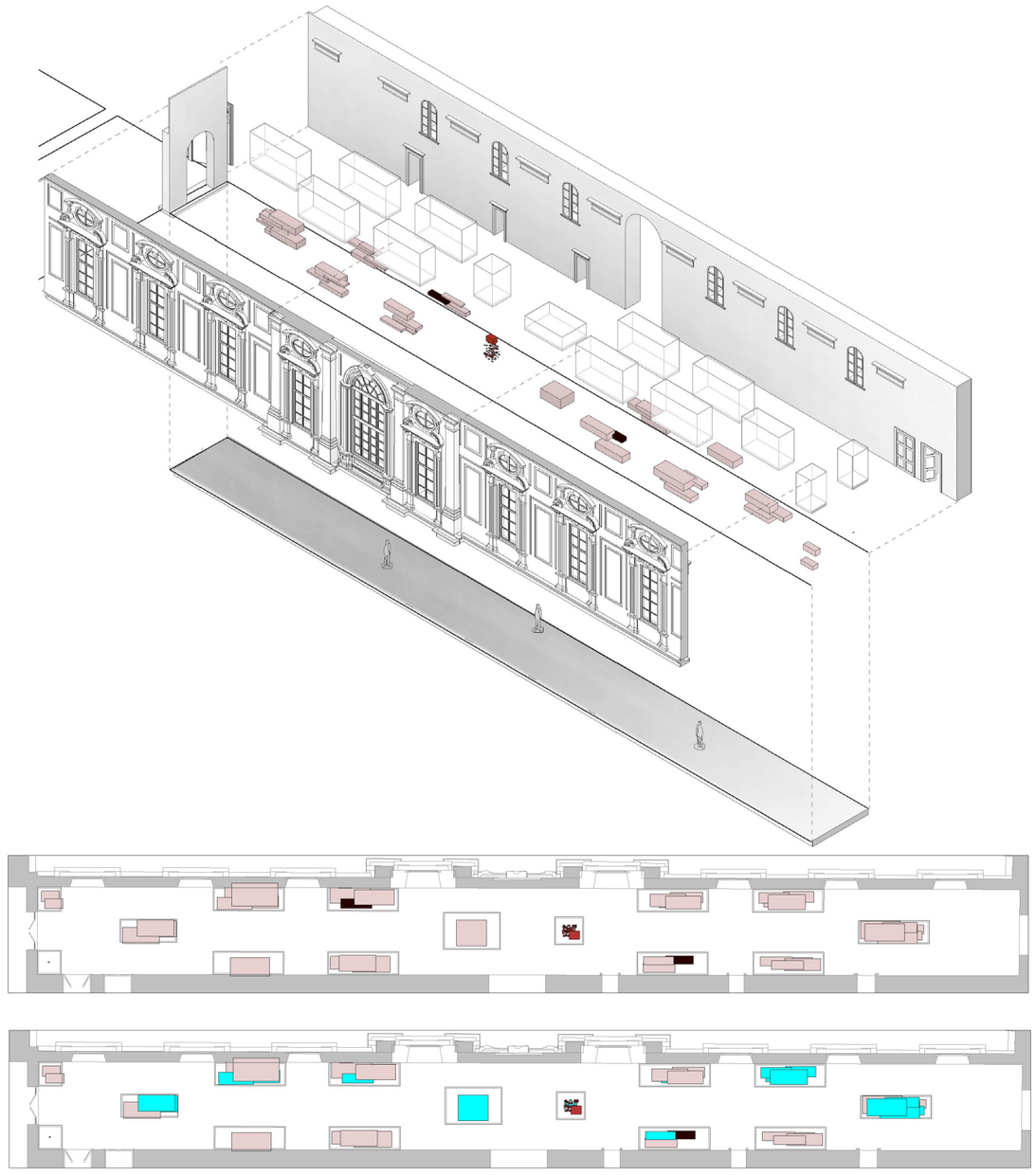


Fig. 3: Vista assonometrica esplosa del modello BIM dell'edificio del Collegio dei Nobili. Attraverso filtri dedicati è possibile identificare, con diverse colorazioni, le categorie di ciascun manufatto, la loro provenienza, o rappresentare graficamente altri parametri che li caratterizzano.

Fig. 3: Axonometric exploded view of the BIM model of the Collegio dei Nobili building. Through dedicated filters it is possible to identify, with different colourings, the categories of each artefact, their provenance, or to graph other parameters that characterise them.

posta del Museo è composta da oltre 35.000 oggetti), ottimizza la creazione di una libreria di "Schede Oggetto BIM" e l'esportazione di viste tematiche utili a curatori e specialisti.

Modellazione geometrica semiautomatica: il raycasting vettoriale inverso

Il limite principale della procedura descritta risiede nel posizionamento manuale degli oggetti all'interno del modello. Infatti, dopo l'inserimento automatico delle famiglie, un operatore deve ancora collocare ciascun *bounding box* per replicare la disposizione reale nelle vetrine. Per superare questo vincolo è stato sviluppato un approccio di *raycasting* vettoriale inverso, finalizzato a una modellazione geometrica semiautomatica della collezione che ricostruisce la posizione degli oggetti nello spazio a partire dalla sola documentazione fotografica delle vetrine. L'idea di fondo è invertire il consueto flusso di proiezione, anziché proiettare una geometria nota su un piano immagine, si parte dall'immagine per risalire alla posizione tridimensionale degli elementi rappresentati, sfruttando alcuni punti di corrispondenza noti tra fotografia e modello.

Il metodo si fonda sulla soluzione del problema *Perspective-n-Point* (PnP), che consente di stimare la posa di una camera rispetto a un insieme di punti di cui si conoscano sia le coordinate tridimensionali nel modello sia le corrispondenti coordinate bidimensionali sull'immagine. L'algoritmo è stato implementato in ambiente VPL mediante l'utilizzo di componenti che permettono l'uso di codice in Python all'interno di Grasshopper, appoggiandosi alle librerie OpenCV (cv2) e NumPy e al collegamento con Rhino tramite Rhino.Geometry. A partire da un *array* di punti 3D (*object_points*) e dal corrispondente *array* di punti 2D (*image_points*) — questi ultimi con inversione dell'asse Y, per riallineare l'origine dei pixel dell'immagine al sistema di riferimento cartesiano — viene costruita la matrice intrinseca della camera. La lunghezza focale è parametrizzata tramite uno *slider* (*focal_mult*), che permette di adattare il calcolo a fotografie con diversi gradi di zoom, mentre il centro ottico è posto al centro dell'immagine e i coefficienti di distorsione sono inizialmente assunti nulli (Fig. 4).

The collections were characterised as "Generic Models", since no dedicated category exists in BIM applications, while exhibition elements were treated as "Furniture". Detailed information was extracted from the "object records" of the SiME database; in each family, fields were inserted to link the information directly to the relevant records, together with textual and graphic parameters (category, dating, location, non-invasive analyses, inventory number, conservation conditions, images).

For Rooms 08 and 10 it was possible to digitise the works through 97 "Generic Model" families. Since the aim is not to manage the complex geometry of the artefacts but rather their informational apparatus, each object was represented by the solid that could actually contain it (bounding box). Although extremely simplified, this representation allows, from a Facility Management perspective, the visualization of the object's footprint in space, the association of the correct information and clash detection operations to verify dimensional conformity with the environment (Fig. 3).

The SiME database parameters were associated with each work. Material is particularly useful: by referring to the table of the *Atto di indirizzo* (Scope VI, Sub-scope 1, in the Appendix to the Norms for conservation and restoration), it was possible to relate the collection to the container in order to verify the conformity of environmental conditions. For each family, four HVAC parameters were defined — maximum and minimum temperature limits and the recommended relative-humidity range — determined in compliance with the Ministerial Decree of 10 May 2001 by means of an algorithm developed in Grasshopper.

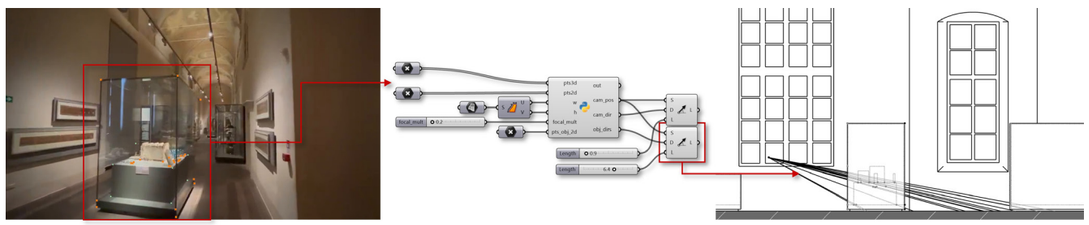


Fig. 4: Interfaccia prototipale in ambiente VPL per il raycasting vettoriale inverso.

Fig. 4: Prototype interface in VPL environment for inverse vector raycasting.

La risoluzione del PnP è affidata alla funzione cv2.solvePnP configurata con l'algoritmo SQPNP, scelto perché più robusto nei casi — frequenti in ambito museale — in cui i punti di riferimento risultino quasi complanari, come accade per gli oggetti disposti sui ripiani delle vetrine. Dal vettore di rotazione (rvec) e dal vettore di traslazione (tvec) restituiti dal solver si ricava, mediante la formula di Rodrigues (cv2.Rodrigues) e l'inversione della matrice di rototraslazione, la posizione della camera nello spazio tridimensionale, che viene infine esportata in Grasshopper come Point3d. Una gestione esplicita dei casi di insuccesso segnala all'operatore l'eventuale necessità di rivedere l'ordine o la selezione dei punti di corrispondenza, garantendo il controllo sul risultato.

Nota la posizione della camera, è possibile tracciare i vettori direzione (*cam_dir, obj_dir*) che, a partire dal punto di vista ricostruito, attraversano i punti immagine e si proiettano verso l'interno del modello tridimensionale. L'intersezione di questi raggi con i volumi delle teche, precedentemente modellate e georeferenziate nel modello BIM, consente di stimare la collocazione spaziale di ciascun oggetto e di posizionare automaticamente i relativi *bounding box* lungo le rette di proiezione (Fig. 5). La procedura è stata dotata di un'interfaccia dedicata in ambiente VPL, che rende il flusso di lavoro accessibile anche a operatori meno esperti di programmazione: la selezione dei punti di corrispondenza e la regolazione dei parametri avvengono in modo interattivo, con riscontro grafico immediato sulla scena. L'approccio è stato esteso dalla singola immagine a una sequenza di più *frame* estratti dalla documentazione fotografica e video delle sale. L'elaborazione di fotogrammi successivi, ripresi da punti di vista differenti lungo il percorso espositivo, permette di triangolare con maggiore affidabilità la posizione degli oggetti e di ridurre l'incertezza derivante dalla quasi-complanarità dei punti su un singolo scatto (Fig. 6). Il risultato è una nuvola di rette di proiezione che, intersecando i volumi, individua progressivamente la disposizione dell'intera collezione all'interno



Fig. 5: Interfaccia dedicata per il raycasting vettoriale inverso applicato alla documentazione fotografica delle vetrine.

Fig. 5: Dedicated interface for inverse vector raycasting applied to photographic documentation of display cases.

Semi-automatic geometric modelling: inverse vector raycasting

The main limitation of the procedure described lies in the manual positioning of objects within the model. Indeed, after the automatic insertion of the families, an op-

The current code, still at a prototype stage, is based on exporting data from SiME to Excel; to optimise the workflow, the future implementation of direct API requests to the online database is suggested. The methodology, developed with the support of Rhino.Inside Revit, identifies the volumes intended for the works through the naming of the display cases, aligned with the SiME "Stable Location" parameter, and populates the corresponding volumes in Revit with families dimensioned according to the database. A limitation remains, in that after automatic insertion the works must be positioned manually to replicate the actual arrangement, but the process considerably simplifies modelling, minimises transcription errors and, given the extent of the collection (the Museum's displayed collection comprises over 35,000 objects), optimises the creation of a library of "BIM Object Records" and the export of thematic views useful to curators and specialists.

delle vetrine, restituendo una distribuzione spaziale coerente con quella reale; l'impiego di *frame* estratti dal medesimo video ha inoltre permesso di ricostruire con esattezza il percorso effettuato dal visitatore durante la visita.

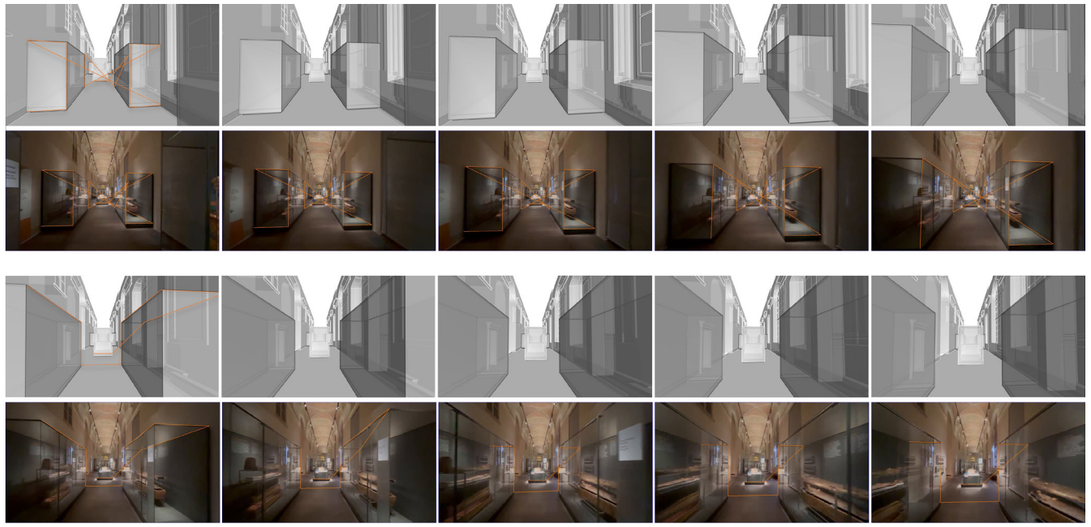


Fig. 6: Applicazione del raycasting vettoriale su più frame.
Fig. 6: Applying vector raycasting across multiple frames.

Il metodo sperimentato riesce così a ricreare i *bounding box* in posizioni più certe rispetto a quelle ottenibili con la procedura precedente; a differenza di quest'ultima, però, i volumi generati sono semanticamente privi di qualsiasi informazione. Risulterebbe pertanto interessante ottimizzare ulteriormente il *workflow* affinché, leggendo i metadati relativi alla teca e alle dimensioni dell'oggetto, tenti di associare automaticamente le informazioni al *bounding box* corrispondente. Si tratta di un compito tutt'altro che scontato, è da considerare che alcuni elementi, come sarcofagi e relativi coperchi, hanno dimensioni effettivamente differenti e sono presenti in numero limitato all'interno della vetrina, in questo caso l'associazione sarebbe plausibile; lo stesso non vale per amuleti o ushabti i quali, date le dimensioni davvero contenute, ricorrono numerosi all'interno della stessa teca e si assomigliano molto tra loro. Anche implementando algoritmi più sofisticati che filtrino la scelta — ad esempio modelli di segmentazione come SAM, capaci di isolare i singoli oggetti nell'immagine e suggerirne la categoria — alcune teche risultano comunque sovraffollate, e in questi casi l'assegnazione perderebbe gran parte, se non la totalità, della propria accuratezza.

Questo sviluppo metodologico potrebbe comunque ridurre sensibilmente l'onere della disposizione manuale dei *bounding box*, trasformando un processo prima largamente affidato all'operatore in un flusso realmente semiautomatico, ripetibile e documentabile. Pur conservando un margine di supervisione umana, necessario per la validazione dei risultati e la correzione di eventuali ambiguità nelle corrispondenze, il *raycasting* vettoriale inverso costituisce un ulteriore passo verso la scalabilità del processo all'intera collezione, delineando la possibilità di derivare la geometria informativa direttamente dal patrimonio fotografico esistente e di integrarla con il dato alfanumerico del *database* SiME in un unico flusso operativo.

erator must still place each bounding box to replicate the actual arrangement in the display cases. To overcome this constraint, an inverse vector raycasting approach was developed, aimed at a semi-automatic geometric modelling of the collection that reconstructs the position of objects in space starting from photographic documentation of the cases alone. The underlying idea is to invert the usual projection flow: instead of projecting a known geometry onto an image plane, one starts from the image to retrieve the three-dimensional position of the represented elements, exploiting a few known correspondence points between photograph and model.

The method is based on solving the Perspective-n-Point (PnP) problem, which allows the pose of a camera to be estimated with respect to a set of points whose three-dimensional coordinates in the model and corresponding two-dimensional coordinates on the image are both known. The algorithm was implemented in the VPL environment by means of components that allow Python code to be run within Grasshopper, relying on the OpenCV (cv2) and NumPy libraries and on the connection with Rhino through Rhino.Geometry. Starting from an array of 3D points (object_points) and the corresponding array of 2D points (image_points) — the latter with an inversion of the Y axis, to realign the origin of the image pixels with the Cartesian reference system — the intrinsic matrix of the camera is built. The focal length is parameterised through a slider (focal_mult), which allows the calculation to be adapted to photographs with different degrees of zoom, while the optical centre is placed at the centre of the image and the distortion coefficients are initially assumed to be zero (Fig. 4).

The PnP solution is entrusted to the cv2.solvePnP function, configured with the SQPNP algorithm, chosen because it is more robust in cases — frequent in the museum field — where the reference points turn out to be nearly coplanar, as happens with objects arranged on the shelves of the cases. From the rotation vector (rvec) and the translation vector (tvec) returned by the solver, the position of the camera in three-dimensional space is obtained by means of the Rodrigues formula (cv2.Rodrigues) and the inversion of the rototranslation matrix, and is finally exported to Grasshopper as a Point3d. Explicit handling of failure cases signals to the operator the possible need to review the order or selection of the correspondence points, ensuring control over the result.

Once the camera position is known, it is possible to trace the direction vectors (cam_dir, obj_dir) that, starting from the reconstructed viewpoint, pass through the image points and project into the three-dimensional model. The intersection of these rays with the volumes of the cases, previously modelled and georeferenced in the BIM model, allows the spatial location of each object to be estimated and the corresponding bounding boxes to be positioned automatically along the projection lines (Fig. 5). The procedure was provided with a dedicated interface in the VPL environment, which makes the workflow accessible even to operators less skilled in programming: the selection of correspondence points and the adjustment of parameters take place interactively, with immediate graphic feedback on the scene.

The approach was extended from the single image to a sequence of several frames extracted from the photographic and video documentation of the rooms. Processing successive frames, taken from different viewpoints along the exhibition

Integrazione dell'informazione IoT in ambiente BIM

Sempre considerando la collezione, per rallentare il deterioramento dei manufatti questi vanno mantenuti in un microclima controllato e adeguato al materiale [Manoli, 2015; Shah & Mishra, 2016], e il monitoraggio dei dati ambientali di sale e vetrine diventa perciò un compito centrale. Si propone in questo senso un'architettura su tre strati, ovvero la raccolta *hardware* lato *client*, la gestione e l'analisi sul server (*cloud o edge*) e la memorizzazione locale, capace di integrare sistemi IoT e strumenti BIM tramite algoritmi in ambiente VPL. I nodi sensore trasmettono le letture via protocollo MQTT e i dati, ripuliti dai valori anomali con un algoritmo di *Isolation Forest* [Zemicheal & Dietterich, 2019], sono collegati al modello tramite Rhino.*Inside* Revit, con ID univoci che legano ogni nodo fisico alla relativa famiglia digitale. Poiché l'*hardware* già installato nel Museo Egizio è proprietario e non integrabile con piattaforme BIM, il modello è stato validato in forma simulata sulla Sala 8, dimostrando l'interazione tra sistemi BIM e *hardware* IoT e la produzione di mappe tematiche per la rapida individuazione delle criticità.

Questo tipo di approccio, che collega le informazioni alla singola teca, si rivela davvero facile da ottenere e utile in fase di manutenzione. L'informazione associata alla teca potrebbe inoltre essere estesa con poco sforzo alla collezione che essa contiene, poiché è agevole creare parametri che ne descrivano la tipologia di oggetti e i relativi requisiti di conservazione (questi parametri possono contenere anche l'immagine fotografica stessa dell'oggetto). Proprio in questo contesto è però necessario chiedersi se sia effettivamente utile spingersi fino a un simile livello di dettaglio geometrico, tanto attraverso i *bounding box* quanto, a maggior ragione, mediante geometrie più accurate, onerose sia in fase di produzione sia sul piano computazionale. Non sarebbe forse sufficiente rappresentare la singola teca e collegare a essa tutti i descrittori del caso, sui quali condurre poi le ulteriori operazioni di analisi? Le *heatmap* di controllo della collezione illuminerebbero in tal caso la teca e non il singolo manufatto, ma in un'ottica di conservazione preventiva questo grado di risoluzione risulterebbe con ogni probabilità già più che sufficiente.

Conclusioni

Il caso studio evidenzia come la trasformazione digitale del patrimonio culturale non possa esaurirsi nella modellazione tridimensionale, ma debba fondarsi su una solida architettura informativa coerente con il quadro normativo vigente. Il Codice dei Contratti, le norme UNI 11337 e la serie ISO 19650 pongono al centro la gestione informativa lungo l'intero ciclo di vita dell'opera, attribuendo un ruolo strategico alla fase gestionale e manutentiva. Permangono tuttavia criticità strutturali, come l'eterogeneità e

l'incompletezza dei dati in SiME, eredità anche del trasferimento dalla precedente piattaforma eMuseumPlus, o la limitata interoperabilità. Ne deriva il rischio di un "degrado virtuale", nel quale la semplificazione necessaria alla gestione digitale può tradursi in perdita di precisione scientifica.

Va inoltre sottolineato come, quando si parla di LOD o dei più recenti LOIN, ci si riferisca di norma a geometrie legate all'edilizia, che una volta posizionate difficilmente si spostano e non presentano gradi di complessità paragonabili a quelli di una collezione museale. Spesso, affrontando casi legati al patrimonio e attivando la filiera dell'HBIM, i ricercatori si addentrano in questioni geometriche estremamente complesse che, ai fini della conservazione museale, risultano troppo onerose da gestire e da computare. Su alcuni *software* di *authoring* la situazione è anzi ancora più critica, e per quanto tali strumenti restino legittimi, la tentazione di parametrizzare queste geometrie si rivela tanto forte quanto sostanzialmente superflua, così come spesso è "accessoria" l'informazione aggiunta alle viste, ad esempio la possibilità di osservare un sarcofago in 3D. In questi casi specifici sarebbe opportuno non innamorarsi della geometria e riconoscere che la parte realmente meritevole di essere modellata e gestita è quella informativa, magari meno scenografica una volta riportata nelle viste tradizionali, ma per la quale si possono comunque predisporre altre forme di rappresentazione.

In tale prospettiva, l'HBIM non può essere inteso unicamente come modello di rappresentazione, ma come infrastruttura informativa strutturata, capace di supportare processi decisionali, manutenzione programmata e conservazione preventiva. Ciò implica un ripensamento dei modelli BIM in chiave *lifecycle-oriented*, in cui qualità, tracciabilità e interoperabilità del dato costituiscano il presupposto imprescindibile per una gestione sostenibile e conforme ai dettami normativi del patrimonio culturale.

Crediti

Introduzione e Conclusione a cura di entrambi gli autori. Modellazione informativa della collezione, Connessione tra ambiente BIM e apparato informativo delle collezioni, Modellazione geometrica semiautomatica: il raycasting vettoriale inverso, Integrazione dell'informazione IoT in ambiente BIM a cura di Andrea Tomalini.

Bibliografia

Artioli, G., Angelini, I., & Polla, A. (2008). Crystals and phase transitions in protohistoric glass materials. *Phase Transitions, 81*, 233–252. https://doi. org/10.1080/01411590701514409

Bocconcino, M. (2018). *Segni e disegni per rappresentare la conoscenza*. Aracne editrice.

Bortoloni, L., & Benedetti, A. (2022, luglio 26). Di grafici e di musei. Ida Studio. https://www.idastudio.it/2022/07/26/di-grafici-di-musei/

Castagnolo, V., Dilauro, A. V., & Maiorano, A. C. (2022). New Liberty. Composizione e rappresentazione di un pattern. In E. Cicalò, F. Savini, & I. Trizio, *Linguaggi Grafici: Decorazione* (pp. 334–361). Publica.

route, makes it possible to triangulate the position of objects more reliably and to reduce the uncertainty arising from the near-coplanarity of points in a single shot (Fig. 6). The result is a cloud of projection lines that, intersecting the volumes, progressively identifies the arrangement of the entire collection within the cases, returning a spatial distribution consistent with the real one; moreover, the use of frames extracted from the same video made it possible to reconstruct exactly the path taken by the visitor during the visit.

The method tested thus succeeds in recreating the bounding boxes in more reliable positions than those obtainable with the previous procedure; unlike the latter, however, the generated volumes are semantically devoid of any information. It would therefore be interesting to further optimise the workflow so that, by reading the metadata relating to the case and the dimensions of the object, it attempts to associate the information automatically with the corresponding bounding box. This is by no means a trivial task: it should be considered that some elements, such as sarcophagi and their lids, have genuinely different dimensions and are present in limited numbers within the case, in which case the association would be plausible; the same does not hold for amulets or shabti which, given their truly small dimensions, occur in large numbers within the same case and closely resemble one another. Even by implementing more sophisticated algorithms to filter the choice — for example segmentation models such as SAM, capable of isolating individual objects in the image and suggesting their category — some cases remain overcrowded, and in these cases the assignment would lose much, if not all, of its accuracy.

This methodological development could nonetheless considerably reduce the burden of the manual arrangement of bounding boxes, transforming a process previously largely entrusted to the operator into a genuinely semi-automatic, repeatable and documentable workflow. While retaining a margin of human supervision, necessary for validating the results and correcting any ambiguities in the correspondences, inverse vector raycasting represents a further step towards the scalability of the process to the entire collection, outlining the possibility of deriving the informational geometry directly from existing photographic heritage and integrating it with the alphanumeric data of the SiME database in a single operational flow.

Da Milano, C., & Sciacchitano, E. (2015). *Linee guida per la comunicazione nei musei: Segnaletica interna, didascalie e pannelli*. MiBACT. http:// musei.beniculturali.it/wp-content/uploads/2017/01/Linee-guida-per-la-comunicazione-nei-musei-segnaletica-interna-didascalie-e-pannelli.-Quaderni-della-valorizzazione-NS1.pdf

Manoli, F. (2015). *Manuale di gestione e cura delle collezioni museali*. Le Monnier Università.

Montenegro, V., & Monno, A. (2015). Una lettura semiotica delle esposizioni museali: Spunti di riflessione. *Athanor. Semiotica, Filosofia, Arte, Letteratura, XXV*, 18, 243–254.

Shah, J., & Mishra, B. (2016). Customized IoT enabled wireless sensing and monitoring platform for preservation of artwork in heritage buildings. *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 361–366.

Zemicheal, T., & Dietterich, T. G. (2019). Anomaly detection in the presence of missing values for weather data quality control. *Proceedings of the 2nd ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies, 65–73*.

Integration of IoT information in the BIM environment

Still considering the collection, in order to slow the deterioration of the artefacts these must be kept in a controlled microclimate suited to the material [Manoli, 2015; Shah & Mishra, 2016], and the monitoring of environmental data in rooms and cases therefore becomes a central task. To this end, a three-layer architecture is proposed, namely hardware collection on the client side, management and analysis on the server (cloud or edge) and local storage, capable of integrating IoT systems and BIM tools through algorithms in the VPL environment. The sensor nodes transmit their readings via the MQTT protocol, and the data, cleaned of anomalous values with an Isolation Forest algorithm [Zemicheal & Dietterich, 2019], are connected to the model through Rhino.Inside Revit, with unique IDs linking each physical node to its digital family. Since the hardware already installed at the Museo Egizio is proprietary and not integrable with BIM platforms, the model was validated in simulated form on Room 8, demonstrating the interaction between BIM systems and IoT hardware and the production of thematic maps for the rapid identification of critical issues.

This type of approach, which links information to the individual case, proves genuinely easy to obtain and useful during maintenance. The information associated with the case could moreover be extended with little effort to the collection it contains, since it is easy to create parameters describing the type of objects and their conservation requirements (these parameters may also contain the photographic image of the object itself). It is precisely in this context, however, that one must ask whether it is actually useful to push to such a level of geometric detail, both through bounding boxes and, all the more so, through more accurate geometries, costly both in production and in computational terms. Would it not perhaps be sufficient to represent the individual case and link to it all the relevant descriptors, on which further analysis operations could then be carried out? In that

case the heatmaps controlling the collection would illuminate the case rather than the individual artefact, but from a preventive-conservation standpoint this level of resolution would in all likelihood already be more than sufficient.

Conclusions

The case study shows how the digital transformation of cultural heritage cannot be exhausted in three-dimensional modelling, but must be founded on a solid information architecture consistent with the current regulatory framework. The Code of Public Contracts, the UNI 11337 standards and the ISO 19650 series place information management at the centre throughout the entire life cycle of the asset, attributing a strategic role to the management and maintenance phase. Structural criticalities nonetheless remain, such as the heterogeneity and incompleteness of the data in SiME, partly inherited from the migration from the previous eMuseumPlus platform, or the limited interoperability. The result is the risk of a "virtual degradation", in which the simplification necessary for digital management may translate into a loss of scientific accuracy.

It should also be stressed that, when one speaks of LOD or of the more recent LOIN, reference is usually made to geometries linked to construction, which once positioned rarely move and do not display degrees of complexity comparable to those of a museum collection. Often, in dealing with heritage cases and activating the HBIM chain, researchers venture into extremely complex geometric issues which, for the purposes of museum conservation, turn out to be too costly to manage and to compute. On some authoring software the situation is in fact even more critical, and however legitimate such tools remain, the temptation to parameterise these geometries proves as strong as it is essentially superfluous, just as the information added to the views is often "accessory", for example the possibility of viewing a sarcophagus in 3D. In these specific cases it would be advisable not to fall in love with geometry and to recognise that the part truly worth modelling and managing is the informational one, perhaps less striking once reported in traditional views, but for which other forms of representation can in any case be devised.

From this perspective, HBIM cannot be understood solely as a representation model, but as a structured information infrastructure, capable of supporting decision-making processes, planned maintenance and preventive conservation. This implies a rethinking of BIM models in a lifecycle-oriented key, in which the quality, traceability and interoperability of the data constitute the indispensable precondition for a sustainable management compliant with the regulatory requirements of cultural heritage.

Credits

Introduction and Conclusion by both authors. Information Modeling of the Collection, Connection between the BIM Environment and the Collections Information System, Semi-Automatic Geometric Modeling: Inverse Vector Raycasting, Integration of IoT Information in a BIM Environment by Andrea Tomalini.

Autori

Marco Ricciarini[1]
Francesca Galasso[2]
Elisabetta C. Giovannini[3]
Andrea Tomalini[4]

Email

marco.ricciarini@unipv.it
francesca.galasso@unipv.it
elisabetta.giovannini@polito.it
andrea.tomalini@polito.it

[1] DICAr Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Pavia
[2] DICAr Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Pavia
[3] DAD Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino
[4] DAD Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino

Keywords

INTEROPERABILITY
CONSTRUCTION ONTOLOGY
BUILDINGSMART DATA DICTIONARY
REGIONAL BIM FRAMEWORKS
ITALIAN DIGITAL PRICE LISTS

Ambienti digitali per la stima dei costi nell’ambito di processi OpenBIM: verso una prospettiva ontologica e interoperabile

Understanding of digital environments for cost estimation within open BIM processes: towards an ontological and interoperable perspective

Abstract

Il presente contributo analizza l’evoluzione dei prezzari regionali verso ambienti digitali interoperabili nell’ambito del contesto openBIM. Attraverso le esperienze di ricerca delle regioni Toscana e Piemonte, l’articolo propone un approccio ontologico e semantico volto a rendere la stima dei costi leggibile, condivisibile e automatizzabile.

This paper examines the evolution of regional price lists into interoperable digital environments in openBIM. Through the Tuscany and Piedmont cases, it proposes an ontological and semantic approach to make cost estimation readable, shareable, and automatable.

Introduzione

La trasformazione digitale del settore dell'architettura, dell'ingegneria, dell'edilizia e della gestione (AECO) ha ridefinito il modo in cui le informazioni sui costi vengono generate, scambiate e interpretate lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio. Nonostante il crescente utilizzo di flussi di lavoro basati sul BIM, la stima dei costi, un aspetto centrale del processo decisionale e gestionale in ambito progettuale, rimane tra le aree meno studiate e, di conseguenza, meno integrate nei processi edilizi dal punto di vista digitale.

In Italia, gli approcci tradizionali di estimo e di computo metrico si basano su fogli di calcolo frammentati e su prezzari in formato testuale, ostacolando la coerenza dei dati e la loro effettiva automazione. Come in molti altri ambiti, anche gli appalti pubblici stanno subendo l'influenza della transizione digitale. Le amministrazioni pubbliche, sia a livello nazionale che europeo, stanno progressivamente adottando standard *openBIM*, quali *Industry Foundation Classes* (IFC) (ISO 16739-1:2024) [buildingSMART International, 2024a], *Information Delivery Specification* (IDS) [buildingSMART International, 2024b] e il *buildingSMART Data Dictionary* (bSDD) [buildingSMART International, 2012], per garantire la trasparenza, l'interoperabilità e la standardizzazione dei processi di costruzione degli edifici.

L'obiettivo generale di questa ricerca, ancora in fase di sviluppo, è colmare il divario tra la standardizzazione dei dati e la gestione dei costi, promuovendo la creazione di un ecosistema digitale unico e interoperabile per la gestione dei processi di costruzione. Questo articolo evidenzia come i database regionali dei costi pubblici (Prezzari Regionali) possano evolversi verso ambienti digitali semantici, interoperabili e leggibili dalle macchine, che garantiscano la disponibilità di informazioni sui costi lungo l'intero ciclo di vita del progetto.

L'approccio preliminare di questa ricerca è esemplificato dall'analisi dei prezzari regionali della Toscana [Regione Toscana, 2026] e del Piemonte [Regione Piemonte, 2026], che ha portato alla loro transizione digitale e interoperabile verso lo sviluppo di un prezzario regionale in grado di integrare la semantica dei costi nei flussi di lavoro openBIM, per la gestione informativa digitale (GID) degli appalti pubblici nella pubblica amministrazione.

La metodologia adottata esplora il potenziale delle ontologie per modellare le informazioni sui costi, garantendone la coerenza semantica e il loro riuso; esamina come l'integrazione degli standard IFC e bSDD possa trasformare la stima dei costi in una risorsa aperta e strutturata.

Il contesto OpenBIM

L'adozione di protocolli openBIM migliora la collaborazione tra discipline e professionisti diversi, ma si scontra ancora oggi con la mancanza di un linguaggio unificato e di una descrizione formalizzata dei componenti BIM e degli elementi architettonici. Lo schema IFC, se da un lato svolge un ruolo centrale nella standardizzazione delle informazioni BIM, dall'altro richiede l'allineamento semantico delle risorse BIM per uno scambio efficace di informazioni, che può essere formalizzato attraverso dizionari standard (bSDD) e requisiti di consegna strutturati (IDS).

Introduction

The digital transformation of the Architecture, Engineering, Construction and Operation (AECO) sector has redefined how cost information is generated, exchanged, and interpreted across the building lifecycle. Despite the growing use of BIM-based workflows, cost estimation, a central aspect of decision-making and project management, remains among the least digitally integrated. In Italy, traditional approaches rely on fragmented spreadsheets and textual price lists, which hinder data consistency and automation. As in many other domains, public procurement is also being affected by the digital transition. Public administrations at both national and European levels are progressively adopting openBIM standards, such as Industry Foundation Classes (IFC) (ISO 16739-1:2024) [buildingSMART International, 2024a], Information Delivery Specification (IDS) [buildingSMART International, 2024b], and the buildingSMART Data Dictionary (bSDD) [buildingSMART International, 2012], to ensure transparency, interoperability and standardisation in building construction processes. The overarching objective of this ongoing research is to bridge the gap between data standardisation and cost management, fostering a unified, interoperable digital ecosystem for construction processes. This paper investigates how regional public cost databases (Regional Price Lists) can evolve into semantic, interoperable digital environments that ensure machine-readable cost information is available throughout the entire project lifecycle. The preliminary approach of this research is exemplified by the analysis of the traditional Regional Price Lists of Tuscany [Regione Toscana, 2026] and Piedmont [Regione Piemonte, 2026], which yields a novel, interoperable transition towards developing a digital Price List that integrates cost semantics into open-BIM workflows for the digital information management (GID) of public procurement in the public sector. The methodology explores the potential of ontologies to model cost-related information, ensuring semantic consistency and reusability, and examines how integrating the IFC and bSDD standards can transform cost estimation into an open and structured asset.

Queste soluzioni complementari tra loro sono state sviluppate da *buildingSMART International* (bSI) [buildingSMART International, 2005], la comunità BIM che gestisce lo standard IFC, per la descrizione digitale standardizzata dell'ambiente costruito. Le istituzioni pubbliche europee inquadrano sempre più spesso la stima dei costi all'interno di processi openBIM basati sull'IFC per lo scambio di dati, con conseguente aumento dei requisiti informativi. L'attuale versione dell'IFC (versione 4.3) standardizza le entità di costo, come *IfcCostItem*, *IfcCostSchedule* e *IfcCostValue*, e le loro relazioni con gli oggetti geometrici/del modello, consentendo collegamenti leggibili da macchina tra quantità (Qto), computi metrico-estimativi e prezzi lungo tutto il ciclo di vita dell'asset. Ciò consolida le pratiche precedenti, in cui i costi venivano allegati come attributi ad hoc, e fornisce un percorso più diretto per la convalida e la verifica delle stime. Questi approcci hanno influenzato anche lo sviluppo di diversi *software* di computo per il BIM, in cui i prezzari possono essere caricati e riutilizzati all'interno di tali ambienti (ad es. Acca Edificius). Altre soluzioni *software* includono l'utilizzo di *Application Programming Interfaces* (API) o di una connessione ODBC ai programmi di calcolo e, infine, anche l'uso di un linguaggio di programmazione visivo (VPL) per esportare dati quantitativi (Qto) dai *software* BIM a fogli di calcolo esterni. A livello politico, l'EU *BIM Task Group* [EU BIM, 2024] segnala una costante espansione dei requisiti BIM negli appalti pubblici, con diversi Stati membri che legano i dati BIM alla produzione e alla verifica dei costi nelle gare d'appalto. Queste politiche convergono su elementi comuni: formati aperti (IFC), requisiti di informazione strutturata, spesso basati su LOIN/IDS, e la gestione delle quantità basata su modelli BIM per ridurre le controversie e aumentare la trasparenza nei lavori pubblici. L'agenda *Interoperable Europe* della Commissione europea posiziona il BIM come motore di trasparenza ed efficienza lungo il ciclo di vita dell'edificio, rafforzando la spinta politica verso standard aperti negli appalti e nello scambio di informazioni. Mentre lo schema IFC e lo standard IDS definiscono come le informazioni sono strutturate e fornite, non specificano che cosa significhino tali informazioni. Il livello semantico mancante è fornito dal buildingSMART Data Dictionary (bSDD), che introduce un vocabolario condiviso e un quadro di proprietà coerente per i dati di costruzione digitali. Sebbene abbia un grande potenziale, non è ancora diventato uno degli approcci più diffusi all'allineamento semantico nel quadro del BIM.

Il buildingSMART Data Dictionary (bSDD)

Nel 1999, nell'ambito di una riunione ISO che coinvolgeva diverse organizzazioni dei settori dell'Architettura, dell'Ingegneria e delle costruzioni (AEC), si è evidenziata l'importanza di stabilire una terminologia globale standardizzata per facilitare la collaborazione digitale (Bell et al., 2008). Questa iniziativa ha portato allo sviluppo del bSDD, che funge da implementazione operativa dell'International Framework for Dictionaries (IFD) (ISO 12006-3). L'IFD fornisce una struttura per le informazioni orientate agli oggetti ed è da allora diventato uno standard internazionale per la gestione terminologica nell'ambito del Building Informa-

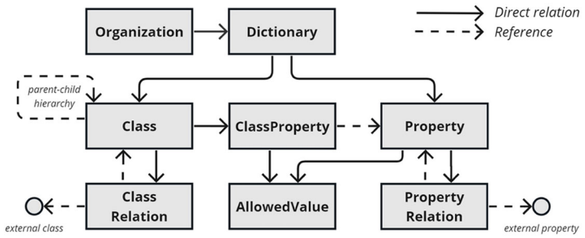
An openBIM framework

The adoption of openBIM protocols enhances collaboration, yet it still struggles with the lack of a unified language for project elements and a formalised description of BIM components. The IFC schema plays a central role in the standardisation of BIM information, but effective information exchange requires semantic alignment of BIM assets, which can be formalised through standard dictionaries (bSDD) and structured delivery requirements (IDS). These complementary solutions were developed by buildingSMART International (bSI) [buildingSMART International, 2005], the BIM community that maintains the IFC, a standardised digital description of the built environment.

European public institutions increasingly frame cost estimation within an openBIM stack built on IFC for data exchange and a growing layer of information requirements.

The current IFC release (version 4.3) standardises cost entities, such as IfcCostItem, IfcCostSchedule, and IfcCostValue, and their relationships to geometric/model objects, enabling machine-readable links between quantities, takeoffs (Qto), and prices across the asset lifecycle. This consolidates earlier practices in which costs were attached as ad hoc attributes and provides a more straightforward pathway for validating and auditing estimates. These approaches have also influenced the development of BIM estimating software on the market, in which Price Lists can be uploaded and reused within BIM environments (e.g., Acca Edificius). Other software solutions include using Application Programming Interfaces (APIs) for a vendor's commercially available estimating program, an ODBC connection to estimating programs, and, eventually, also a visual programming language (VPL) to export data from quantity takeoffs (Qto) performed within a BIM framework to external spreadsheets.

At the policy layer, the EU BIM Task Group [EU BIM, 2024] reports a steady expansion of BIM requirements in public procurement, with several member states tying BIM deliverables to cost production and verification in tenders. These policies are converging on common elements: open formats (IFC), structured information requirements, often leveraging LOIN/IDS [British Standards Institution, 2024], and model-based quan-



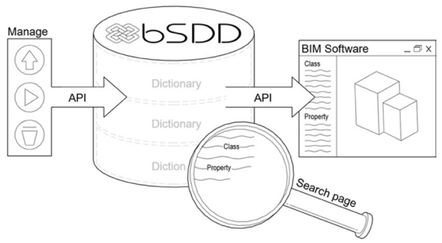


Fig. 1: Modello di dati del bSDD e la sua relazione con il modello di dati IFC.
La documentazione relativa al bSDD è disponibile all'indirizzo https://github.com/buildingSMART/bSDD/

Fig. 1: Data model of bSDD in the IFC framework.
The sources and documentation of the bSDD are available via https://github.com/buildingSMART/bSDD/

tion Modelling (BIM). Il bSDD è un database aperto, condiviso e orientato agli oggetti che definisce la terminologia degli oggetti BIM. Funge da libreria completa in cui i concetti e le definizioni dei termini sono chiaramente delineati (Fig. 1).

Include principalmente due tipi di informazioni: in primo luogo, la denominazione dei concetti in più lingue per facilitare la comprensione tra contesti linguistici diversi; e in secondo luogo, l'assegnazione di caratteristiche a ciascun concetto, quali misure, funzioni o attributi prestazionali. Infine, il bSDD non è concepito come un sistema di classificazione o come un archivio di informazioni specifico per un progetto, ma può incorporare vari sistemi di classificazione all'interno della propria struttura (Palos, 2012). Il suo ruolo principale è quello di supportare lo scambio di informazioni, fornendo un quadro coerente per la definizione dei dati degli oggetti. È importante sottolineare che il bSDD consente di definire le proprietà degli oggetti indipendentemente dallo schema IFC. Pertanto, anziché sostituire l'IFC, il bSDD e l'IFC si completano a vicenda, collaborando per migliorare l'interoperabilità semantica negli ambienti BIM [Bjørkhaug & Bell, 2006].

Il quadro normativo italiano in materia di prezzari digitali

In linea con la politica europea, l'Italia sta sviluppando un quadro normativo nazionale per la digitalizzazione delle informazioni sui costi pubblici. La recente evoluzione normativa, con il nuovo Codice degli appalti pubblici (D.Lgs. 36/2023), impone una gestione informativa digitale (GID) per i lavori pubblici, creando un contesto in cui nuovi prezzari digitali sono fondamentali per l'interoperabilità, l'automazione e la trasparenza nei processi di costruzione pubblica. In questo contesto, la digitalizzazione dei prezzari regionali è emersa come un nuovo ambito strategico di sperimentazione.

Tra le iniziative più avanzate, le Regioni Lombardia, Toscana e Piemonte stanno portando avanti tre approcci complementari che reinterpretano il prezzario come un ambiente di dati strutturato e interoperabile.

Nel 2021, il Politecnico di Milano ha avviato la transizione digitale del prezzario della Regione Lombardia. La loro attività di ricerca ha ridefinito completamente la struttura del prezzario, sviluppando una rete ontologica (Fig. 2) organizzata in classi e superclassi gerarchiche per standardizzare la semantica dei costi di costruzione [Hagedorn et al., 2025]. Questa ontologia stabilisce una base teorica per mappare le relazioni tra elementi costruttivi, materiali e attributi di costo, fungendo da modello di riferimento per altre implementazioni regionali [Signorini et al., 2025; Gatto et al., 2023; Pavan et al., 2020].

Nel 2023, l'Università di Pavia, in collaborazione con la Regione Toscana, ha sviluppato una metodologia basata sulla digitalizzazione delle risorse per tradurre le voci del prezzario in oggetti OpenBIM tridimensionali. La Regione Toscana, attraverso il progetto DIGITALVISIO[1], ha adottato un'ontologia operativa integrata nell'ambiente BIM, in cui ogni voce di costo del prezzario regionale è modellata come oggetto BIM collegato a entità IFC. Questo approccio si concentra sull'integrazione pratica tra la geometria del modello, i parametri informativi e i dati sui costi regionali, per consentire un flusso di lavoro automatico di quantificazione e convalida all'interno di processi openBIM [Bertocci et al., 2024].

Nel 2026, il Politecnico di Torino ha avviato una collaborazione con la Regione Piemonte. Questo approccio, più recente, prevede l'uso del bSDD e offre vantaggi nuovi e molteplici. In primo luogo, consente la creazione di librerie di costi multilingue e leggibili da

[1] Il progetto DIGITALVISIO è finanziato dalla Regione Toscana - Ufficio Prezzari ed è sviluppato in collaborazione con il Dipartimento di Architettura DIDA dell'Università degli Studi di Firenze (fino al 2025, sotto la direzione scientifica del Prof. S. Bertocci) e il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura DICAr dell'Università degli Studi di Pavia (direzione scientifica del Prof. M. Ricciarini, coordinamento della ricercar a cura della Prof.ssa Francesca Galasso). Il progetto supporta la definizione di linee guida operative openBIM, lo sviluppo di una libreria digitale IFC del Prezzario della Regione Toscana e la promozione dell'interoperabilità attraverso standard openBIM.

The buildingSMART Data Dictionary (bSDD)

In 1999, an ISO meeting involving organisations from the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) sectors highlighted the importance of establishing a standardised global terminology to facilitate digital collaboration (Bell et al., 2008). This initiative resulted in the development of the bSDD, which serves as the operational implementation of the International Framework for Dictionaries (IFD) (ISO 12006-3). The IFD provides a structure for object-oriented information and has since become an international standard for terminology management within the Building Information Modelling (BIM) framework.

The bSDD is an open, shared, and object-oriented database that defines terminology for BIM objects. It serves as a comprehensive library in which concepts and term definitions are clearly outlined (Fig. 1). It mainly includes two types of information: first, the naming of concepts in multiple languages to facilitate understanding across different linguistic backgrounds; and second, the assignment of characteristics to each concept, such as measurements, functions, or performance attributes. Finally, the bSDD is not intended as a classification system or a project-specific information repository, but it can incorporate various classification systems within its structure [Palos, 2012]. Its primary role is to support information exchange by providing a consistent framework for defining object data. Importantly, the bSDD allows object prop-

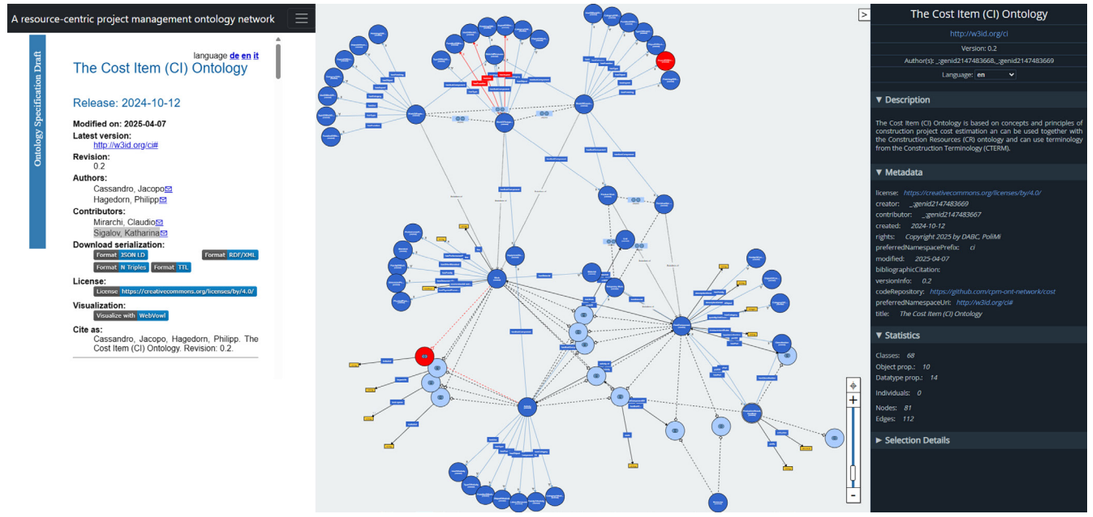


Fig. 2: Interfaccia online dedicata al "*Project management ontology network*", sviluppata dal Politecnico di Milano per il prezzario della Regione Lombardia. La documentazione relativa alle ontologie sviluppate è disponibile all'indirizzo https://cpmont-network.github.io

Fig. 2: The user interface of the 'Project management ontology network' developed by Politecnico di Milano for the Lombardy price list.
The sources and documentation of the ontologies are available via https://cpmont-network.github.io/

[1] The DIGITALVISIO project is funded by the Tuscany Region - Price List Office and it is developed in collaboration between the Architecture Department of the University of Florence (until 2025 - scientific direction of Prof. S. Bertocci) and the Civil Engineering and Architecture Department of the University of Pavia (scientific direction Prof. M. Ricciarini, coordinator Prof. Francesca Galasso). The project supports the definition of operational openBIM guidelines, the development of a digital IFC library of the Tuscany Price List and the promotion of interoperability through openBIM standards.

macchina, in cui ogni voce di costo è modellata come un oggetto digitale con attributi strutturati, quali il materiale, le prestazioni, l'unità di misura e il prezzo. Il Piemonte, con il progetto PIEGID[2], persegue un modello ibrido, concettuale-operativo, integrato in un bSDD ad hoc per il Prezzario del Piemonte. L'attenzione è rivolta alla traduzione del testo dal linguaggio naturale al linguaggio macchina, utilizzando un vocabolario digitale allineato allo standard IFC. Questa strategia mira a garantire che ogni voce di costo nel prezzario sia semanticamente comprensibile e interoperabile tra le diverse piattaforme software.

Partendo da questi presupposti, la Toscana e il Piemonte stanno ora ampliando il proprio lavoro, convergendo verso un obiettivo comune: la creazione di prezzari digitali interoperabili in cui le voci di costo siano modellate come oggetti conformi allo standard bSDD, allineati alle classi IFC e agli standard nazionali esistenti in materia di dati (Fig. 3). Integrando flussi di lavoro operativi di stima dei costi basati sul BIM e prospettive lessicali, questi progetti regionali contribuiscono a definire un modello ontologico unificato per la gestione dei costi di costruzione, garantendo sia la standardizzazione dei dati sia l'applicabilità pratica in tutto l'ecosistema delle costruzioni pubbliche italiane.

Workflow operativi BIM-based per il progetto DIGITALVISIO

La metodologia applicata, sviluppata nell'ambito della ricerca in collaborazione con la Regione Toscana, ha affrontato la digitalizzazione dei prezzari dei Lavori Pubblici Regionali come

erties to be defined independently of the IFC schema. Therefore, rather than replacing the IFC, the bSDD and IFC complement each other, working together to improve semantic interoperability in BIM environments [Bjørkhaug & Bell, 2006].

The Italian framework for digital Price Lists (ECG-FG)

In line with European policy, Italy is developing a national framework for the digitalisation of public cost information. The recent regulatory evolution with the new Public Procurement Code (D.Lgs. 36/2023) mandates the use of digital methods for public works, creating a context in which digital Price Lists are critical for interoperability, automation, and transparency in public construction processes. Within this framework, the digitalisation of regional Price Lists has emerged as a strategic field of experimentation. Among the most advanced initiatives, the Lombardy, Tuscany, and Piedmont Regions are leading three complementary approaches that reinterpret the cost list as a structured, interoperable data environment.

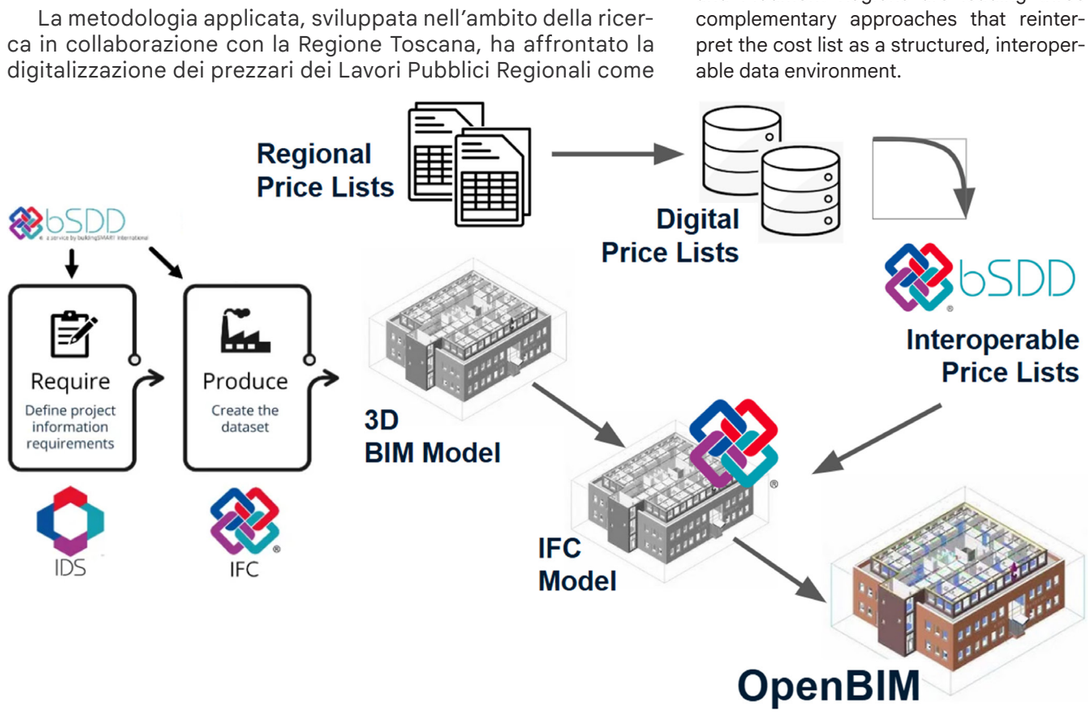


Fig. 3: L'ecosistema OpenBIM sviluppato per lo scambio di dati 3D relativi ai prezzari regionali

Fig. 3: The OpenBIM ecosystem for 3D data exchange and management of regional price lists

un processo di ristrutturazione dell'informazione, volto a convalidare un flusso di lavoro di formalizzazione controllata dei dati per ridurne l'ambiguità interpretativa e rendere il contenuto del prezzario esplicito e inequivocabile.

Il primo passo è stato discretizzare le descrizioni testuali delle voci del prezzario, in accordo con l'amministrazione regionale, identificando "chiavi di lettura" univoche. Questa operazione ha scomposto i testi originali in campi informativi compilabili, trasformando descrizioni narrative estese in uno schema di dati strutturato. La discretizzazione è concepita come una forma di "riduzione controllata": cerca di preservare la specificità tecnica e disciplinare di ciascuna voce rendendo al contempo esplicita la sua semantica in termini operativi. Le "chiavi" risultanti sono state poi normalizzate in parametri condivisi, con convenzioni di denominazione stabili e tipi di dati coerenti, per facilitare l'implementazione negli ambienti di authoring BIM e limitare la variabilità tra operatori e piattaforme. In questa fase, per aderire alle specificità descrittive del prezzario senza introdurre vincoli prematuri, le informazioni sono state organizzate in *Property Sets* (Psets) personalizzati, concepiti come contenitori stabili per le "chiavi" e come mezzo per garantire la coerenza della terminologia esportata (Fig. 4). Questa scelta supporta la tracciabilità e la documentazione delle corrispondenze tra le descrizioni degli elementi, i parametri del modello e le proprietà scambiate, riducendo così i disallineamenti tra ambienti eterogenei.

Parallelamente, il flusso di lavoro ha incluso la produzione di una libreria BIM, concepita come un insieme di modelli esemplificativi che rendono esplicite e osservabili le classi, le proprietà e le convenzioni di denominazione previste dal prezzario. Questo approccio ha messo in primo piano il formato IFC, adottato come mezzo preferito per lo scambio di modelli e la verifica da parte

In 2021, the Politecnico di Milano began the digital transition of the Lombardy Region's Price Lists. Their research activity completely redefines the structure of their price lists, developing an ontology network (Fig. 2) organised into hierarchical classes and superclasses to achieve semantic standardisation of construction costs [Hagedorn et al., 2025]. This ontology establishes a theoretical foundation for mapping the relationships between construction elements, materials, and cost attributes, serving as a reference model for other regional implementations [Signorini et al., 2025; Gatto et al., 2023; Pavan et al., 2020].

In 2023, the University of Pavia, in collaboration with the Tuscany Region, developed a resource-centric methodology to translate price-list items into 3D OpenBIM objects. Tuscany, through the DIGITALVISIO project[1], has adopted an operational ontology embedded in the BIM environment, in which each cost item from the regional Price List is modelled as a BIM object linked to IFC entities. This approach focuses on the practical integration of connection model geometry, information parameters, and regional cost data to enable an automatic quantification and validation workflow within openBIM processes [Bertocci et al., 2024].

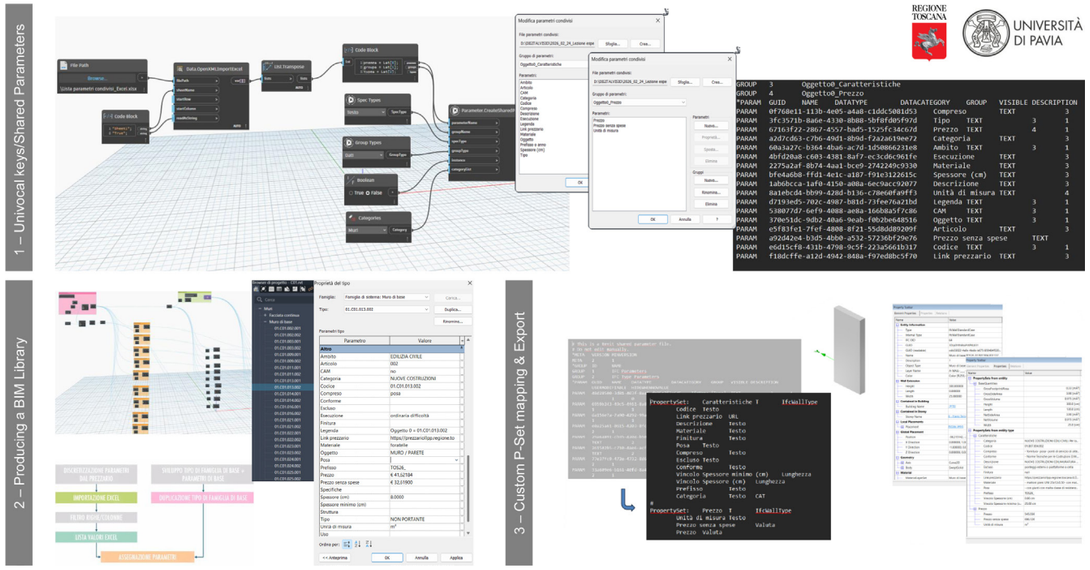


Fig. 4: Il diagramma sintetizza le principali fasi operative del processo di digitalizzazione del prezzario regionale della Regione Toscana, evidenziando così il passaggio da una base descrittiva testuale a un ambiente informativo multilivello.

Fig. 4: The diagram summarises the main operational stages of digitising the Tuscany regional price list, illustrating the transition from a text-based descriptive framework to a multi-level information environment.

di terzi, mentre la reimportazione completa e la modifica nativa restano subordinate ai vincoli dei sistemi di authoring proprietari.

Da un punto di vista operativo, la metodologia sviluppata è stata affiancata da procedure di automazione per aumentare la ripetibilità dei processi e ridurre gli errori manuali, in particolare nelle fasi di popolamento delle informazioni nel modello BIM e di esportazione. Infine, la normalizzazione dei dati ha consentito la generazione di tabelle e di controlli iniziali dei costi direttamente nell'ambiente BIM, trasformando il modello in uno strumento di controllo progressivo anziché in un semplice prodotto finale.

Il PREZZARIO GID-PIEGID: uno scenario applicativo preliminare che utilizza l'intelligenza artificiale

L'approccio metodologico applicato al prezzario del Piemonte si è basato sull'utilizzo del bSDD e ha avuto origine da un'analisi preliminare del prezzario volta a identificarne la struttura semantica e il potenziale di trasformazione digitale. Questa analisi ha costituito la base per un quadro di riferimento in cui ogni voce di prezzo viene reinterpretata come oggetto semantico collegato allo schema IFC ed espressa attraverso modelli di conoscenza (*knowledge patterns*) che formalizzano le relazioni ricorrenti tra elementi, materiali, risorse e costi. Attraverso questo processo di digitalizzazione, il tradizionale prezzario si evolve in un ambiente di dati strutturato, in cui ogni voce diventa un oggetto leggibile da macchina, arricchito da proprietà e relazioni standardizzate, adatte allo scambio digitale e alla convalida automatizzata delle informazioni. Il primo passo della metodologia applicata al prezzario della Regione Piemonte è stato identificare le classi IFC da assegnare alle singole voci del prezzario. I campi descrittivi delle voci sono stati quindi analizzati per definire i gruppi di proprietà specifici per ciascuna voce. Sono stati utilizzati strumenti di intelligenza artificiale per assegnare le classi IFC a ciascuna voce del prezzario, come richiesto dalla struttura dei dati .json del bSDD che prevede classi, proprietà e relazioni. L'algoritmo proposto (Fig. 5) è suddiviso in tre fasi sequenziali:

Fase 1: Distillazione Semantica. Un modello linguistico di grandi dimensioni (LLM) analizza la descrizione estesa della voce del prezzario per estrarne le parole chiave. Questo processo isola l'oggetto fisico o il materiale principale. Vengono così filtrate le informazioni testuali ridondanti relative alla manodopera, alla posa in opera o ad aspetti burocratici.

Fase 2: Ricerca Vettoriale. Il testo filtrato alimenta un sistema di ricerca vettoriale. Un modello *Sentence Transformer* multilingue converte le descrizioni in vettori densi e le confronta con i profili semantici delle entità IFC. Il sistema seleziona le 25 migliori possibili classi IFC calcolando la similarità del coseno. Questo passaggio restringe e ottimizza lo spazio di ricerca.

[2] L'iniziativa PREZZARIO GID - PIEGID è finanziata dalla Regione Piemonte e sviluppata in collaborazione tra i Dipartimenti DAD, DISEG e DIST del Politecnico di Torino. L'attività è sotto la direzione scientifica dalla Prof.ssa E.C. Giovannini (DAD). Il gruppo di ricerca è composto dal Prof. M. Lo Turco (DAD), dal Prof. M.M. Bocconcino (DISEG), dalla Prof.ssa M. Rebaudengo (DIST), dalla Prof.ssa M. Vozzola (coordinatrice del progetto, DISEG), dal Dott. di ricerca A. Tomalini e dal Dott. di ricerca J. Bono.attraverso standard openBIM.

In 2026, Politecnico di Torino began collaborating with the Piedmont Region. This latest approach considers the use of bSDD, providing novel and multiple benefits. First, it enables the creation of machine-readable, multilingual cost libraries in which each construction item is modelled as a digital object with structured attributes, such as material, performance, unit of measure, and price. Piedmont, with the PIEGID project[2], pursues a hybrid conceptual–operational model embedded in an ad hoc bSDD for the Piedmont Price List. The focus is on translating natural-language text into machine-readable information using a digital vocabulary aligned with the IFC standard. This strategy aims to ensure that each cost item in the Price List can be semantically understood and interoperable across different software platforms.

Building on these premises, Tuscany and Piedmont are now extending their work, converging on a shared objective: creating interoperable digital Price Lists in which cost items are modelled as bSDD-compliant objects aligned with IFC classes and existing national data standards (Fig.3).

By integrating operational BIM-based cost-estimation workflows and lexical perspectives, these regional projects help define a unified ontological model for construction cost management, ensuring both data standardisation and practical applicability across the Italian public construction ecosystem.

DIGITALVISIO BIM-based operative workflow

The applied methodology, developed within the Tuscany Region research context, approached the digitisation of the Regional Public Works Price List as an information restructuring process, aimed at validating a controlled formalisation of the data workflow to reduce interpretative ambiguity in price lists and to make the underlying content explicit and unambiguous.

[2] The PREZZARIO GID - PIEGID initiative is funded by the Piedmont Region and developed in collaboration among the DAD, DISEG, and DIST departments of Politecnico di Torino. The activity is scientifically coordinated by Prof. E.C. Giovannini (DAD). The research group comprises Prof. M. Lo Turco (DAD), M.M. Bocconcino (DISEG), Prof. M. Rebaudengo (DIST), Prof. M. Vozzola (project coordinator, DISEG), PhD, A. Tomalini, and PhD, J. Bono.

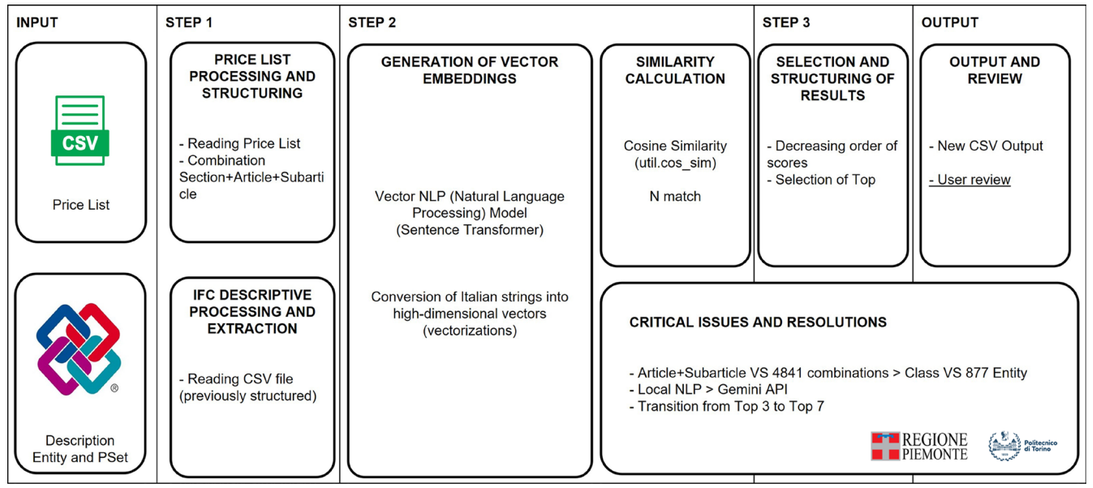


Fig. 5: Flusso di lavoro dell'algoritmo proposto, basato su intelligenza artificiale, per l'assegnazione delle classi IFC alle voci di prezzario della Regione Piemonte

Fig. 5: Workflow of the proposed algorithm for AI-based assignment of IFC classes to Piedmont regional price list items.

Fase 3: Reranking Decisionale. Le descrizioni originali, arricchite dalle 25 classi vettoriali e da specifiche regole di dominio, vengono sottoposte a un altro LLM. Questo modello è istruito a operare come BIM Manager. L'agente valuta e seleziona la classe IFC più adatta. L'*output* è strutturato in formato JSON e include la relativa giustificazione logica. Per garantire un'elevata accuratezza e mitigare le "allucinazioni" tipiche dei modelli generativi, l'intero processo viene eseguito in parallelo. Si utilizzano tre LLM locali con architetture diverse: Qwen, Mistral e Gemma.

Infine, il sistema aggrega i risultati tramite un algoritmo di consenso basato sul voto di maggioranza (Majority Voting). Le voci ottengono un'assegnazione validata in caso di accordo unanime o di maggioranza tra i tre modelli. I casi di conflitto totale vengono invece isolati per la revisione manuale. Questa ridondanza multi-agente mitiga gli errori dovuti alle allucinazioni e snellisce il processo di classificazione per l'operatore.

Il processo di classificazione presenta ancora delle criticità; tuttavia, risulta scalabile e ogni decisione è tracciabile.

Un possibile flusso di lavoro per la creazione di bSDD regionali

Dopo la fase preliminare di mappatura tra le voci di prezzario e le classi IFC, effettuata sia manualmente (Regione Toscana) sia tramite l'intelligenza artificiale (Regione Piemonte), è stata

The first step consisted of discretising the textual descriptions of the price-list items, in agreement with the contracting authority, by identifying univocal "reading keys". This operation decomposed the original texts into compilable information fields, transforming extended narrative descriptions into a structured data schema. Discretisation is conceived as a form of "controlled reduction": it seeks to preserve the technical and disciplinary specificity of each item while making its semantics explicit in operational terms. The resulting "keys" were then normalised as shared parameters, with stable naming conventions and consistent data types, to facilitate implementation in authoring BIM environments and to limit variability across operators and platforms. At this stage, to adhere to the price list's descriptive specifics without introducing premature constraints, the information was organised into custom Property Sets (Psets), conceived as stable containers for keys and as a means of ensuring coherence in the exported terminology (Fig. 4). This choice supports traceability and documentation of the correspondences between

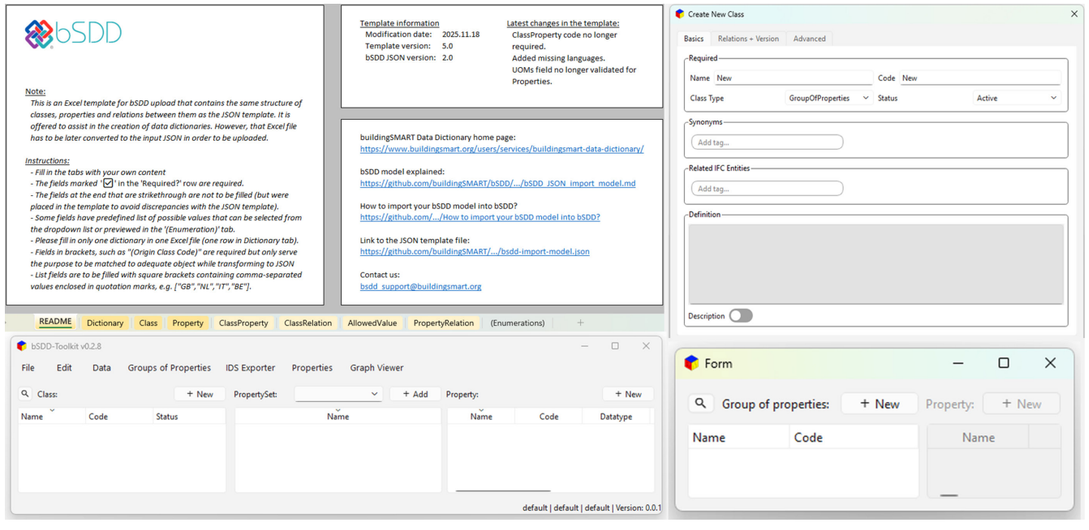


Fig. 6: Template del foglio di calcolo (in alto a sinistra) e dell'interfaccia del bSDD Toolkit, che illustrano le informazioni necessarie allo sviluppo del file .json da importare nel bSDD manager.

Fig. 6: A screenshot of the spreadsheet (top left) and the bSDD Toolkit interface, showing the information required to create the .json file to be imported into the bSDD Manager.

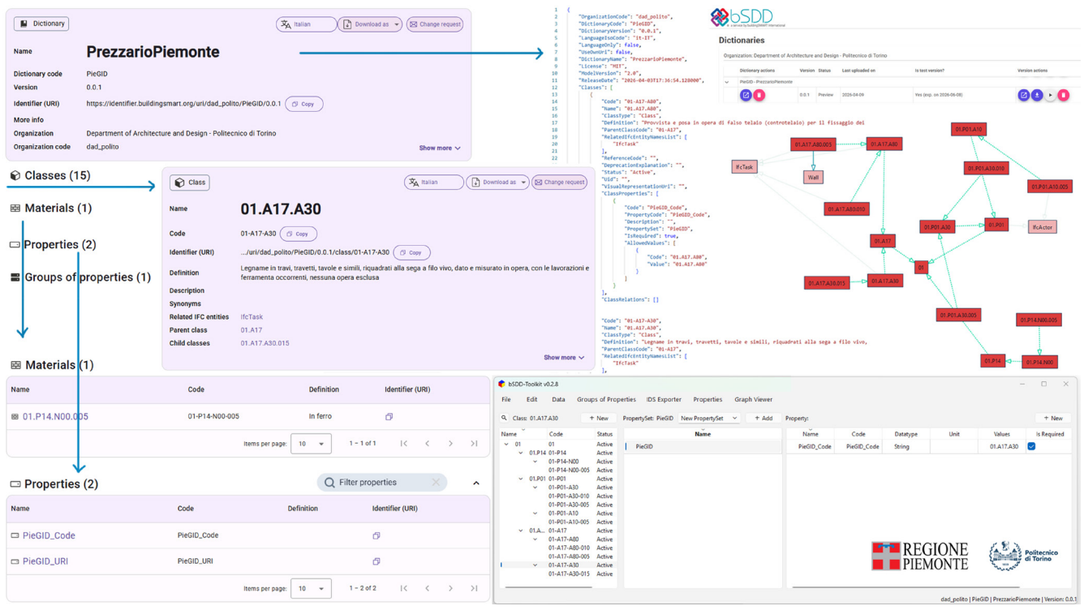


Fig. 7: La figura illustra la relazione tra la pagina web del database bSDD, l'interfaccia del bSDD Toolkit e il codice .json sviluppato per il primo prototipo del PIEGID per la Regione Piemonte.

Fig. 7: The figure illustrates the relationship among the bSDD database webpage, the bSDD Toolkit interface, and the developed .json code for the PIEGID first prototype for Piedmont Region.

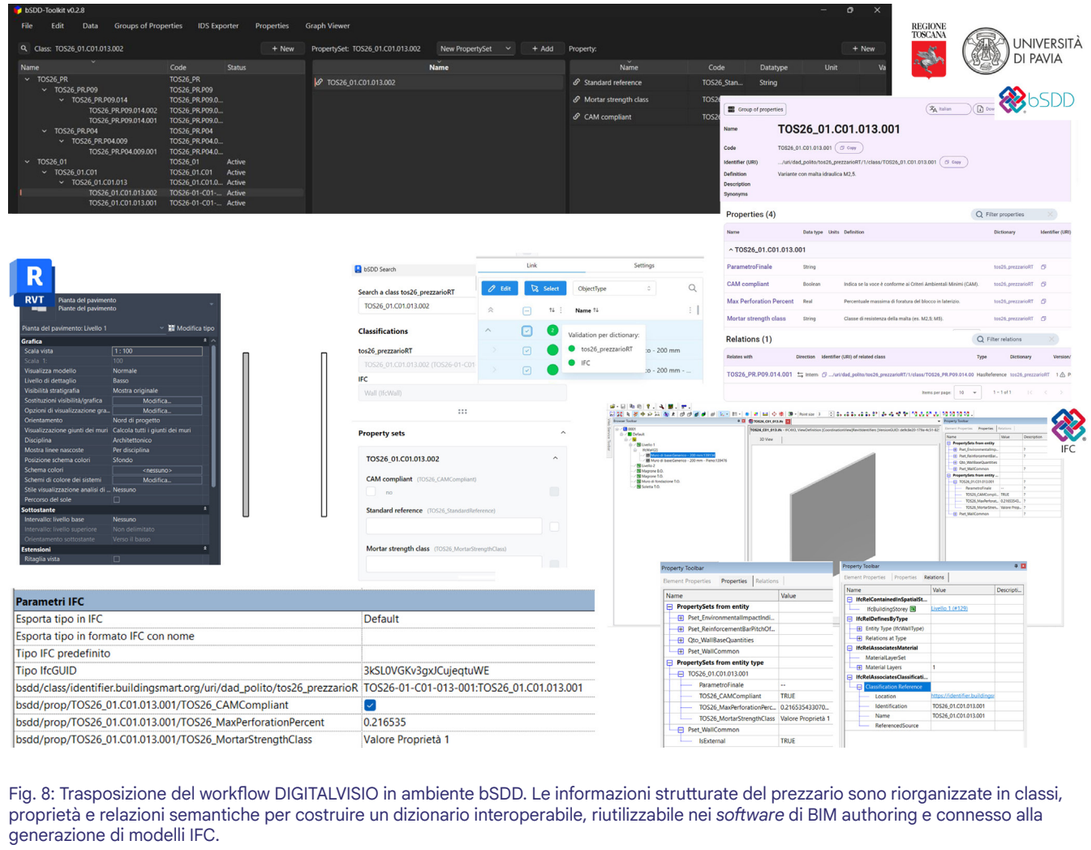


Fig. 8: Trasposizione del workflow DIGITALVISIO in ambiente bSDD. Le informazioni strutturate del prezzario sono riorganizzate in classi, proprietà e relazioni semantiche per costruire un dizionario interoperabile, riutilizzabile nei *software* di BIM authoring e connesso alla generazione di modelli IFC.

Fig. 8: Implementation of the DIGITALVISIO workflow in a bSDD environment. The structured data from the price list is reorganised into classes, properties and semantic relationships to create an interoperable dictionary that can be reused in BIM authoring software and linked to IFC.

realizzata una prima versione digitale dei prezzari regionali utilizzando il bSDD e il modello di foglio di calcolo proposto dalla comunità buildingSMART (bS). In una fase successiva, abbiamo scelto di utilizzare il *software* open source bSDD Toolkit [Mellüh, 2025], che consente l'inserimento dei dati tramite un'interfaccia grafica (Fig. 6).

Entrambi gli approcci richiedono la definizione di classi, proprietà e delle rispettive relazioni. Mentre il modello di foglio di calcolo richiede un convertitore in formato .json [buildingSMART International, 2020], il bSDD Toolkit genera automaticamente il formato richiesto al momento del caricamento sul portale ufficiale (Fig. 7).

I file .json generati da entrambi i metodi possono quindi essere caricati su bSDD Manager, rendendoli immediatamente disponibili online e riutilizzabili tramite API all'interno dei *software* BIM (Fig. 8).

Questa fase rappresenta il passaggio dai dati descrittivi a quelli formalizzati. Prevede la creazione di un sistema in cui ogni voce del prezzario possa essere interpretata non solo come voce economica, ma anche come unità informativa collegata a una classe, a un insieme di proprietà e a un quadro di relazioni.

In prospettiva, ciò rende possibile non solo consultare il prezzario in formato digitale, ma anche utilizzarlo nei flussi di lavoro

item descriptions, model parameters, and exchanged properties, thereby reducing misalignments across heterogeneous environments.

In parallel, the workflow included producing a BIM Library, conceived as a set of exemplary models that make the expected classes, properties, and naming conventions of the price lists explicit and observable. This approach foregrounded the IFC format, adopted as the preferred medium for model exchange and third-party verification, whereas full round-trip reimport and native editing remain contingent on the constraints of proprietary authoring systems.

From an operational standpoint, the pipeline was supported by automation procedures to increase repeatability and reduce manual errors, particularly during information population and export stages. Finally, upstream normalisation enabled the generation of schedules and initial cost

openBIM, per la verifica dei modelli e per definire regole condivise di calcolo e convalida. L'approccio bSDD risolve efficacemente le ambiguità comunemente associate ai tradizionali prezzari testuali e facilita il collegamento automatico agli oggetti di Building Information Modelling (BIM) nel formato Industry Foundation Classes (IFC). Inoltre, migliora l'interoperabilità semantica tra banche dati regionali, strumenti *software* e standard nazionali, garantendo che le informazioni sui costi siano condivise e aggiornate in modo coerente tra diverse piattaforme digitali. Infine, promuove la trasparenza e la tracciabilità dei dati, poiché ogni voce di costo diventa un oggetto dati standardizzato, la cui definizione, descrizione e relativi aggiornamenti sono chiaramente documentati [Jönsson, 2015]. Questo metodo mira a standardizzare della terminologia relativa alle caratteristiche regionali specifiche di determinate tecniche costruttive e al vocabolario locale. Anziché descrivere ogni voce singolarmente, sono stati identificati modelli di conoscenza riproducibili e riutilizzabili (*knowledge patterns*)per organizzare gruppi omogenei di voci. Questo è stato un passo decisivo verso la scalabilità e la coerenza del dizionario, in particolare quando si ha a che fare con prezzari molto estesi e una significativa variabilità lessicale, orientandosi verso i Linked Building Data (LBD) [Bonduel et al., 2018].

Conclusioni

Gli studi presentati dimostrano che la digitalizzazione dei prezzari regionali non si limita a convertire gli elenchi in formati consultabili, ma richiede anche una ristrutturazione semantica. Il prezzario si trasforma da un archivio puramente testuale a un'infrastruttura informativa multilivello che integra tre livelli: scambio di dati, definizioni condivise e modelli operativi computabili, interrogabili e controllabili.

Un confronto tra DIGITALVISIO e PREZZARIO PIEGID evidenzia due strategie complementari, non alternative. L'esperienza toscana dimostra l'efficacia di un'ontologia operativa integrata direttamente nell'ambiente BIM, dove la discretizzazione delle dichiarazioni, la parametrizzazione degli attributi e la costruzione di oggetti IFC con insiemi di proprietà dedicati rendono possibile rendere leggibili i dati di costo. L'esperienza piemontese, d'altra parte, evidenzia la necessità di agire a monte, a livello linguistico-concettuale, ricostruendo un vocabolario controllato che associa le voci del prezzario a classi e relazioni formalizzate in un dizionario dei dati. La convergenza di questi due approcci suggerisce che lo sviluppo futuro dei prezzari digitali non possa basarsi né su una modellazione puramente orientata agli oggetti né su un'unica tassonomia concettuale, bensì su un'infrastruttura in cui il modello BIM e il dizionario semantico si rafforzino a vicenda.

I risultati consentono inoltre di identificare con maggiore precisione le questioni ancora aperte. La prima riguarda il rischio di sovraccarico informativo del modello, già evidente quando la necessità di mantenere la ricchezza descrittiva del prezzario porta a insiemi estesi di proprietà personalizzate. Senza un adeguato equilibrio tra granularità semantica e usabilità operativa, il modello rischia di perdere leggibilità, manutenibilità e controllabilità. La seconda questione critica riguarda la mancanza di una piena standardizzazione del dominio economico all'interno dei flussi di lavoro OpenBIM: sebbene l'ecosistema IFC includa entità e relazioni per la gestione dei costi, la loro applicazione ai prezzari regionali e alle pratiche di valutazione pubblica richiede ancora mappature condivise, regole di popolamento coerenti e criteri di validazione uniformi. La terza questione critica, di natura più strettamente culturale e lessicale, riguarda la potenziale perdita della specificità terminologica regionale. In questo senso, una formalizzazione eccessivamente rigida rischia di compromettere l'interpretazione dell'opera, nonché le differenze tecniche e linguistiche che costituiscono una componente essenziale della conoscenza del patrimonio edilizio locale.

In conclusione, i casi analizzati dimostrano che lo sviluppo di un ecosistema nazionale di prezzari digitali richiede più della semplice standardizzazione della documentazione; deve comportare una convergenza semantica e metodologica tra le regioni. La standardizzazione non dovrebbe appiattire i vocabolari locali, ma riorganizzarli all'interno di quadri condivisi che ne preservino le differenze, consentendo al contempo la comparabilità e l'interoperabilità. L'obiettivo non è solo digitalizzare i prezzari tradizionali, ma anche creare un ambiente in cui i dati sui costi siano strutturati, tracciabili e semanticamente allineati in tutti i processi di costruzione.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la Regione Toscana e la Regione Piemonte per il sostegno alle attività di ricerca e sperimentazione sulla digitalizzazione dei prezzari regionali, sviluppate rispettivamente nell'ambito dei progetti DIGITALVISIO e PREZZARIO GID - PIEGID.

Crediti

Il Prof. M. Ricciarini è autore dell'*Introduzione* e delle *Conclusioni*; F. Galasso è autore del paragrafo *Workflow operativi BIM-based per il progetto DIGITALVISIO*; E.C. Giovannini è autrice del paragrafo *Il contesto OpenBIM*; A. Tomalini è autore del paragrafo *Il PREZZARIO GID - PIEGID: uno scenario applicativo preliminare che utilizza l'intelligenza artificiale*.

I paragrafi *Il buildingSMART Data Dictionary (bSDD), Il quadro normativo italiano in materia di prezzari digitali* e *Un possibile flusso di lavoro per la creazione di bSDD regionali* sono stati redatti congiuntamente da E.C. Giovannini e F. Galasso.

Bibliografia

Bell, H., Bjorkhaug, L., Bjaaland, A., & Grant, R. (2008). *IFD Library White Paper*, CSI and IFD Library Group

Bertocci, S., Ricciarini, M., & Galasso F. (2024). Management of open H-BIM models for data interoperability. In Empler, T., Caldarone, A., Nunez, J., Portoghesi Tuzi, S. (Eds) *3D Modeling & BIM Argentina - Para la trasformación digital*, pp. 69-80. Rome, IT: DEI s.r.l. Tipografia del Genio Civile

Bjørkhaug L., & Bell, H. (2006). A buildingSMART ontology, *Proceedings of the 2006 ECPPM Conference*, pp. 185-190.

checks directly within the BIM environment, turning the model into an instrument for progressive control rather than merely a final deliverable.

The PREZZARIO GID - PIEGID preliminary applicative scenario using AI

The methodological approach of the Piedmont Region consists of developing a bSDD based on a preliminary analysis of the regional public Price List to identify its semantic structure and potential for digital transformation. This analysis formed the basis for a framework in which each price item is reinterpreted as a semantic object linked to the IFC schema and expressed through "Knowledge Patterns" that formalise recurrent relationships among elements, materials, resources, and costs. Through this digitisation process, the traditional price list evolves into a structured data environment in which each entry becomes a machine-readable object, enriched with standardised properties and relationships, suitable for digital exchange and automated information validation. The first step in the methodology applied to the Piedmont Region's price list was to identify the IFC classes to be assigned to individual items. The descriptive fields for the items were then analysed to define the specific property groups for each item. Artificial intelligence tools were used to assign IFC classes to each item in the price list, as required by the bSDD .json data structure for classes, properties, and relations. The proposed algorithm (Fig. 5) comprises three sequential phases:

Phase 1: Semantic Distillation. A large language model (LLM) analyses the extended description of the price list item to extract keywords. This isolates the physical object or main material, filtering out redundant textual information related to labour, installation, or bureaucratic aspects.

Phase 2: Vector Search. The purified text feeds a vector search system. A multilingual Sentence Transformer model converts the descriptions into dense vectors and compares them with the semantic profile of the IFC entities. The system selects the top 25 candidate IFC classes by computing cosine similarity, thereby narrowing and optimising the search space.

Phase 3: Decision Reranking. The original descriptions, enriched with vector IFC candidate classes and domain-specific rules, are submitted to an LLM instructed to act as a BIM Manager. The model evaluates and selects the most appropriate IFC class, structuring the output as JSON with the corresponding logical justification. To ensure high accuracy and mitigate the "hallucinations" typical of generative models, the entire process is executed in parallel by three local LLMs with different architectures (Qwen, Mistral, and Gemma).

Finally, the system aggregates the results through a consensus algorithm based on Majority Voting. Items receive a validated assignment if there is unanimous or majority agreement among the three models; cases of total conflict are isolated for human review. This multi-agent redundancy mitigates errors related to agent-derived hallucinations and streamlines the classification process for the operator. The classification process described here still has some critical issues, but it is scalable, and every decision is traceable.

A possible workflow for the creation of the regionals bSDD

After the preliminary mapping phase between items of price lists and IFC classes, performed both manually (Turcany Region) and using AI (Piedmont Region), the development of a first corresponding digital version of the price lists using bSDD was carried out using the spreadsheet template proposed by the buildingSMART (bS) community.

In a subsequent phase, we opted to use the open-source software bSDD Toolkit [Mellüh, 2025], which allows data to be entered via a graphical interface (Fig. 6).

Both approaches require defining classes, properties, and their respective relationships. Whilst the spreadsheet template requires a converter to the .json format [buildingSMART International, 2020], the bSDD Toolkit automatically generates the required format during the upload process in the official web portal (Fig. 7). The .json files generated by both methods can then be uploaded to the bSDD Manager, making them immediately available online and thus reusable via API within BIM software (Fig. 8). This phase

Bonduel, M., Oraskari, J., Pauwels, P., Vergauwen, M., & Klein, R. (2018). The IFC to linked building data converter: current status. In *6th international workshop on linked data in architecture and construction* (pp. 34-43). CEUR-WS. org.

British Standards Institution. (2024). *BS EN ISO 7817-1:2024 Building information modelling - Level of information need. Concepts and principles*.
https://www.thenbs.com/PublicationIndex/documents/details?Pub=BSI&DocId=342733

buildingSMART International. (2024a). *IFC Schema Specifications*
https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/

buildingSMART International. (2024b). *Information Delivery Specification*.
https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/information-delivery-specification-ids/

buildingSMART International. (2020). *buildingSMART/bSDD: The buildingSMART Data Dictionary repository*.
https://github.com/buildingSMART/bSDD/

buildingSMART International. (2012). *buildingSMART Data Dictionary*.
https://www.buildingsmart.org/users/services/buildingsmart-data-dictionary/

buildingSMART International. (2005). *buildingSMART International*.
https://www.buildingsmart.org/

EU BIM. (2024). *EU BIM Task Group Survey Report*.
https://eubim.eu/wp-content/uploads/2024/12/EUBTG_BIM_survey_report_2024.pdf

Gatto, C., Gholamzadehmir, M., Zampogna, M., Mirarchi, C., & Pavan, A. (2023). An Automated Framework for Ensuring Information Consistency in Price List Tendering Document. In Capone, P., Getuli, V., Rahimian, F. P., Dawood, N., Bruttini, A., Sorbi T. (Eds.) *CONVR 2023 - Proceedings of the 23rd International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*. pp. 841-851. Florence, IT: Firenze University Press.

Hagedorn, P., Cassandro, J., Sigalov, K., Mirarchi, C., Pavan, A., & König, M. (2025). A shared construction resource ontology for semantically aligning cost and time domains in construction projects. *Proceeding of LDAC 2025: 13th Linked Data in Architecture and Construction Workshop*, July 09–11, 2025, Porto, Portugal

Jönsson, E. (2015). *Consequences of Implementing the buildingSMART Data Dictionary*. Master of Science Thesis n. 363, Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden.

Mellüh, C. (2025). *bSDD-Toolkit: Visual editor and Python toolkit for creating, validating, and managing buildingSMART Data Dictionary (bSDD)*.
https://github.com/c-mellueh/bSDD-Toolkit

represents the transition from descriptive data to formalised data. It involves building a system in which each item in the price list can be interpreted not only as an economic item, but also as a unit of information linked to a class, a set of properties and a framework of relationships. Looking ahead, this makes it possible not only to consult the price list in digital format but also to use it in openBIM workflows, for model verification, and for defining shared rules for calculation and validation. The bSDD approach effectively resolves the ambiguities commonly associated with traditional textual price lists and facilitates automatic linking to Building Information Modelling (BIM) objects in Industry Foundation Classes (IFC) format. Moreover, it enhances semantic interoperability among regional databases, software tools, and national standards, thereby ensuring that cost information is consistently shared and updated across diverse digital platforms.

Finally, it promotes transparency and traceability of data, as each cost item becomes a standardised data object whose definition, description, and updates are clearly documented [Jönsson, 2015]. This method involves standardising terminology related to regional features specific to certain construction techniques and local vocabulary. Instead of describing each item in isolation, reproducible knowledge patterns were identified that can be reused to organise homogeneous groups of items. This was a decisive step towards making the dictionary scalable and consistent, particularly when dealing with very extensive price lists and significant lexical variability, moving towards Linked Building Data (LBD) [Bonduel et al., 2018].

Conclusions

The research presented shows that digitising Regional Price Lists isn't just about converting lists of items into searchable formats; it requires semantic restructuring. The Price list shifts from a purely textual repository to a multi-level information infrastructure that integrates three levels: data exchange, shared definitions, and operational models that are computable, queryable, and controllable.

A comparison between DIGITALVISIO and PREZZARIO PIEGID highlights two complementary rather than alternative strategies. The Tuscan experience demonstrates the effectiveness of an operational ontology embedded directly within the BIM environment, where the discretisation of declarations, the parameterisation of attributes and the construction of IFC objects with dedicated property sets make it possible to render cost data readable. The piedmont experience, on the other hand, highlights the need to act upstream at a linguistic-conceptual level by reconstructing a controlled vocabulary that associates price list items with classes and relationships formalised in a data dictionary. The convergence of these two approaches suggests that the future development of digital price lists cannot be based on either purely object-oriented modelling or a single conceptual taxonomy, but rather on an infrastructure in which the BIM model and the semantic dictionary reinforce one another.

The results also enable more precise identification of outstanding issues. The first concerns the risk of information overload in the model, which is already evident when the need to maintain the descriptive richness of the price list results in extensive sets of customised properties. Without an appropriate balance between semantic granularity and operational usability, the model risks losing its readability, maintainability and controllability. The second critical issue concerns the lack of full standardisation of the economic domain within OpenBIM workflows: although the IFC ecosystem includes entities and relationships for cost management, their application to regional price lists and public valuation practices still requires shared mappings, consistent population rules and uniform validation criteria. The third critical issue, of a more strictly cultural and lexical nature, concerns the potential loss of regional terminological specificity. In this sense, overly rigid formalisation risks compromising the interpretation of the construction, as well as the technical and linguistic differences that constitute an essential component of knowledge regarding the local building heritage.

In conclusion, the analysed cases show that developing a national digital price list ecosystem requires more than standardising documentation; it must involve semantic and methodological convergence across regions. Standardisation shouldn't flatten local vocabularies but reorganise them

Palos, S. (2012). State-of-the-art analysis of product data definitions usage in BIM. In Martinez, M., Scherer, R. (Eds.) *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, pp. 397-403.

Pavan, A., Lupica Spagnolo, S., Caffi, V., Mirarchi, C., & Daniotti, B., 2020: National BIM Digital Platform for Construction (INNOVance Project). In Daniotti, B., Gianinetto, M., Della Torre, S., (eds.) *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment*, pp. 3–15, Cham (CH); Springer International Publishing.

Regione Piemonte. (2026). *Prezzario per Opere e Lavori pubblici 2026*.
https://prezzario.regione.piemonte.it/2026

Regione Toscana. (2026). *Prezzario dei Lavori 2026 della Toscana*.
https://www.regione.toscana.it/-/prezzario-dei-lavori-2026-della-toscana

Signorini, M,, Gatto, C., Cassandro, J., Pavan, A., & Lupica Spagnolo, S. (2025). Cost Efficiency in Buildings: An Ontological Perspective for Sustainable Life Cycle Management. *Sustainability*. 17(13):5685.
https://doi.org/10.3390/su17135685

within shared frameworks that preserve their differences while enabling comparability and interoperability. The goal isn't just to digitise traditional price lists but to create an environment where cost data is structured, traceable, and semantically governed throughout the construction processes.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the Tuscany Region and the Piedmont Region for supporting research and experimental activities on the digitalisation of regional construction price lists, carried out within the DIGITALVISIO and PREZZARIO GID - PIEGID projects, respectively.

Credits

Prof. M. Ricciarini is the author of the *Introduction* and *Conclusions*, F. Galasso is the author of *DIGITALVISIO BIM-based operative workflow*, E.C.Giovannini is the author of *An OpenBIM framework*, A. Tomalini is the author of *The PREZZARIO GID - PIEGID preliminary applicative scenario using AI*. *The buildingSMART Data Dictionary (bSDD), The Italian framework for digital Price Lists* and *A prototype workflow for the creation of the regionals bSDD* were written jointly by E.C.Giovannini and F. Galasso.

Autori

Email

Michele Zucco[1] michele.zucco@polito.it
Giulia Renata Morra[2] giuliarenata.morra@regione.piemonte.it
Matteo Del Giudice [3] matteo.delgiudice@polito.it

[1] Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG)
[2] Regione Piemonte, Settore Patrimonio immobiliare, beni mobili, economato, cassa economale e sicurezza ambienti di lavoro
[3] Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG)

Capitolato Informativo, HBIM, Pubblica Amministrazione. Sceneggiatura, Film, Regia

Exchange Information Requirements, HBIM, Public Administration. Script, Film, Direction.

Keywords

HBIM
EXCHANGE INFORMATION REQUIREMENTS (EIR)
PUBLIC ADMINISTRATION
INFORMATION REQUIREMENTS
INFORMATION REPRESENTATION

Abstract

Il contributo indaga il controllo pubblico delle consegne HBIM per il patrimonio costruito, assumendo il Capitolato Informativo come sceneggiatura, il modello come film digitale e la committenza come regia. Sul caso studio di Palazzo Cisterna a Biella, analizza requisiti, modello, nuvole di punti, indagini, documenti e ACDat. L'esito è un prototipo di protocollo lato PA per verificare completezza documentale, coerenza informativa, interoperabilità e riuso.

The paper investigates public control of HBIM deliverables for built heritage, framing the Information Requirements as the script, the model as the digital film, and the client as director. Through the case studio of Palazzo Cisterna in Biella, it analyses requirements, model, point clouds, surveys, documents, and the CDE. The outcome is a prototype protocol for Public Administration to verify documentary completeness, information consistency, interoperability, and reuse.

Introduzione.

La trasformazione digitale dei beni culturali prende avvio da una scelta di sguardo: come nel linguaggio cinematografico, prima del film esiste una sceneggiatura che seleziona ciò che entra in scena, stabilisce relazioni e orienta la comprensione dell'opera. Nel patrimonio costruito, tale scelta riguarda la costruzione della conoscenza: rilievi, fonti storiche, tracce materiali, indagini diagnostiche, elaborati grafici e dati digitali devono essere organizzati entro un sistema rappresentativo capace di sostenere tutela, conservazione, valorizzazione e gestione nel tempo. Nel dominio del Disegno, questa impostazione si collega alla linea teorica del "disegno come modello", che interpreta la rappresentazione come processo trasformativo e conoscitivo [Migliari, 2004].

In questa cornice, l'HBIM si configura come ambiente di rappresentazione e gestione della conoscenza per l'architettura storica. La letteratura italiana ha progressivamente orientato il modello digitale verso l'integrazione di geometria, struttura semantica, fonti documentali e finalità d'uso, interpretandolo come sistema cognitivo fondato sulla verificabilità delle ipotesi ricostruttive, come dispositivo per documentare e gestire il bene architettonico e come supporto operativo per organizzare apparati informativi multidisciplinari [Apollonio et al., 2013; Centofanti et al., 2016; Inzerillo et al., 2016]. La produzione di modelli HBIM implica tuttavia passaggi critici – acquisizione del dato metrico, costruzione parametrica, associazione documentale, rappresentazione del degrado e predisposizione allo scambio informativo – che richiedono decisioni interpretative esplicite, tracciabili e controllabili [Chiabrando et al., 2017].

Nel contesto italiano, tale esigenza assume rilievo specifico per la Pubblica Amministrazione (PA). La gestione informativa digitale entra nel procedimento pubblico attraverso scambi informativi, Capitolato Informativo (CI), Offerta di Gestione Informativa (oGI) e Piano di Gestione Informativa (pGI). Il CI esprime i requisiti informativi della Stazione Appaltante e deve mantenere coerenza con il Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP), il Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE) e il progetto esecutivo, configurandosi come strumento di regia della domanda informativa pubblica [D.Lgs. 36/2023 e s.m.i., art. 43; Allegati I.7 e I.9].

Il contributo assume quindi la metafora cinematografica come chiave metodologica: il CI come sceneggiatura, il modello HBIM come film digitale e la PA come regia del processo informativo. L'obiettivo del *paper* è dimostrare che, nelle commesse HBIM per il patrimonio costruito pubblico, la qualità della consegna dipende dalla capacità della committenza di dirigere il processo rappresentativo mediante requisiti espliciti, verifiche, evidenze e criteri di accettazione. Il caso di Palazzo Cisterna a Biella, promosso e gestito da Regione Piemonte, è assunto come banco di prova per analizzare il rapporto tra CI, modello HBIM, nuvole di punti, indagini, elaborati specialistici e ambiente di condivisione dei dati. Dall'analisi degli scarti tra sceneggiatura e film deriva una proposta di prototipo per controlli e raccomandazioni orientati a consegne HBIM verificabili, riusabili e governabili dalla PA.

Introduction

The digital transformation of cultural heritage begins with a choice of perspective: as in cinematic language, before the film there is a script that selects what enters the scene, establishes relationships, and guides the understanding of the work. In built heritage, this choice concerns the construction of knowledge: surveys, historical sources, material traces, diagnostic investigations, graphic drawings, and digital data must be organized within a representational system capable of supporting protection, conservation, enhancement, and long-term management. Within the field of Drawing and Representation, this approach relates to the theoretical line of "drawing as model," which interprets representation as a transformative and cognitive process [Migliari, 2004]. Within this framework, HBIM is configured as an environment for representing and managing knowledge related to historic architecture. Italian literature has progressively oriented the digital model towards the integration of geometry, semantic structure, documentary sources, and intended uses, interpreting it as a cognitive system based on the verifiability of reconstructive hypotheses, as a device for documenting and managing architectural heritage, and as an operational support for organizing multidisciplinary information systems [Apollonio et al., 2013; Centofanti et al., 2016; Inzerillo et al., 2016]. However, the production of HBIM models involves critical steps — metric data acquisition, parametric construction, documentary association, representation of decay, and preparation for information exchange — which require explicit, traceable, and controllable interpretative decisions [Chiabrando et al., 2017].

In the Italian context, this issue assumes specific relevance for Public Administration (PA). Digital information management enters the public procurement process through information exchanges, the *Capitolato Informativo* (CI, corresponding to the Exchange Information Requirements – EIR), the *offerta di Gestione Informativa* (oGI, comparable to the pre-appointment BIM Execution Plan – pre-appointment BEP), and the *piano di Gestione Informativa* (pGI, comparable to the post-appointment BIM Execution Plan – post-appointment BEP). The CI expresses the information requirements of the Contracting Authority and must remain consistent with the *Documento di Indirizzo alla Progettazione* (DIP, design guidance document), the *rogetto di Fattibilità Tecnico-Economica* (PFTE, technical and economic feasibility project), and the executive design, thus acting as a directing tool for the public information demand [D.Lgs. 36/2023, as amended and supplemented, art. 43; Annexes I.7 and I.9].

The paper therefore adopts the cinematic metaphor as a methodological key: the CI as the script, the HBIM model as the digital film, and the PA as the direction of the information process. The aim of the paper is to demonstrate that, in HBIM commissions for public built heritage, the quality of the deliverable depends on the client's ability to direct the representational process through explicit requirements, checks, evidence, and acceptance criteria. The case of Palazzo Cisterna in Biella, promoted and managed by Regione Piemonte, is used as a testbed to analyse the relationship between the CI, the HBIM model, point clouds, investigations, specialist drawings, and the Common Data Environment. From the analysis of the gaps between script and film, the paper derives a prototype proposal for controls and recommendations aimed at HBIM deliverables that are verifiable, reusable, and governable by the PA.

Metodologia: dalla sceneggiatura alle prove di regia.

Il contributo adotta un disegno metodologico qualitativo e interpretativo, fondato sull'analisi della commessa HBIM di Palazzo Cisterna a Biella. L'unità di analisi non coincide con il solo edificio storico, ma con il processo attraverso cui la Pubblica Amministrazione formula la domanda informativa, ne orienta la traduzione nel modello e verifica controllo, interoperabilità e riuso della consegna.

La procedura, sintetizzata in (Fig. 1), traduce la metafora cinematografica in cinque passaggi operativi. Il primo analizza il processo informativo di commessa, ricostruendo le relazioni tra CI, oGI, pGI, ACDat, Ambiente di Condivisioni dei Dati (ACDat), modello HBIM e documentazione prodotta, per comprendere come la domanda pubblica venga trasformata in istruzioni, contenuti digitali e consegne. Il secondo passaggio individua Palazzo Cisterna come banco di prova reale, utile a osservare lo scarto tra prescrizioni informative, pratiche di modellazione, documenti caricati in ACDat e condizioni effettive di verifica. Il terzo riguarda la lettura critica documentale del *corpus*, composto da CI, DIP, linee guida BIM regionali, pGI, elaborati grafici, nuvole di punti, modello HBIM in formato nativo e aperto e contenuti dell'ACDat, con riferimento alla fase di PFTE e al quadro del Codice dei contratti pubblici [D.Lgs. 36/2023 e s.m.i., art. 43; Allegati I.7 e I.9]. Il quarto passaggio identifica requisiti e verifiche: i contenuti prescrittivi vengono estratti, normalizzati e ricondotti a controlli osservabili, associando a ciascun requisito una modalità di verifica e un'evidenza attesa. Il quinto propone un prototipo di protocollo lato PA, articolato in due ambiti: completezza documentale e modellazione informativa. Il primo verifica corrispondenza, tracciabilità e coerenza dei documenti; il secondo valuta struttura geometrica e semantica del modello, relazione con le fonti, qualità degli attributi, scambio aperto e riusabilità.

La metodologia definisce così il percorso attraverso cui la sceneggiatura informativa della PA diventa base per verificare il film HBIM e costruire strumenti di controllo replicabili nelle commesse pubbliche.

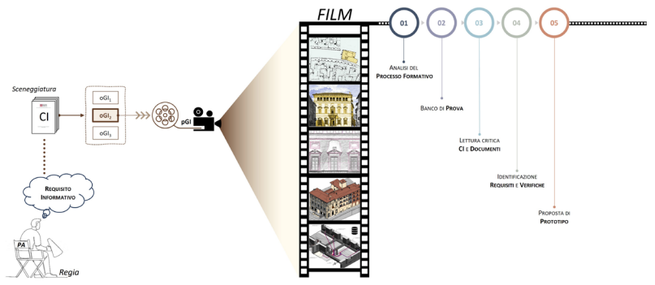


Fig. 1: Schema metodologico della ricerca: dal processo informativo di commessa all'identificazione di requisiti, verifiche ed evidenze per un prototipo di protocollo lato PA.

Fig. 1: Methodological framework of the research: from the information process of the commission to the identification of requirements, checks, and evidence for a prototype protocol on the Public Administration side.

Methodology: From the Script to Directing Checks

The paper adopts a qualitative and interpretative methodological design, based on the analysis of the HBIM commission for Palazzo Cisterna in Biella. The unit of analysis is not limited to the historic building itself, but concerns the process through which Public Administration formulates the information demand, guides its translation into the model, and verifies the control, interoperability, and reuse conditions of the deliverable. The procedure, summarized in Fig. 1, translates the cinematic metaphor into five operational steps. The first analyses the information process of the commission by reconstructing the relationships among the CI, oGI, pGI, ACDat, HBIM model, and produced documentation, in order to understand how the public information demand is transformed into instructions, digital contents, and deliverables. The second step identifies Palazzo Cisterna as a real testbed, useful for observing the gap

Il banco di prova: Palazzo Cisterna a Biella

Il caso studio è la commessa pubblica di restauro, risanamento conservativo e rifunzionalizzazione di Palazzo Cisterna a Biella, promossa da Regione Piemonte. Il complesso costituisce il *set* operativo della ricerca, in cui osservare il rapporto tra sceneggiatura informativa, regia pubblica e modello HBIM. Il suo inquadramento territoriale e urbano permette di collocare l'intervento nel sistema storico della città e nel patrimonio pubblico regionale (Fig. 2).



Fig. 2: Inquadramento territoriale, urbano e documentale di Palazzo Cisterna a Biella.

Fig. 2: Territorial, urban, and documentary framing of Palazzo Cisterna in Biella.

L'edificio è destinato a ospitare una sede dell'Agenzia Piemonte Lavoro, un *hub* per le PA locali, una caffetteria, spazi polivalenti, una foresteria e spazi di incontro per studenti fuori sede. La compresenza di funzioni pubbliche, usi aperti alla cittadinanza, esigenze conservative, adeguamenti impiantistici e fasi attuative distinte rende il caso particolarmente efficace per discutere la rappresentazione informativa come strumento di coordinamento. Tale complessità (Fig. 3) emerge anche dalla scomposizione del complesso per destinazioni d'uso, lotti di intervento e fonti di finanziamento, che evidenzia la necessità di governare il progetto attraverso una struttura informativa coerente e verificabile.

La scelta della modellazione informativa assume quindi un preciso valore metodologico. Nella gara per l'affidamento delle attività professionali, il BIM è stato previsto come requisito premiante nell'ambito dell'offerta economicamente più vantaggiosa. Il primo atto di regia è coinciso con il CI allegato al DIP, nel quale i capisaldi già sperimentati con il Politecnico di Torino sono stati ricalibrati sulle specificità dell'intervento storico.

Dopo l'individuazione dei professionisti, il pGI ha avviato un confronto sui livelli di sviluppo e sul *Level of Information Need*, orientato dalla committenza verso un equilibrio tra completezza

between information requirements, modelling practices, documents uploaded to the *Ambiente di Condivisione dei Dati* (ACDat, Common Data Environment – CDE), and the actual conditions of verification. The third step concerns the critical documentary reading of the *corpus*, composed of the CI, DIP, regional BIM guidelines, pGI, graphic drawings, point clouds, the HBIM model in native and open formats, and the contents of the CDE with reference to the PFTE phase and to the framework of the Public Contracts Code [D.Lgs. 36/2023, as amended and supplemented, art. 43; Annexes I.7 and I.9]. The fourth step identifies requirements and checks: prescriptive contents are extracted, normalized, and translated into observable controls, associating each requirement with a verification method and expected evidence. The fifth step proposes a prototype protocol for Public Administration, structured around two areas: documentary completeness and information modelling. The first verifies document correspondence, traceability, and consistency; the second assesses the geometric and semantic structure of the model, its relationship with sources, attribute quality, open exchange, and reusability. The methodology thus defines the path through which the public information script becomes the basis for verifying the HBIM film

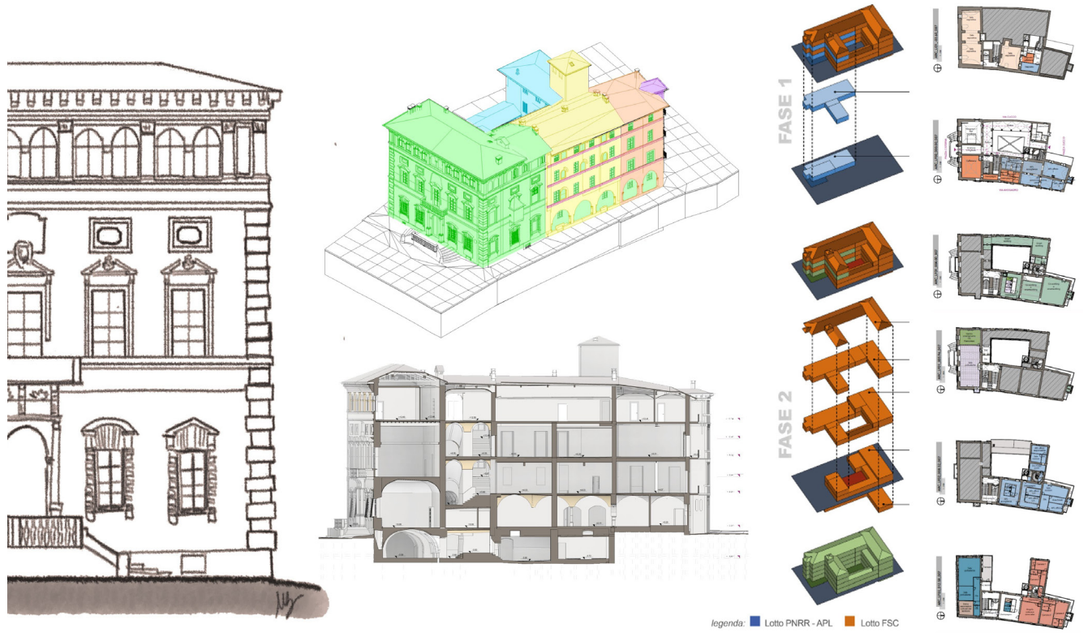


Fig. 3: Scomposizione di Palazzo Cisterna per destinazioni d'uso, lotti di intervento e fonti di finanziamento.

Fig. 3: Decomposition of Palazzo Cisterna by intended uses, intervention lots, and funding sources.

del modello e reale utilità delle informazioni. Il livello geometrico è stato calibrato sugli usi previsti: edifici circostanti semplificati per le verifiche di ombreggiamento, accessi e piazza retrostante modellati per la gestione del cantiere, maggiore dettaglio nei casi richiesti da approfondimenti progettuali o autorizzativi. Anche i parametri informativi sono stati selezionati secondo una logica di completezza e sostenibilità gestionale. Il PFTE rappresenta, in questo senso, il primo momento di traduzione operativa del quadro conoscitivo in un modello informativo articolato (Fig. 4), capace di mettere in relazione rilievo, assetto spaziale, componenti tecniche e scelte progettuali.

Il valore conoscitivo del caso è legato anche al rilievo dell'esistente, alla campagna di indagini, al quadro fessurativo e alla mappatura del degrado. Gli impianti esistenti, obsoleti e destinati alla dismissione, sono stati modellati in forma semplificata, mentre maggiore cura è stata riservata agli impianti di progetto. Il modello si configura così come archivio della conoscenza: gli elementi costruttivi incorporano informazioni sulle indagini, collegamenti documentali e *marker* localizzati dei campionamenti. Palazzo Cisterna consente quindi di osservare il passaggio dalla rappresentazione grafica alla rappresentazione informativa, attribuendo al dato conoscitivo un ruolo operativo nella conservazione e nella futura gestione. La regia della committenza emerge nelle consegne intermedie, usate come momenti di controllo tra requisiti, modello e obiettivi della commessa. Le revisioni hanno verificato sia la coerenza geometrica rispetto alla nuvola di punti, sia la componente informativa, con particolare attenzione alla tracciabilità delle indagini e ai collegamenti documentali. Questa impostazione sostiene

and for building replicable control tools for public commissions.

The Testbed: Palazzo Cisterna in Biella

The case study is the public commission for the restoration, conservative renovation, and functional reuse of Palazzo Cisterna in Biella, promoted by Regione Piemonte. The complex constitutes the operational set of the research, where the relationship between the information script, public direction, and the HBIM model can be observed. Its territorial and urban framing makes it possible to situate the intervention within the historical system of the city and within the regional public heritage (Fig. 2).

The building is intended to host a branch of the *Agenzia Piemonte Lavoro* (APL, Regional Public Employment Agency), a hub for local Public Administrations, a café, multipurpose spaces, guest accommodation, and meeting areas for non-resident students. The coexistence of public functions, citizen-oriented uses, conservation requirements, building-services upgrades, and distinct im-

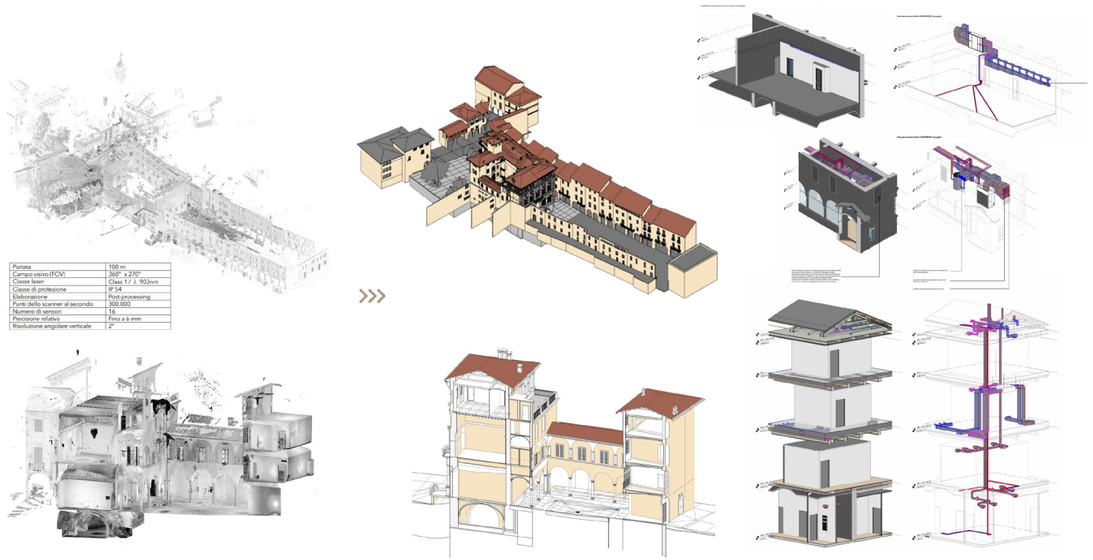


Fig. 4: Elaborati estratti dal Progetto PFTE di Palazzo Cisterna: dal rilievo dell'esistente alla modellazione informativa del complesso.

Fig. 4: Drawings extracted from the PFTE of Palazzo Cisterna: from the survey of the existing building to the information modelling of the complex.

l'interoperabilità: le informazioni vengono strutturate nel modello come dati riconoscibili, esportabili in IFC e riutilizzabili fuori dall'ambiente autore. L'ACDat ha organizzato modelli, elaborati e documenti di commessa, pur evidenziando criticità operative negli enti autorizzativi, non sempre preparati alla gestione di consegne HBIM.

Nel complesso, Palazzo Cisterna si configura come banco di prova significativo per la trasformazione digitale del patrimonio pubblico, poiché concentra rilievo, HBIM, indagini diagnostiche, interoperabilità, ambiente di condivisione dati, verifiche intermedie e revisione progressiva dei requisiti. La sezione successiva approfondisce gli scarti tra prescrizioni e consegne come discontinuità tra sceneggiatura informativa e film HBIM.

Risultati e discussione: La regia digitale della continuità informativa

L'applicazione della matrice di verifica al *corpus* di commessa consente di leggere le discordanze emerse come errori di continuità informativa tra sceneggiatura e film. Nel processo HBIM, la discontinuità si manifesta quando un requisito previsto dal Capitolato Informativo perde stabilità nella consegna, quando un'informazione resta confinata all'elaborato grafico, quando il collegamento con la fonte documentale si indebolisce nel modello, oppure quando il pacchetto finale limita interrogabilità, esportazione e riuso. La lettura integrata dei materiali riconduce tali criticità a due famiglie di controllo: completezza documentale e modellazione informativa.

La completezza documentale riguarda gli elaborati e i documenti che rendono verificabile il procedimento. Nel processo HBIM pubblico, la documentazione esplicita le condizioni di produzione, consente il controllo da parte della Stazione Appaltante e accompagna il passaggio del modello verso le fasi successive. Tra gli *output* standardizzabili rientrano la Relazione specialistica sulla modellazione informativa (a consuntivo), la coerenza tra modello ed elaborati, l'integrazione con PSC e cantiere, il computo, il cronoprogramma, il piano preliminare di manutenzione, il rilievo e il piano di chiusura delle criticità. In particolare, la relazione specialistica assume il valore di documento di regia a posteriori, poiché descrive struttura del modello, scelte adottate, *workset*, logiche di consegna e informazioni utili a verificatori, impresa e proprietà.

La seconda famiglia riguarda la modellazione informativa. Le criticità osservate interessano coerenza metrica rispetto alla nuvola di punti, pulizia della consegna, uso dei parametri condivisi, *naming*, coerenza tipologico-semantica degli oggetti, gestione degli elementi complessi, indagini, quadro fessurativo, neutralità commerciale e predisposizione allo scambio aperto. Il rapporto tra rilievo e modello rappresenta un primo nodo di verifica: la nuvola di punti costituisce la base per controllare la coerenza metrica, mentre le consegne intermedie permettono di rilevare difformità, omissioni o lacune di modellazione. Un secondo nodo riguarda la riusabilità del file, legata a viste, famiglie, *workset*, materiali, parametri e *naming*. Un terzo nodo concerne gli elementi complessi del patrimonio storico, che possono essere modellati in forma sintetica purché la scelta sia dichiarata, documentata e collegata alle fonti.

Il risultato più rilevante riguarda le indagini conoscitive. Prove, saggi, campionamenti, quadro fessurativo e mappature del degrado devono passare dalla scena grafica al dato interrogabile. Come mostrato in (Fig. 5), il processo HBIM richiede *marker* identificativi, parametri e collegamenti documentali, affinché l'indagine diventi un oggetto informativo capace di conservare posizione, attributo e fonte. La stessa logica riguarda degradi e fessurazioni, che devono essere classificabili, interrogabili, collegabili a immagini o schede ed esportabili in IFC.

La discussione dei risultati mostra che la qualità HBIM non può essere valutata solo come correttezza del modello, ma come coerenza tra usi previsti, fasi del progetto e contenuti effettivamente verificabili. Per questo motivo, gli usi del modello devono essere letti in relazione alle fasi del procedimento, dalla pianificazione al PFTE, fino agli sviluppi successivi verso esecuzione, collaudo e gestione. La relazione tra *model uses* e fasi progettuali consente di chiarire quali informazioni siano necessarie, quando debbano essere prodotte, con quale livello di dettaglio e attraverso quali evidenze di controllo (Fig. 6).

Le incongruenze rilevate tra requisiti, modello, nuvola di punti, elaborati e documenti specialistici mostrano quindi il punto critico della regia pubblica: ogni prescrizione deve poter essere trasformata in un controllo osservabile. La tabella delle incongruenze (Fig.7) consente di rendere espliciti gli scarti tra quanto richiesto e quanto consegnato, distinguendo errori geometrici, debolezze informative, mancate corrispondenze documentali e limiti di interoperabilità.

L'interoperabilità rappresenta il montaggio finale della consegna. L'IFC verifica la capacità del modello di mantenere leggibili oggetti, attributi e relazioni fuori dall'ambiente autore; l'ACDaT organizza pubblicazione, *versioning*, tracciabilità documentale e accesso ai file. Il controllo risulta efficace quando produce un'evidenza verificabile: link funzionanti, oggetti pre-

plementation phases makes the case particularly effective for discussing information representation as a coordination tool. This complexity (Fig. 3) also emerges from the decomposition of the complex by intended uses, intervention lots, and funding sources, highlighting the need to govern the project through a coherent and verifiable information structure.

The choice of information modelling therefore assumes a specific methodological value. In the tender for the award of professional services, BIM was included as a rewarding requirement within the most economically advantageous tender.

The first act of direction coincided with the CI attached to the DIP, in which the principles already tested with Politecnico di Torino were recalibrated according to the specificities of the intervention on a historic building.

After the appointment of the professionals, the pGI opened a discussion on levels of development and on the Level of Information Need, guided by the client towards a balance between model completeness and the actual usefulness of information.

The geometric level was calibrated according to the intended uses: simplified modelling of surrounding buildings for shadow analysis, modelling of access routes and the rear square for construction-site management, and greater detail where required by design or authorization procedures. Information parameters were also selected according to a logic of completeness and management sustainability. In this sense, the PFTE represents the first stage in which the knowledge framework is operationally translated into an articulated information model (Fig. 4), capable of relating survey data, spatial layout, technical components, and design choices.

The knowledge value of the case is also linked to the survey of the existing building, the investigation campaign, the crack pattern, and the mapping of decay. The existing building systems, obsolete and intended for removal, were modelled in simplified form, while greater attention was given to the proposed systems.

The model is thus configured as a knowledge archive: construction elements incorporate information on investigations, documentary links, and localized sampling markers. Palazzo Cisterna therefore makes it possible to observe the transition from graphic representation to information representation, assigning operational value to knowledge data for conservation and future management. The client's direction emerges in the intermediate deliverables, used as control moments between requirements, model, and project objectives. The reviews checked both geometric consistency against the point cloud and the information component, with particular attention to the traceability of investigations and documentary links.

This approach supports interoperability: information is structured in the model as recognizable data, exportable in IFC and reusable outside the authoring environment. .The CDE organized models, drawings, and project documents, while also revealing operational criticalities within the authorization bodies involved, which were not always fully prepared to manage HBIM deliverables.

Overall, Palazzo Cisterna represents a significant testbed for the digital transformation of public heritage, as it brings together survey, HBIM, diagnostic investigations, interoperability, the CDE, intermediate checks, and the progressive revision of requirements.

The following section examines the gaps between requirements and deliverables as discontinuities between the information script and the HBIM film.

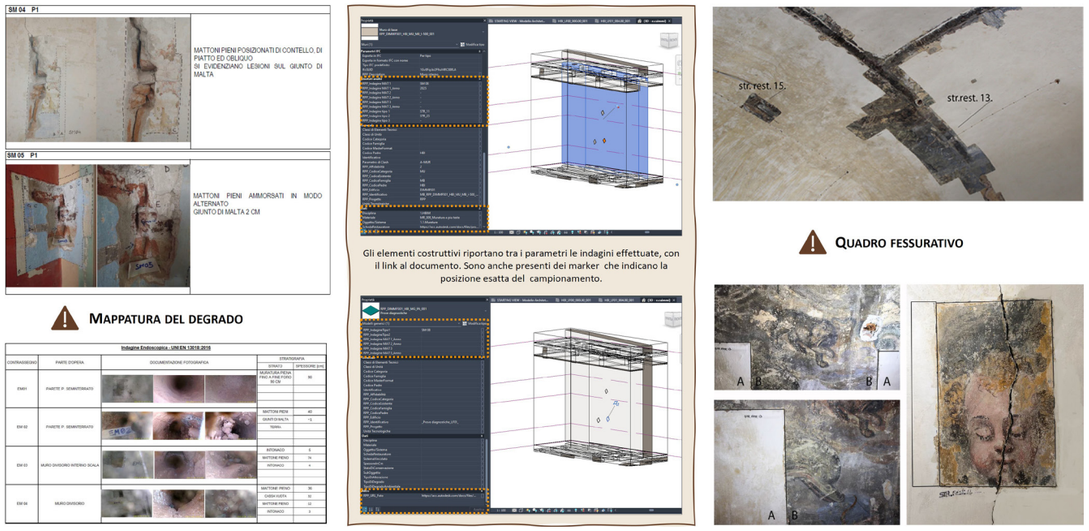


Fig. 5: Individuazione delle indagini nel modello HBIM: marker di campionamento, parametri informativi, collegamenti documentali, mappatura del degrado e quadro fessurativo.

Fig. 5: Identification of investigations in the HBIM model: sampling markers, information parameters, documentary links, decay mapping, and crack pattern.

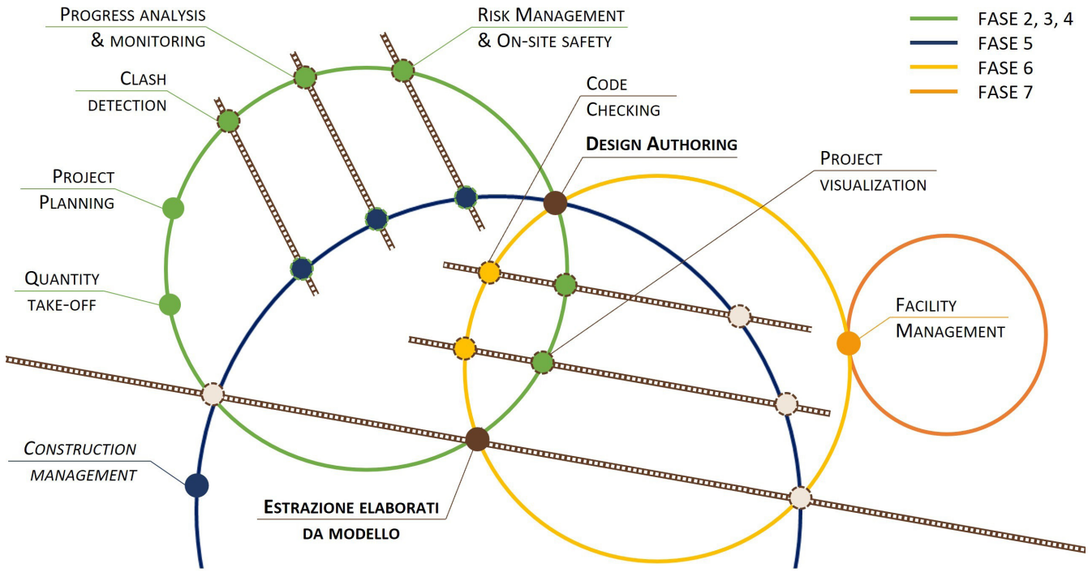


Fig. 6: Interazione tra usi del modello e fasi del progetto: dalla pianificazione alla gestione del bene.

Fig. 6: Interaction between model uses and project phases: from planning to asset management.

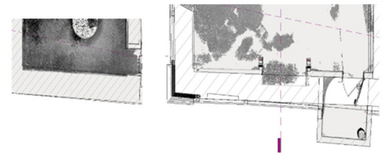
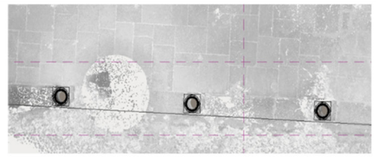
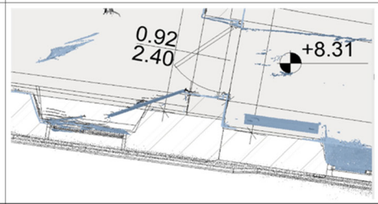
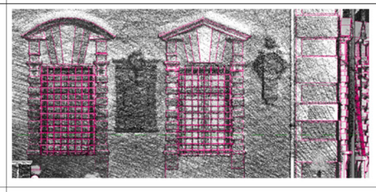
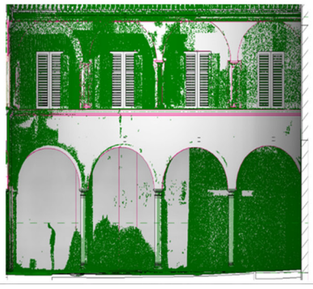
PIANO	SCREENSHOT	MANCATA CORRISPONDENZA TRA NUVOLA DI PUNTI E MODELLO
Su tutti i piani		Muro lato via Avogadro, differenza 20 cm circa
PT		Posizione colonne, differenza 10 cm circa
P1 e P2		Rappresentazione di piego nella muratura non corrispondente al allineamento nuvola di punti
Prospetto Sud		Verificare corrispondenza forma nicchia sopra finestra centrale Inoltre: in questa versione del file, le due finestre centrali sono ancora degli infissi, che in realtà non esistono perché è un dipinto trompe-l'oeil Inserire dei volumi semplificati come segnaposto delle sculture e dello stemma sopra i timpani, con un link URL alla foto
Prospetto Sud		Modellare la lapide Inserire un volume segnaposto per l'orologio, con un link URL alla foto
Corte interna		La discrepanza rilevata in pianta sulle colonne, si osserva anche nella vista della corte interna, con riferimento pure alle arcate

Fig. 7: Incongruenze rilevate tra nuvola di punti, modello HBIM e requisiti di commessa.

Fig. 7: Inconsistencies identified among point cloud, HBIM model, and project requirements.

senti nell'IFC, abachi, *screenshot* di parametri, relazioni specialistiche e *issue log* chiusi.

Da questa sequenza deriva il nucleo del protocollo PA: trasformare gli scarti tra Capitolato Informativo e consegna HBIM in controlli standardizzabili. Il passaggio dalla singola osservazione al protocollo avviene attraverso la classificazione delle criticità e la loro associazione a requisiti, verifiche, evidenze minime ed esiti del controllo. In questa prospettiva (Fig. 8), le due *checklist* proposte – completezza documentale e modellazione informativa – costituiscono il primo nucleo di un processo replicabile per le commesse HBIM sul patrimonio pubblico.

Il film HBIM raggiunge una qualità governabile quando ogni scena informativa prevista dalla sceneggiatura trova una corrispondenza verificabile nel modello, negli elaborati, nell'ACDat o negli *export*. La regia pubblica agisce attraverso la costruzione di questa corrispondenza, trasformando la consegna da prodotto tecnico a patrimonio informativo controllabile, trasferibile e riusabile.

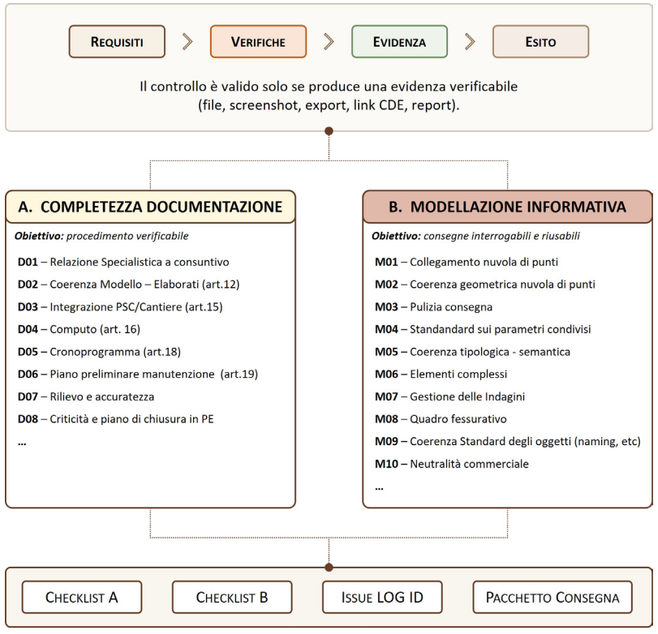


Fig. 8: Proposta di processo per il prototipo di protocollo PA: requisiti, verifiche, evidenze ed esiti del controllo.

Fig. 8: Proposed process for the PA protocol prototype: requirements, checks, evidence, and control outcomes.

Conclusioni

Il contributo evidenzia il ruolo della PA nel controllo delle consegne HBIM applicate al patrimonio costruito. Il caso di Palazzo Cisterna mostra che la qualità del modello non può essere valutata solo in termini geometrici o informativi, ma deve essere verificata rispetto alla coerenza tra requisiti del CI, contenuti consegnati, evidenze prodotte e possibilità di riuso. Il protocollo

Results and Discussion: The Digital Direction of Information Continuity

The application of the verification matrix to the project *corpus* makes it possible to read the identified discrepancies as errors of information continuity between script and film. In the HBIM process, discontinuity occurs when a requirement set out in the Information Requirements loses stability in the deliverable, when information remains confined to the graphic drawing, when the link with the documentary source becomes weak in the model, or when the final package limits queryability, export, and reuse. The integrated reading of the materials traces these critical issues back to two families of control: documentary completeness and information modelling.

Documentary completeness concerns the drawings and documents that make the procedure verifiable. In a public HBIM process, documentation clarifies production conditions, enables control by the Contracting Authority, and supports the transition of the model towards subsequent phases. Standardizable outputs include the *Relazione specialistica sulla modellazione informativa* (specialist report on information modelling, issued at completion), the consistency between model and drawings, integration with the Health and Safety Plan and construction-site requirements, cost estimate, schedule, preliminary maintenance plan, survey, and critical-issue closure plan. In particular, the specialist report assumes the value of a retrospective directing document, as it describes the model structure, adopted choices, worksets, delivery logics, and information useful to verifiers, contractors, and the property owner.

The second family concerns information modelling. The observed criticalities involve metric consistency with the point cloud, cleanliness of the deliverable, use of shared parameters, naming, typological-semantic consistency of objects, management of complex elements, investigations, crack pattern, commercial neutrality, and readiness for open exchange. The relationship between survey and model represents a first verification node: the point cloud provides the basis for checking metric consistency, while intermediate deliverables make it possible to identify discrepancies, omissions, or modelling gaps. A second node concerns file reusability, linked to views, families, worksets, materials, parameters, and naming. A third node concerns the complex elements of historic heritage, which may be modelled in synthetic form provided that the choice is declared, documented, and linked to sources. The most relevant result concerns knowledge investigations. Tests, exploratory probes, sampling, crack patterns, and decay mappings must move from the graphic scene to queryable data. As shown in Fig. 5, the HBIM process requires identification markers, parameters, and documentary links, enabling each investigation to become an information object capable of preserving its position, attributes, and source. The same logic applies to decay and cracks, which must be classifiable, queryable, linkable to images or sheets, and exportable in IFC. The discussion of the results shows that HBIM quality cannot be assessed only in terms of model correctness, but must be understood as consistency between intended uses, project phases, and effectively verifiable contents. For this reason, model uses must be read in relation to the phases of the procedure, from planning to PFTE, up to subsequent developments towards execution, testing, and management. The relationship between model uses and project phases makes it possible to clarify which information is needed, when it must be produced, with what level of detail, and through which control evidence (Fig. 6).

The inconsistencies identified among requirements, model, point cloud, drawings, and specialist documents highlight the critical point of public direction: each requirement must be translatable into an observable control. The inconsistency table (Fig. 7) makes the gaps between what was required and what was delivered explicit, distinguishing geometric errors, information weaknesses, documentary mismatches, and interoperability limits.

Interoperability represents the final editing stage of the deliverable. IFC verifies the model's ability to keep objects, attributes, and relationships readable outside the authoring environment; CDE organizes publication, versioning, documentary traceability, and file access. Control is effective when it produces verifiable evidence: functioning links, objects present in the IFC, schedules, parameter screenshots, specialist reports, and closed issue logs.

proposto costituisce un primo strumento operativo per rendere tale verifica tracciabile, distinguendo tra completezza documentale e modellazione informativa. Il primo ambito riguarda la consistenza degli elaborati e la tracciabilità del procedimento; il secondo considera struttura del modello, collegamenti alle fonti, interoperabilità e qualità degli attributi. I limiti del lavoro riguardano il caso singolo e la fase progettuale analizzata. Il protocollo dovrà essere testato su altri beni e fasi del ciclo di vita. Senza regia, l'HBIM resta una ripresa del patrimonio; con la regia, diventa il film del patrimonio governabile.

Ringraziamenti

Si ringrazia Regione Piemonte per il caso studio di Palazzo Cisterna. Tutti gli autori hanno condiviso impostazione e revisione del contributo: M.Z. ha redatto i paragrafi 1, 2 e 4; G.R.M. il paragrafo 3; M.d.G. il paragrafo 5.

Bibliografia

Apollonio, F. I., Gaiani, M., & Sun, Z. (2013). 3D Modeling and Data Enrichment in Digital Reconstruction of Architectural Heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W2, 43–48.

Centofanti, M., Brusaporci, S., & Maiezza, P. (2016). Tra "Historical BIM" ed "Heritage BIM": Building Information Modeling per la documentazione dei beni architettonici. In *ReUSO 2016*.

Chiabrando, F., Lo Turco, M., & Rinaudo, F. (2017). Modeling the decay in an HBIM starting from 3D point clouds. A followed approach for cultural heritage knowledge. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W5, 605–612.

Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36 e s.m.i. *Codice dei contratti pubblici in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie generale*, n. 77, Supplemento ordinario n. 12/L, 31 marzo 2023.

Inzerillo, L., Lo Turco, M., Parrinello, S., Santagati, C., & Valenti, G. M. (2016). BIM and architectural heritage: towards an operational methodology for the knowledge and the management of Cultural Heritage. *DISEGNARECON*, 9(16).

Migliari, R. (a cura di) (2004). *Disegno come modello. Riflessioni sul disegno nell'era informatica*. Roma: Edizioni Kappa.

From this sequence derives the core of the PA protocol: transforming the gaps between the CI and the HBIM deliverable into standardizable controls. The transition from individual observation to protocol occurs through the classification of critical issues and their association with requirements, checks, minimum evidence, and control outcomes. In this perspective (Fig. 8), the two proposed checklists — documentary completeness and information modelling — constitute the first core of a replicable process for HBIM commissions on public heritage.

The HBIM film achieves governable quality when each information scene defined by the script finds a verifiable correspondence in the model, drawings, CDE, or exports. Public direction operates through the construction of this correspondence, transforming the deliverable from a technical product into controllable, transferable, and reusable information heritage.

Conclusions

The paper highlights the role of PA in controlling HBIM deliverables applied to built heritage. The case of Palazzo Cisterna shows that model quality cannot be assessed only in geometric or informational terms, but must be verified against the consistency between CI requirements, delivered contents, produced evidence, and reuse potential. The proposed protocol constitutes a first operational tool to make this verification traceable, distinguishing between documentary completeness and information modelling. The first area concerns the consistency of drawings and procedural traceability; the second considers model structure, links to sources, interoperability, and attribute quality. The limits of the work concern the single case study and the project phase analysed. The protocol will need to be tested on other assets and lifecycle phases. Without direction, HBIM remains a recording of heritage; with direction, it becomes the film of governable heritage.

Acknowledgement

Regione Piemonte is gratefully acknowledged for providing the Palazzo Cisterna case study. All authors contributed to the scientific framework and revision of the paper: M.Z. wrote Sections 1, 2, and 4; G.R.M. wrote Section 3; M.d.G. wrote Section 5.

Autori

Annapaola Villano[1]
Francesca Cremasco [2]

Email

annapaola.villano@sinergospa.com
francesca.cremasco@sinergospa.com

[1] BIM Manager e BIM Coordinator Sinergo Spa

[2] Direttore Tecnico, Responsabile Settore Architettura Sinergo Spa

La modellazione informativa di Palazzo Carcano a Trani. Processo e metodologia BIM applicata alla conoscenza della fabbrica

Information Modelling of Palazzo Carcano in Trani. BIM Process and Methodology Applied to the Understanding of the Building Fabric

Keywords

HBIM
CONSERVATION
KNOWLEDGE-BASED MODELLING
MATERIAL ANALYSIS
DECAY ANALYSIS

Abstract

Il contributo illustra il processo di costruzione e implementazione del modello HBIM di Palazzo Carcano a Trani. Attraverso un approccio *data-driven*, fondato sull'interoperabilità tra dati digitali di rilievo, analisi storico-critiche, mappatura delle indagini per il conseguimento del livello di conoscenza LC3, caratterizzazione materica e analisi dei fenomeni di degrado, il modello integra informazioni geometriche e semantiche in un ambiente interoperabile a supporto dei processi progettuali, di pianificazione e gestione.

The paper illustrates the development and implementation process of the HBIM model of Palazzo Carcano in Trani. Through a data-driven approach, based on the interoperability of digital survey data, historical-critical analyses and investigation mapping aimed at achieving the LC3 level of knowledge, material characterization, and deterioration analysis, the model integrates geometric and semantic information within an interoperable environment supporting design processes, planning, and management.

Introduzione

Palazzo Carcano è un edificio seicentesco nel centro storico di Trani, la cui proprietà è stata trasferita dal Comune allo Stato nel 2018. L'Agenzia del Demanio – Direzione Territoriale Puglia e Basilicata (di seguito ADD) ha bandito nel 2021 il concorso per la sua riqualificazione, destinandolo ad Uffici Giudiziari.

Oggi, a valle delle fasi progettuali e autorizzative e a seguito della restituzione in ambiente HBIM, l'edificio si appresta ad essere oggetto di intervento. L'HBIM è oggi riconosciuto come l'evoluzione del BIM per il patrimonio storico, finalizzato all'integrazione di dati geometrici, documentali e semantici all'interno di un modello informativo unico. [Murphy et al., 2009; Murphy et al., 2013] Il palazzo presenta un impianto a corte centrale, un'estensione di circa 4.500 m² e si sviluppa su tre piani fuori terra. La configurazione planimetrica evidenzia una volumetria compatta ma articolata, esito di stratificazioni succedutesi nel tempo. L'area esterna, di circa 1.000 m², comprende la corte interna e gli affacci sulla Piazza Re Manfredi e sul Castello Svevo. La porzione d'angolo nord presenta un significativo interesse archeologico, attestato da evidenze riconducibili all'epoca medievale.

L'edificio è caratterizzato da una struttura portante mista in muratura e pietra locale: il piano terra conserva ambienti voltati coerenti con l'impianto originario, mentre i livelli superiori risultano significativamente alterati da interventi più recenti.

Internamente, il fabbricato si presenta in gran parte al grezzo, in seguito a un intervento di ristrutturazione avviato nel 2004 e successivamente interrotto a seguito dei rinvenimenti archeologici, approfonditi mediante una campagna di scavi condotta nel 2006.

Nell'ottica della sua integrazione nel complesso del Tribunale di Trani, l'ADD ha promosso una articolata campagna di indagini, finalizzata alla definizione di un quadro conoscitivo quanto più possibile completo, comprensiva anche di indagini *georadar* per la localizzazione di strutture sepolte.

Informare il modello HBIM: rilievo digitale, analisi e costruzione del modello informativo

Le prime attività progettuali sono state incentrate sull'analisi storico-critica basata sulla raccolta e sull'analisi della documentazione archivistica, sullo studio delle indagini disponibili e sull'implementazione di ulteriori indagini conoscitive per raggiungere il livello di conoscenza LC3 (Fig. 1) secondo quanto previsto dalle NTC 2018.

La progettazione si è avvalsa della metodologia BIM a partire dalla restituzione del rilievo digitale. Il processo si è articolato in due distinte macrofasi: una prima fase, finalizzata alla ricostruzione geometrica dell'edificio, sviluppata secondo un livello di dettaglio coerente con lo stato di fatto e accompagnata da una preliminare classificazione delle componenti costruttive; una seconda fase, orientata all'implementazione informativa delle geometrie, fondata sull'integrazione dei dati derivanti dalle indagini e sulla conseguente valorizzazione dei parametri definiti nei documenti BIMMS e BIMSM dell'Agenzia del Demanio, assimilabili al Capitolato Informativo.

L'attività è stata condotta per raggiungere un LOIN adeguato alla fase esecutiva e idoneo a costituire una base informativa strutturata e interoperabile per le successive fasi di cantierizzazione, costruzione e gestione (Fig. 2).

Modellazione e parametrizzazione si configurano come esiti di un processo iterativo di *knowledge-based modelling*, all'interno del quale il modello si qualifica quale ambiente integrato per la strutturazione, la correlazione e la verifica progressiva delle informazioni,

Introduction

Palazzo Carcano is a 17th-century building located in the historic center of Trani, whose ownership was transferred from the Municipality to the State in 2018. In 2021, the Italian State Property Agency – Puglia and Basilicata Regional Directorate (hereinafter ADD) launched a competition for its redevelopment, designating it for judicial offices.

Currently, following the completion of the design and authorization phases and its restitution within an HBIM environment, the building is about to undergo intervention. HBIM is currently recognized as the evolution of BIM for historic heritage, aimed at integrating geometric, documentary, and semantic data within a single information model. [Murphy et al., 2009; Murphy et al., 2013]

The palace features a central courtyard layout, with an overall surface area of approximately 4,500 m², and is developed over three above-ground levels. The planimetric configuration reveals a compact yet articulated volumetry, resulting from successive historical stratifications.

The external area, extending over approximately 1,000 m², includes the inner courtyard and elevations overlooking Piazza Re Manfredi and the Swabian Castle.

The north corner portion exhibits significant archaeological interest, supported by evidence dating back to the medieval period.

The building is cwharacterized by a mixed load-bearing structure composed of masonry and local stone: the ground floor preserves vaulted spaces consistent with the original layout, while the upper levels have been significantly altered by more recent interventions.

Internally, the building largely remains in an unfinished state, following a renovation project initiated in 2004 and subsequently halted after archaeological discoveries, which were further investigated through an excavation campaign conducted in 2006.

With a view to its integration into the Trani Courthouse complex, the ADD has promoted an extensive investigation campaign aimed at defining a comprehensive knowledge framework, including georadar surveys for the detection of buried structures.

HBIM Model Enrichment: Digital Survey, Analysis, and Information Model Development

The initial design activities focused on historical-critical analysis based on the



Fig. 1: Rilievo e ricostruzione delle evidenze archeologiche sulla base delle indagini conoscitive.

Fig. 1: Survey and Reconstruction of Archaeological evidence derived from diagnostic investigations.

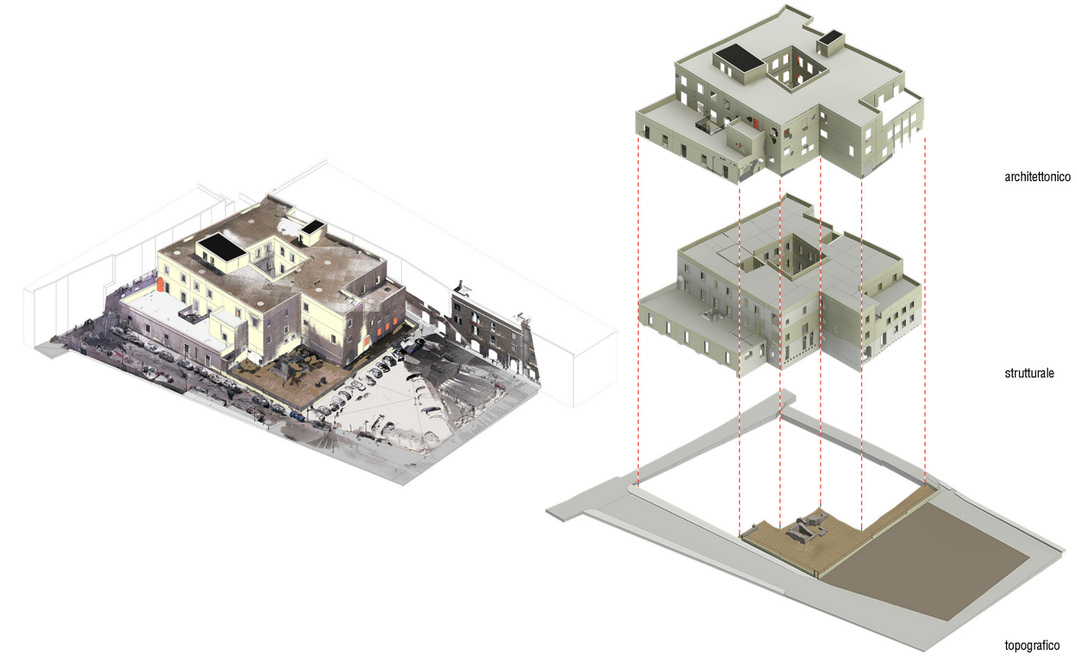


Fig. 2: Modellazione disciplinare As-Is su nuvola di punti: topografica, strutturale, architettonica..

Fig. 2: Discipline-Based As-Is Modelling from Point Cloud Data: Topographic, Structural, and Architectural.

in coerenza con il quadro normativo definito dalla UNI 11337. Tale approccio interpreta il modello come sistema conoscitivo progressivo, nel quale il processo di costruzione delle informazioni assume un ruolo centrale rispetto alla sola rappresentazione geometrica. [Dore & Murphy, 2017; Lovell et al., 2023]

L'acquisizione incrementale dei dati ha inoltre comportato, in diversi casi, la rimodellazione degli elementi, al fine di garantire la piena coerenza tra rappresentazione geometrica e contenuto informativo. La necessità di aggiornare e ricalibrare il modello in funzione dell'acquisizione progressiva delle conoscenze costituisce una delle principali caratteristiche dei processi *Scan-to-HBIM* applicati al patrimonio esistente. [Murphy et al., 2013; Croce et al., 2021]

La marcata eterogeneità delle murature al piano terra, in termini di spessori, composizione stratigrafica e integrazioni materiche, ha richiesto una valutazione critica delle strategie di gestione del modello e del relativo apparato informativo, orientata alla definizione del più opportuno livello di intervento — geometrico o parametrico — al fine di contenere fenomeni di eccessiva frammentazione degli elementi e il conseguente incremento del peso computazionale, privilegiando, ove possibile, la mappatura delle evidenze desunte dalle indagini. In tale quadro, la seconda macrofase ha condotto a una scomposizione analitica delle parti in relazione agli elementi costruttivi, assunta sulla base delle indagini endoscopiche – integrate nel modello quali attributi informativi – che hanno consentito di esplicitare le configurazioni murarie e voltate, nonché il sistema costruttivo degli elementi (orditura dei solai, ammorsamenti, etc.) (Fig. 3). Le verifiche strutturali sono state condotte mediante l'impiego integrato di differenti ambienti *software*, selezionati in funzione delle specificità analitiche richieste (SismiCAD per le strutture esistenti, MidasGEN per il nuovo ampliamento, SAV per gli elementi voltati, VA Sluper per il calcestruzzo).

collection and examination of archival documentation, the review of available investigations, and the implementation of additional diagnostic surveys aimed at achieving Knowledge Level LC3 (Fig. 1), in accordance with the provisions of the Italian Technical Standards for Construction (NTC 2018).

The design process adopted the BIM methodology, starting from the processing of the digital survey. The workflow was structured into two distinct macro-phases: an initial phase aimed at the geometric reconstruction of the building, developed at a level of detail consistent with the as-is condition and accompanied by a preliminary classification of building components; and a second phase focused on the information enrichment of the geometries, based on the integration of data derived from investigations and the consequent implementation of parameters defined in the BIMMS and BIMSM documents of the Italian State Property Agency, comparable to the Employer's Information Requirements (EIR).

The activity was carried out to achieve a Level of Information Need (LOIN) appropriate for the executive phase and suitable to provide a structured and interoperable information base for subsequent construction, building, and management phases (Fig. 2).

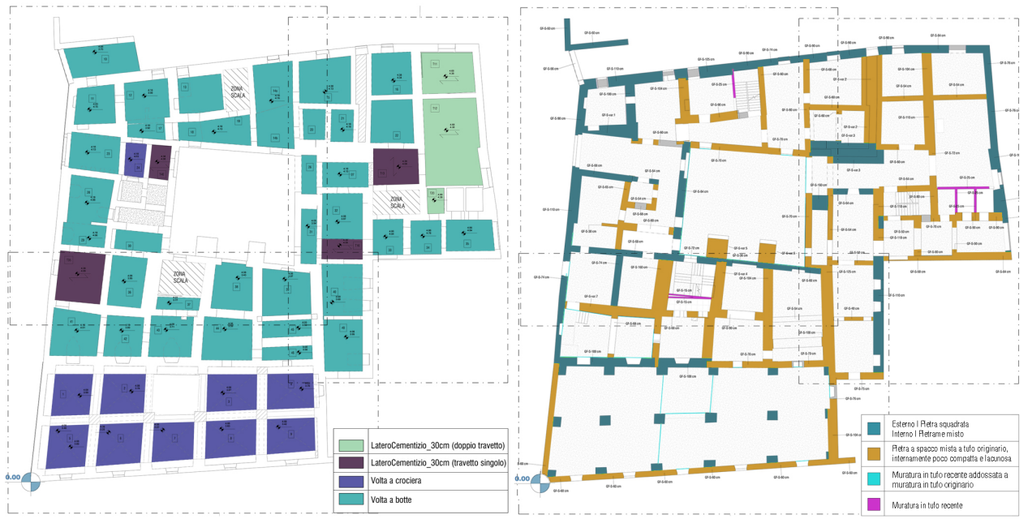


Fig. 3: Mappatura degli orizzontamenti piani e voltati e degli elementi strutturali verticali.

Fig. 3: Mapping of flat and vaulted horizontal structures and vertical structural elements.

Caratterizzazione materica e Analisi del degrado

Trattandosi di un edificio vincolato e dovendo garantire la produzione di elaborati grafici conformi all'art. 21 del D.Lgs. 42/2004, il processo è stato orientato verso un'impostazione metodologica fondata sulla deduzione delle rappresentazioni a partire dai modelli digitali, includendo caratterizzazione materica (Fig. 4) e analisi del degrado (Fig. 5).

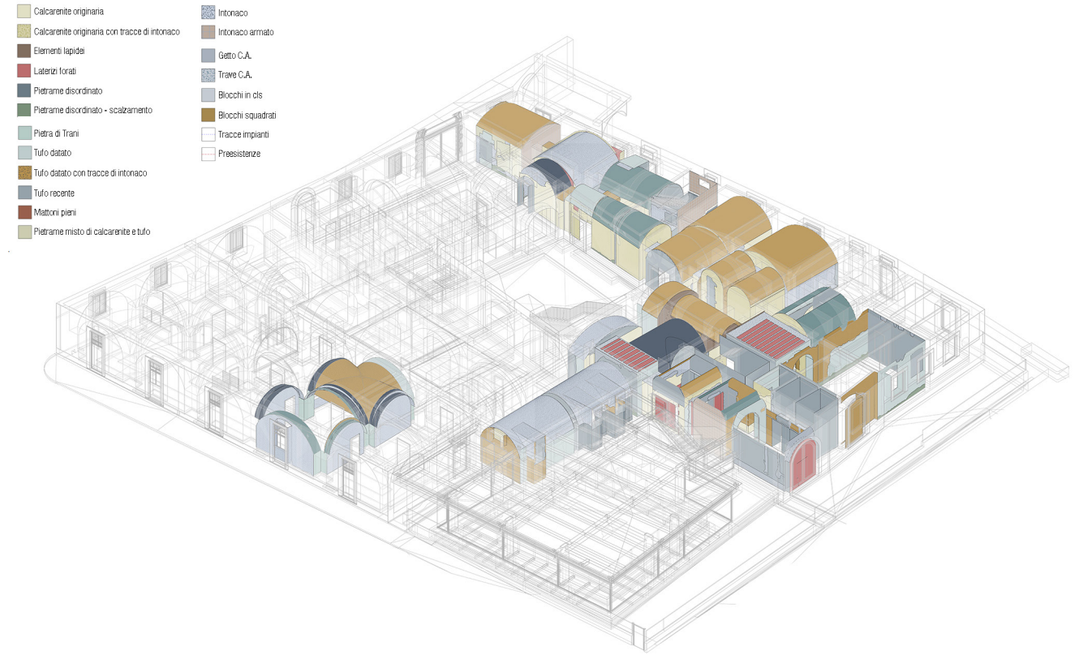


Fig. 4: Caratterizzazione Materica.

Fig. 4: Material Characterisation.

Modelling and parameterization represent the outcome of an iterative knowledge-based modelling process, within which the model is configured as an integrated environment for the structuring, correlation, and progressive verification of information, in compliance with the regulatory framework defined by UNI 11337. This approach interprets the model as a progressive knowledge system, in which

In tale prospettiva, la sola attribuzione parametrica si è rivelata insufficiente, rendendosi necessaria una restituzione graficamente e tridimensionalmente esplicita, coerente con i codici del disegno tecnico tradizionale. A tal fine, il modello *AS-IS* è stato integrato mediante elementi descrittivi tridimensionali.

L'esigenza di associare informazioni diagnostiche, materiche e conservative a rappresentazioni tridimensionali esplicite trova riscontro nelle più recenti applicazioni HBIM orientate alla conservazione programmata e alla gestione del patrimonio culturale. [Bruno et al., 2018; Banfi et al., 2022] Sono stati pertanto definiti, nella categoria "muri", tipi corrispondenti ai materiali e ai fenomeni di degrado rilevati, concepiti come superfici sottili (spessore 1 mm) sovrapponibili e combinabili, organizzate secondo il *naming* stabilito dalla Stazione Appaltante e in conformità alla UNI 11182. A titolo esemplificativo, si richiamano alcune codifiche adottate: FNT-STR-INC_RetIntonacoArmato-01, FNT-INT-MRT_RetTufoDatato-01,

the process of information construction plays a central role beyond mere geometric representation. [Dore & Murphy, 2017; Lovell et al., 2023]

The incremental acquisition of data also led, in several instances, to the remodelling of elements, in order to ensure full consistency between geometric representation and informational content. The need to update and recalibrate the model according to the progressive acquisition of knowledge represents one of the key characteristics of Scan-to-HBIM workflows applied to existing heritage assets. [Murphy et al., 2013; Croce et al., 2021] The marked heterogeneity of the ground-floor masonry—regarding thickness,

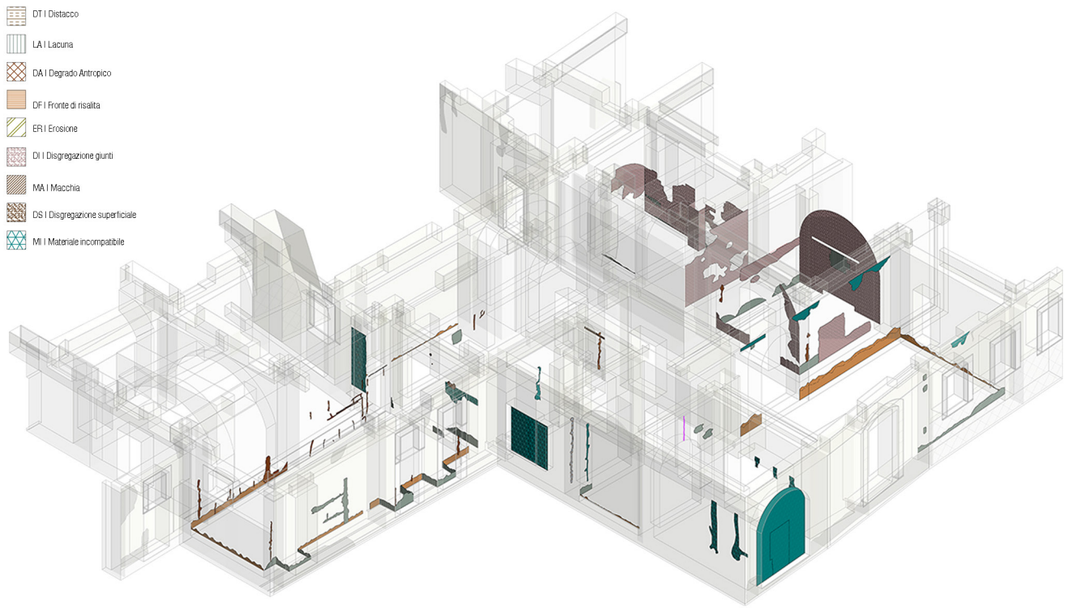


Fig. 5: Analisi del Degrado.

Fig. 5: Assessment of Degradation.

FNT-EQL-Mancanza, FNT-EQL_InterventoAntropico.-A ciascun tipo è stato associato un retino specifico coerente con la medesima logica di codifica. La scelta della categoria "muri" risponde alla necessità di controllare il profilo in alzato, in presenza di elevata disomogeneità e sovrapposizione delle parti (Fig. 6) (Fig. 7). Analogamente, per le volte si è fatto ricorso alla categoria "tetti", adattata alle superfici voltate. Sono stati inoltre definiti i *workset* "degrado" e "materico", impiegati secondo una logica meno convenzionale per la gestione della visibilità e dell'estrazione quantitativa (*quantity take-off*), concepiti come contenitori informativi autonomi, filtrabili e attivabili in funzione delle esigenze analitiche. Le operazioni di analisi



Fig. 6: Mappatura dei materiali-abaco e output.

Fig. 6: Material Mapping – Material Schedules and Outputs.



Fig. 7: Mappatura dei degradi-abaco e output.

Fig. 7: Decay Mapping – Decay Schedules and Outputs.



Fig. 8: Interventi progettuali.

Fig. 8: Project design interventions.

e modellazione sono state costantemente supportate dal confronto con il quadro conoscitivo preliminare, le nuvole di punti, i *virtual tour* e la documentazione fotografica.

Conclusioni

Il contributo evidenzia come l'applicazione della metodologia BIM al patrimonio esistente consenta di strutturare, correlare e integrare modelli informativi eterogenei, supportando processi di conoscenza, gestione e valorizzazione del costruito. Il caso studio ha mostrato come la fase di rilievo abbia condotto a una scomposizione analitica degli elementi costruttivi, informata da indagini endoscopiche, integrate nel modello come attributi informativi, che hanno permesso la rappresentazione esplicita delle murature e delle configurazioni voltate, nonché del sistema costruttivo degli elementi (strutture orizzontali, sistemi di ammorsamento, ecc.) (Fig. 3).

stratigraphic composition, and material integrations—required a critical evaluation of model management strategies and the related information system, aimed at defining the most appropriate level of intervention—geometric or parametric—in order to limit excessive fragmentation of elements and the consequent increase in computational load, favoring, where possible, the mapping of evidence derived from investigations. Within this framework, the second macro-phase led to an analytical decomposition of the building components based on constructive elements, informed by endoscopic investigations—integrated into the model as informational attributes—which enabled the explicit representation of masonry and vaulted configurations, as well as the constructive system of building elements (floor structures, bonding systems, etc.) (Fig. 3).

tegrare livelli eterogenei di conoscenza all'interno di un modello informativo unitario e coerente.

La mappatura sistematica delle indagini, unitamente alle informazioni relative ai materiali e allo stato di conservazione, si configura quale base dati ad elevato valore informativo, funzionale al supporto delle attività progettuali e gestionali.

In tale prospettiva, il modello informativo assume la configurazione di ambiente conoscitivo condiviso, a supporto sia della definizione degli interventi (Fig. 8) sia della gestione nel tempo del manufatto, consentendo l'organizzazione, l'implementazione e l'aggiornamento continuo delle informazioni relative al comportamento materico e all'evoluzione dei fenomeni di degrado.

L'articolazione strutturata dei contenuti informativi consente, inoltre, di abilitare processi di pianificazione temporale 4D e di controllo economico 5D, nonché di supportare le attività di gestione e manutenzione in esercizio 6D–7D. In questo quadro, l'HBIM, ormai consolidato nella pratica operativa, si configura quale dispositivo metodologico e strumento operativo per l'organizzazione, la gestione e la trasmissione delle informazioni, in coerenza con i principi definiti dalle norme UNI 11337 e UNI EN ISO 19650. In conclusione, la letteratura più recente evidenzia una progressiva evoluzione dell'HBIM verso piattaforme interoperabili dedicate alla gestione del ciclo di vita, all'integrazione con *Digital Twin* e alle applicazioni XR per il patrimonio costruito. [Banfi, 2021; Lovell et al., 2023]

Crediti

- Committente | *Agenzia del Demanio - Direzione Territoriale Puglia e Basilicata*
- *Sinergo spa | Mandataria*
  Integrazioni prestazioni specialistiche | *arch. Alberto Muffato*
  Coordinamento della Sicurezza in fase di progettazione | *ing. Stefano Muffato*
  Geologia | *dott. Daniele Lucchiari*
  Opere impiantistiche e prevenzione incendi | *ing. Filippo Bittante*
  Opere strutturali | *ing. Marco Brugnerotto*
  Coordinamento di progetto | *arch. Francesca Cremasco*

Gruppo di lavoro:

Strutture | *ing. Simone Galante, ing. Giacomo Duso, ing. Alex Santinon, ing. Domenico Citrea, ing. Francesco Fraccaro, ing. Shahin Amayeh, ing. Sohrab Amayeh*
Architettura | *arch. Annapaola Villano, Elnaz Saadatiyeganeh, arch. Andrea Marchi*
Impianti Meccanici | *ing. Giovanni Moreschini, ing. Davide Potente, p.i. Alessandro Prete*
Impianti Elettrici | *p.i. Carlo Laurenti*
Progettazione Antincendio | *ing. Elisa Karen Buja*
Progettazione Idraulica | *ing. Barbara Marin, geom. Giulia De Marchi*
Sicurezza | *arch. Riccardo Naletto*
Aspetti Ambientali | *arch. Elisa Sirombo*
Ricerca Storica | *dott. Tommaso Tagliabue*
Coordinamento Processo Informativo | *arch. Annapaola Villano*

- DEMOGO | Mandante Opere Architettoniche
  arch. Alberto Mottola, arch. Simone Gobbo, geom. Davide De Marchi

Structural analyses were performed through the integrated use of different software environments, selected according to the specific analytical requirements (SismiCAD for existing structures, MidasGEN for the new extension, SAV for vaulted elements, and VA Sluper for reinforced concrete).

Material Characterisation and Degradation Analysis

Given that the building is subject to heritage protection constraints and that the production of graphic outputs compliant with Article 21 of *Legislative Decree 42/2004* was required, the process was oriented towards a methodological approach based on the derivation of representations from digital models, including material analysis (Fig. 4) and decay assessment (Fig. 5).

Within this framework, purely parametric attribution proved insufficient, making it necessary to provide a representation that is both graphically and three-dimensionally explicit, consistent with the conventions of traditional technical drawing. To this end, the AS-IS model was enriched through the integration of three-dimensional descriptive elements. The need to associate diagnostic, material, and conservation-related information with explicit three-dimensional representations is reflected in the most recent HBIM applications aimed at preventive conservation and cultural heritage management. [Bruno et al., 2018; Banfi et al., 2022].

Specific types were therefore defined within the "walls" category, corresponding to the identified materials and decay phenomena, conceived as thin surfaces (1 mm thickness) that can be superimposed and combined, organized according to the naming conventions established by the Contracting Authority and in compliance with UNI 11182. By way of example, some of the adopted codifications include: FNT-STR-INC_RetIntonacoArmato-01, FNT-INT-MRT_RetTufoDatato-01, FNT-EQL-Mancanza, FNT-EQL_InterventoAntropico. Each type was associated with a specific hatch pattern consistent with the same coding logic. The choice of the "walls" category responds to the need to control vertical profiles in the presence of significant heterogeneity and overlap of elements (Fig. 6) (Fig. 7). Similarly, for vaulted systems, the "roofs" category was employed, adapted to vaulted geometries. Additionally, the "decay" and "material" worksets were defined and used according to a less conventional approach for visibility management and quantity take-off, conceived as autonomous information containers that can be filtered and activated depending on analytical requirements.

The analysis and modelling activities were consistently supported by comparison with the preliminary knowledge framework, point clouds, virtual tours, and photographic documentation.

Concluding Remarks

The contribution highlights how the application of the BIM methodology to existing heritage enables the structuring, correlation, and integration of heterogeneous levels of knowledge within a unified and coherent information model. The systematic mapping of investigations, together with information related to materials and conservation conditions, constitutes a high-value data framework, supporting both design and management activities. Within this perspective, the information model assumes the configuration of a shared knowledge environment, supporting both the definition of interventions (Fig. 8) and the long-term management of the asset, enabling the organization, implementation, and continuous updating of information related to material behavior and the evolution of decay phenomena. Moreover, the structured organization of informational content enables 4D scheduling and 5D cost control processes, as well as supporting operational management and maintenance activities in 6D–7D. In this framework, HBIM—now well established in operational practice—emerges as both a methodological framework and an operational tool for the organization, management, and transmission of information, in compliance with the principles defined by UNI 11337 and UNI EN ISO 19650 standards.

Bibliografia

Acierno, M., & Fiorani, D. (2019). *Innovative tools for managing historical buildings: The use of geographic information system and ontologies for historical centers*. Atti *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, GEORES 2019 – 2nd International Conference of Geomatics and Restoration*, Milano, 8–-10 maggio 2019, Volume XLII-2/W1.

Banfi, F. (2021). The evolution of interactivity, immersion and interoperability in *HBIM: Digital model uses, VR and AR for built cultural heritage*. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, n. 10(10), 685.

Banfi, F. (2023). *Virtual heritage. Dalla modellazione 3D all'HBIM e realtà estesa*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli.

Banfi, F., Brumana, R., Landi, A. G., Previtali, M., Roncoroni, F., & Stanga, C. (2022). *Building archaeology informative modelling turned into 3D volume stratigraphy and extended reality time-lapse communication*. *Virtual Archaeology Review, 13*(26), 1–21.

Bruno, S., De Fino, M., & Fatiguso, F. (2018). Historic building information modelling: Performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management. In *Automation in Construction*, n. 86, pp. 256-276.

Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Jacquot, K., Piemonte, A., & Véron, P. (2021). *From the semantic point cloud to heritage-building information modeling: A semiautomatic approach exploiting machine learning*. *Remote Sensing*, 13(3), 461.

Dore, C., & Murphy, M. (2017). Current state of the art historic building information modelling. 26th International CIPA Symposium 2017. Atti *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Ottawa, Canada, 28 agosto 01 settembre 2017, Vol. XLII-2/W5.

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*, n. 6(10), pp. 6691-6717.

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic Building Information Modelling (HBIM). *Structural Survey*, n. 27(4), pp. 311-327.

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic Building Information Modelling: Adding intelligence to laser and image-based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n. 76, pp. 89-102.

Autori

Arianna Picci[1]

[1] Sapienza Università di Roma

Email

picci.2079243@studenti.uniroma1.it

Procedure HBIM su un borgo colpito dal sisma del 2016

HBIM process in a Village Affected by the 2016 Earthquake

Keywords

HBIM
ARCHITECTURAL RESTORATION
2016 EARTHQUAKE
DIGITAL TWIN
TERRACINO

Abstract

Il contributo illustra gli esiti di una ricerca incentrata sull'applicazione della metodologia HBIM al restauro del patrimonio culturale in contesti post-sismici assumendo come caso studio la chiesa di S. Giorgio Martire di Terracino (RI). Partendo dal rilievo integrato, è stato generato un *Digital Twin* della chiesa, un modello informativo contenente dati storici, materici, mappatura del degrado e degli interventi conservativi. Per ottimizzare la diffusione dei dati, è stato generato un modello 3D interattivo atto a centralizzare e condividere la sintesi informativa.

This paper presents the results of a study focused on the application of the HBIM methodology to the restoration of cultural heritage in post-earthquake contexts, using the Church of St. George the Martyr in Terracino (RI) as a case study. Starting with an integrated survey, a Digital Twin of the church was generated—an information model containing historical data, material data, and maps of deterioration and conservation interventions. To optimize data dissemination, an interactive 3D model was created to centralize and share the summary information.

Introduzione

Il restauro e la conservazione del patrimonio storico-architettonico rappresentano, nel panorama scientifico contemporaneo, una sfida complessa e multidisciplinare, specialmente laddove si debba operare in territori ad alto rischio sismico. Tra i fenomeni che mettono più a dura prova la resilienza del patrimonio, i movimenti sismici costituiscono una delle minacce più devastanti non solo per l'integrità strutturale del patrimonio costruito, ma anche per l'identità antropologica e sociale delle comunità che abitano tali luoghi.

In questo scenario, la ricerca metodologica ha trovato un supporto fondamentale nell'evoluzione delle tecnologie digitali ed, in particolare, nell'estensione del BIM all'edilizia storica (HBIM, Heritage Building Information Modeling). Tale processo è stato applicato alla Chiesa di San Giorgio Martire di Terracino, una delle sette frazioni di Accumoli.

Il contesto storico-territoriale di Accumoli e della frazione di Terracino

L'analisi storico-territoriale definisce Accumoli come un insediamento d'altura integrato nella valle del Tronto. Il suo palinsesto urbano è l'esito di uno sviluppo morfologico e infrastrutturale iniziato lungo la via Salaria in epoca pre-romana [Radici Accumolesi, 2023].

Lo sviluppo del tessuto edilizio è stato storicamente condizionato da un'elevata ricorrenza sismica [Bruschi, 2021], culminata nella sequenza del 2016. Le scosse del 24 agosto 2016 (magnitudo 6.0) hanno causato il quasi totale collasso del tessuto storico-urbanistico e delle infrastrutture viarie nell'Appennino centrale, con circa 300 vittime. La sequenza sismica verificatasi nell'autunno dello stesso anno, con evento principale il 30 ottobre (M 6.5), ha ulteriormente aggravato il danneggiamento strutturale dei nuclei abitati.

L' impatto di tali eventi sismici ha generato scenari di danno eterogenei: a fronte del collasso quasi totale del centro storico del capoluogo, la frazione di Terracino ha manifestato una peculiare resilienza strutturale, registrando unicamente lesioni diffuse e dissesti localizzati, senza crolli macroscopici.

La Chiesa di San Giorgio Martire: caratteri architettonici ed evoluzione edilizia

Nel tessuto di Terracino, la Chiesa di San Giorgio Martire[1] è l'unico edificio di culto e funge da nucleo generatore dell'impianto urbano a crinale. I prospetti esterni sono caratterizzati da una composizione essenziale e da una finitura ad intonaco; la facciata principale ha un andamento a vela e l'unico elemento decorativo è il portale in pietra arenaria del 1522, arricchito con motivi rinascimentali. Internamente è costituita da un'aula biabsidata a due navate, divise da archi a tutto sesto su pilastri quadrangolari. Le pareti ospitano affreschi votivi dei secoli XVI-XVII (Fig. 1); il più rilevante, sull'altare maggiore, raffigura San Giorgio e il drago[2].

L'analisi storico-costruttiva della Chiesa di San Giorgio Martire ha consentito di individuare quattro principali fasi evolutive (Fig. 2) che ne documentano le trasformazioni architettoniche e funzionali nel corso del tempo:

- Fase 1 (XVI sec. - 1936): L'edificio all'epoca di costruzione aveva un prospetto a vela con cella campanaria ad essa annessa, due finestre circolari disposte in maniera simmetrica e un portale leggermente decentrato verso sinistra.
- Fase 2 (1936 - 1970 circa): L'edificio fu interessato da un radicale intervento di restauro; in questa occasione venne costruito il campanile all'interno del quale vennero posizionate le campane del 1700 (già presenti nella vecchia cella campanaria). L'unico elemento che rimase inalterato fu il portale cinquecentesco.
- Fase 3 (1970 circa - 2016): Un crollo nella porzione nord-est portò alla riconfigurazione del retrostante alloggio del parroco in deposito-legnaia, aprendo un nuovo accesso a nord.
- Fase 4 (Post-Sisma 2016): I danni del terremoto del 2016 e le fessurazioni del 2017 resero la chiesa inagibile. Nel 2018 scattarono le messe in sicurezza d'urgenza[3]: l'involucro edilizio venne circoscritto con un ponteggio misto al fine di limitare il crollo di porzioni murarie.



Fig. 1: Sezioni architettoniche della Chiesa di San Giorgio Martire.

Fig. 1: Architectural sections of the Church of St George the Martyr.

Dal rilievo Integrato all' HBIM

La fase di acquisizione dei dati ha consentito una conoscenza diretta del manufatto; il rilievo è stato effettuato utilizzando differenti tecniche e strumentazioni per il rilevamento. In particolare, sono stati eseguiti rilievi tramite laser scanner terrestre (TLS), macchine fotografiche e droni; inoltre sono state condotte delle

[1] La parrocchia è stata riconosciuta civilmente il 7 ottobre 1986. Iscritta nel Registro delle persone giuridiche della Prefettura di Rieti il 31 maggio 1989 – n. 282.
[2] Tale affresco è anche citato in una visita pastorale del 1711 [Di Flavio, 2016]
[3] Bollettino ufficiale della regione Lazio; n. 78-Supplemento 1 del 25/09/2018

Introduction

The restoration and conservation of historical and architectural heritage represent, in the contemporary scientific landscape, a complex and multidisciplinary challenge, especially when work must be carried out in areas at high risk of earthquakes. Among the phenomena that most severely test the resilience of heritage, seismic activity constitutes one of the most devastating threats not only to the structural integrity of built heritage but also to the anthropological and social identity of the communities inhabiting these places.

In this context, methodological research has found fundamental support in the evolution of digital technologies and, in particular, in the extension of BIM to historic buildings (HBIM, Heritage Building Information Modeling). This process was applied to the Church of San Giorgio Martire in Terracino, one of the seven hamlets of Accumoli.

The Historical-Territorial Context of Accumoli and the Hamlet of Terracino

Historical-territorial analysis defines Accumoli as a hilltop settlement integrated into the Tronto Valley. Its urban layout is the result of morphological and infrastructural development that began along the Via Salaria in pre-Roman times [Radici Accumolesi, 2023].

The development of the built environment has historically been shaped by frequent seismic activity [Bruschi, 2021], culminating in the 2016 earthquake sequence. The earthquakes of August 24, 2016 (magnitude 6.0) caused the near-total collapse of the historic urban fabric and road infrastructure in the central Apennines, resulting in approximately 300 fatalities. The subsequent seismic sequence that occurred in the fall of the same year, characterized by the main event on October 30 (M 6.5), led to a further worsening of structural damage in the inhabited areas.

The impact of these seismic events resulted in varied damage patterns: while the historic center of the main town suffered near-total collapse, the hamlet of Terracino demonstrated remarkable structural resilience, sustaining only widespread cracks and localized instability, without any major collapses.

The Church of San Giorgio Martire: Architectural Features and Construction History

Within the fabric of Terracino, the Church of San Giorgio Martire[1] is the only place of worship and serves as the focal point of the ridge-shaped urban layout. The exterior elevations are characterized by a simple composition and a plaster finish; the main façade has a vaulted profile, and the sole decorative element is the sandstone portal dating from 1522, embellished with Renaissance motifs. Internally, it consists of a double-apsed hall with two naves, divided by round arches resting on square pillars. The walls feature votive frescoes from the 16th and 17th centuries (Fig. 1); the most significant, above the high altar, depicts Saint George and the dragon[2].

The historical and structural analysis of the Church of St. George the Martyr has identified four main phases of development (Fig. 2) that document its architectural and functional transformations over time:

- Phase 1 (16th century – 1936): At the time of its construction, the building had a gabled façade with an attached bell tower, two symmetrically arranged circular windows, and a portal slightly offset to the left.
- Phase 2 (1936 – ca. 1970): The building underwent a radical restoration; during this work, the bell tower was constructed, housing the 18th-century bells (previously located in the old belfry). The only element that remained unchanged was the 16th-century portal.
- Phase 3 (circa 1970–2016): A collapse in the northeast section led to the conversion of the rear priest's quarters into a wood storage area, creating a new entrance on the north side.

[1] The parish was officially recognized on October 7, 1986. It was entered in the Register of Legal Entities of the Prefecture of Rieti on May 31, 1989 – No. 282.
[2] This fresco is also mentioned in a pastoral visit of 1711 [Di Flavio, 2016]
[3] Official Gazette of the Lazio Region; No. 78 – Supplement 1 of 25 September 2018

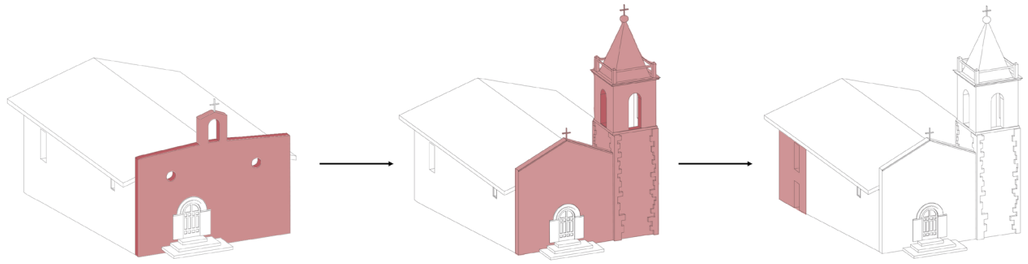


Fig. 2: Evoluzione storica della chiesa di San Giorgio prima del sisma del 2016.

Fig. 2: Historical development of the Church of St George prior to the 2016 earthquake.

campagne fotografiche di dettaglio mirate alla caratterizzazione materica e stratigrafica delle murature. Il quadro conoscitivo è stato ulteriormente implementato mediante un'indagine storico-documentaria e bibliografica, finalizzata alla ricostruzione delle vicende evolutive del manufatto e alla contestualizzazione critica delle evidenze rilevate.

I dati geometrici derivanti dal rilievo integrato sono stati importati in ambiente HBIM mediante Autodesk Revit, utilizzando la nuvola di punti come riferimento tridimensionale per la restituzione digitale del manufatto. La modellazione è stata sviluppata secondo una logica gerarchica, dalle macro-strutture agli elementi architettonici di dettaglio. L'analisi stratigrafica delle murature della Chiesa di San Giorgio Martire ha consentito l'individuazione di cinque tipologie costruttive, implementate come famiglie parametriche e collegate a database esterni contenenti le tabelle delle USM. Allo stesso modo sono stati allegati al modello un regesto storico e uno iconografico in formato editabile. (Fig. 3) Tale struttura garantisce interoperabilità, aggiornabilità e condivisione delle informazioni tra le diverse figure professionali coinvolte.

Il modello è stato successivamente implementato con la mappatura del degrado mediante superfici parametriche dedicate, associate a schede descrittive contenenti specifiche sulle patologie di degrado e sui conseguenti protocolli di intervento conservativo. (Fig. 4) Il progetto di restauro è pensato nel rispetto dei principi del restauro critico conservativo, analizzando e scegliendo, caso per caso, le fasi operative da proporre.

Il risultato è un *Digital Twin* semantico e dinamico del bene culturale, concepito come strumento operativo per la gestione, il monitoraggio e la futura conservazione del manufatto.

Dal Digital Twin alla valorizzazione e condivisione diffusa

La seconda macro-fase della ricerca aveva come obiettivo fondamentale quello di estendere i benefici della digitalizzazione e della metodologia HBIM al di fuori della ristretta cerchia dei tecnici del settore, promuovendo la valorizzazione del centro storico del borgo e garantendo la creazione di un sistema di conoscenza facilmente accessibile da tutti.

- Phase 4 (Post-2016 Earthquake): Damage from the 2016 earthquake and cracks that appeared in 2017 rendered the church unusable. In 2018, emergency safety measures were implemented[3]: the building envelope was secured with mixed scaffolding to prevent the collapse of sections of the walls.

From Integrated Survey to HBIM

The data acquisition phase provided direct insight into the structure; the survey was conducted using various surveying techniques and instruments. Specifically, surveys were performed using terrestrial laser scanners (TLS), cameras, and drones; in addition, detailed photographic campaigns were carried out to characterize the materials and stratigraphy of the masonry. This body of knowledge was further expanded through historical-documentary and bibliographic research, aimed at reconstructing the building's evolutionary history and critically contextualizing the collected evidence.

The geometric data derived from the integrated survey were imported into the HBIM environment using Autodesk Revit, with the point cloud serving as a three-dimensional reference for the digital reconstruction of the building. The modeling was developed according to a hierarchical logic, from macro-structures to detailed architectural elements. The stratigraphic analysis of the masonry of the Church of San Giorgio Martire allowed for the identification of five construction types, implemented as para-

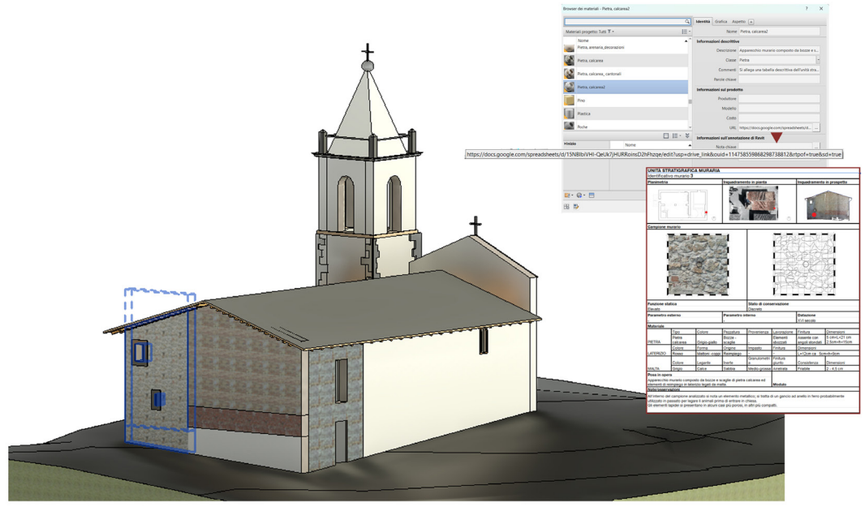


Fig. 3: Costruzione del modello informativo; inserimento di informazioni sulle murature storiche.

Fig. 3: Construction of the information model; inclusion of information on historic masonry.

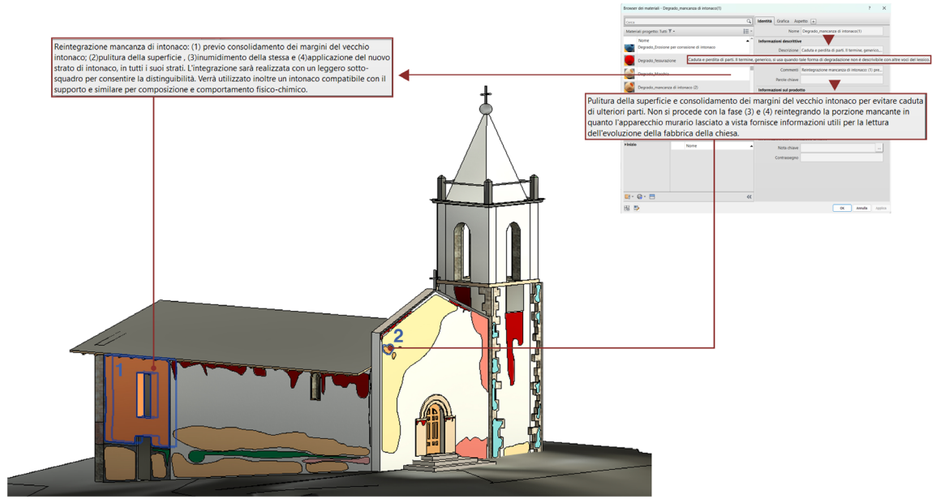


Fig. 4: Costruzione del modello informativo; mappatura degli interventi di restauro.

Fig. 4: Construction of the information model; mapping of restoration works.

A tal fine è stata sviluppato un modello 3D dell'intero borgo navigabile sul web, accessibile in modo immediato tramite la scansione di un QR code (Fig. 5) o mediante un semplice link ipertestuale, caratterizzato da un'interfaccia utente estremamente intuitiva che permette a chiunque di orbitare liberamente nello spazio digitale ed esplorare autonomamente le caratteristiche del tessuto urbano.

Il modello è stato implementato anche con degli *hotspot*, punti dinamici interattivi che permettono di visualizzare, al click, delle finestre *pop-up* con foto, cartografie storiche e dei contenuti video miranti ad illustrare in sintesi il complesso processo HBIM adottato per l'edificazione del *Digital Twin* della Chiesa di San Giorgio Martire. (Fig. 6) Nello specifico, i contenuti multimediali inseriti sono tre e descrivono in ordine i passaggi operativi della modellazione informativa:

1. la modellazione e il passaggio dalla nuvola di punti al modello;
2. l'inserimento dei dati sulle murature storiche all'interno del modello informativo;
3. la mappatura e l'analisi del degrado dei materiali e i relativi interventi conservativi.

Per permettere all'utente una visualizzazione sincrona dei contenuti, priva di reindirizzamenti ipertestuali secondari, i contenuti descrittivi dei moduli *pop-up* sono stati strutturati in formato *markdown*. Questo protocollo di testo semplice, configurato per richiamare direttamente le risorse iconografiche, assicura una conversione diretta in codice HTML strutturato, ottimizzando l'architettura dei dati.

Gli *output* della ricerca evidenziano il potenziale del processo HBIM come un'opportunità per ridefinire il rapporto tra le tecnologie digitali d'avanguardia e lo studio, e l'intervento, sul patrimonio storico-architettonico.

L'innovazione digitale, oltre ad essere un prezioso supporto nelle fasi tecniche e operative, può intervenire anche nei processi sociali di riappropriazione identitaria da parte delle comunità colpite dal sisma.

metric families and linked to external databases containing the USM tables. Similarly, a historical and iconographic register in editable format was attached to the model. (Fig. 3) This structure ensures interoperability, updatability, and information sharing among the various professionals involved.

The model was subsequently enhanced with the mapping of deterioration using dedicated parametric surfaces, linked to descriptive sheets containing specifications on the deterioration pathologies and the resulting conservation intervention protocols. (fig.4) The restoration project is designed in accordance with the principles of critical-conservative restoration, analyzing and selecting, on a case-by-case basis, the operational phases to be proposed.

The result is a semantic and dynamic Digital Twin of the cultural asset, conceived as an operational tool for the management, monitoring, and future conservation of the artifact.

From the Digital Twin to Wider Promotion and Sharing

The primary objective of the second major phase of the research was to extend the benefits of digitization and the HBIM methodology beyond the narrow circle of industry technicians, promoting the enhancement of the village's historic center and ensuring the creation of a knowledge system easily accessible to everyone. To this end, a 3D model of the entire village was developed, navigable on the web and immediately accessible by scanning a QR code (Fig. 5) or via a simple hyperlink. It features an extremely intuitive user interface that allows anyone to freely navigate the digital space and independently explore the characteristics of the urban fabric. The model also incorporates hotspots—dynamic interactive points that, when clicked, display pop-up windows with photos, historical maps, and video content aimed at summarizing the complex HBIM process adopted for the construction of the Digital Twin of the Church of St. George the Martyr. (Fig. 6) Specifically, there are three multimedia elements that describe, in order, the operational steps of the information modeling process:

1. modeling and the transition from the point cloud to the model;
2. the integration of data on historic masonry into the information model;
3. the mapping and analysis of material degradation and the corresponding conservation interventions.

To allow the user a synchronous visualization of the content, free of secondary hypertext redirects, the descriptive content of the pop-up modules has been structured in Markdown format. This simple text protocol, configured to directly call up iconographic resources, ensures direct conversion into structured HTML code, optimizing the data architecture.

The research findings highlight the potential of the HBIM process as an opportunity to redefine the relationship between cutting-edge digital technologies and the study of—and intervention on—historical and architectural heritage. Digital innovation, in addition to being a valuable support during technical and operational phases, can also play a role in the social processes of identity reappropriation by communities affected by the earthquake.



Fig. 5: Modello tridimensionale interattivo del borgo di Terracino.

Fig. 5: Interactive 3D model of the village of Terracino.

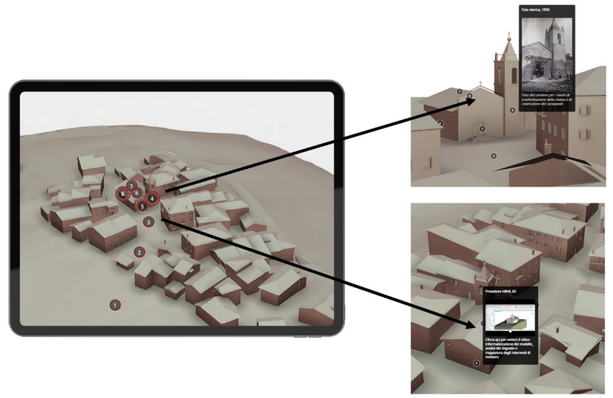


Fig. 6: Contenuti allegati al modello interattivo del borgo.

Fig. 6: *Content attached to the interactive model of the village.*

Bibliografia

Bruschi A. (2021). *Ipotesi per Accumoli. Verso nuovi cicli di vita di un territorio terremotato*. Roma: Tipografia del Genio Civile.

Cappello A. (1825). *Osservazioni geologiche e memorie storiche di Accumoli in Abruzzo*, Roma

De Meo M. (2006). *Tecniche costruttive murarie medievali: la Sabina*. Roma: L'Erma di Bretschneider.

Di Flavio V. (2016), Antiche croci astili nell'Abruzzo aquilano già in diocesi di Rieti e di Ascoli (2016) in *Bullettino della Deputazione Abruzzese di Storia Patria*, n.107 (2016) p. 83-112.

Donatelli A. (2010). *Terremoto e architettura storica. Prevenire l'emergenza*, Roma: Gangemi Editore.

Empler T. (2020). *Prevenzione e Ricostruzione sismica: ricerche e metodi. Intervenire nel territorio di Accumoli*. Roma: DEI tipografia del Genio Civile.

Guccione M., Nappi M.R., Recchia A. P. (1998). P*atrimonio culturale e disastri. L'impatto del sisma sui beni monumentali / prospettive di prevenzione*, Roma: Gangemi editore.

Mirabile Gattia D., Roselli G., Alshawa O., Cinaglia P., Di Girolami G., Francola P., Petrucci E., Piloni R., Scognamiglio F., Sorrentino L., Zamponi S., Liberatore D. (2019), Characterization of historical masonry mortar from sites damaged during the central Italy 2016-2017 seismic sequence: the case study of Arquata del Tronto. In *Annals of geophysics*, n.62, 3 (2019).

Radici Accumolesi Odv (2023). *La storia della comunitàà accumolese*. Rieti: RiStampa Edizioni.

Strappa G., Carlotti P., Camiz A. (2016). *Morfologia urbana e tessuti storici. Il progetto contemporaneo dei centri minori del Lazio*. Roma: Gangemi editore.

Autori

Davit Zalinyan[1]

Email

dzalinyan@nuaca.am

[1] National University of Architecture and Construction of Armenia (NUACA)

Supporto decisionale HBIM per la conservazione del gavit di Neghuts

HBIM-Based Conservation Decision Support for the Neghuts Gavit

Keywords

HBIM
CONSERVATION DECISION SUPPORT
CONSERVATION TRACEABILITY
MCDA
NEGHUTS MONASTERY

Abstract

Il contributo presenta un workflow HBIM pilota per il supporto decisionale alla conservazione nel gavit del Monastero di Neghuts. Dati di rilievo, mappature del degrado e risultati FTIR sono collegati a record per elemento relativi a evidenze, diagnosi, vincoli conservativi, opzioni di intervento e tracciabilità decisionale. Implementato in Archicad, il workflow supporta il confronto trasparente delle azioni conservative ammissibili, senza sostituire il giudizio esperto.

This paper presents a pilot HBIM workflow for conservation decision support in the gavit of Neghuts Monastery. Survey data, decay mapping and FTIR results are linked to element-based records for evidence, diagnosis, conservation constraints, intervention options and decision trace. Implemented in Archicad, the workflow supports the transparent comparison of admissible conservation actions without replacing expert judgement.

Introduzione

L'*Historic Building Information Modelling* (HBIM) è ampiamente utilizzato per la documentazione digitale del patrimonio architettonico. Integrando geometrie derivate dal rilievo, modellazione parametrica e informazioni semantiche, l'HBIM rappresenta gli edifici storici come sistemi informativi strutturati che collegano disegni, fotografie, dati materici e attributi descrittivi [Murphy et al., 2009; Murphy et al., 2013].

Tuttavia, il passaggio dalla documentazione del patrimonio al processo decisionale conservativo resta solo parzialmente risolto. Le applicazioni HBIM supportano rilievo, modellazione, classificazione e gestione informativa, ma il ragionamento che collega il degrado osservato alle scelte di intervento è spesso ancora gestito fuori dal modello, tramite relazioni, tabelle o discussioni tra esperti [Pocobelli et al., 2018; Jordan-Palomar et al., 2018]. Ciò indebolisce la tracciabilità decisionale quando evidenze, diagnosi, stato materico e criteri di intervento devono essere esaminati congiuntamente.

Il problema è particolarmente rilevante poiché le decisioni conservative non dipendono solo dall'efficacia tecnica. Esse dipendono anche da principi quali minimo intervento, compatibilità materica, reversibilità ove possibile, rispetto dell'autenticità e riduzione del rischio a lungo termine [ICOMOS, 1964; ICOMOS, 1994; ICOMOS ISCARSAH, 2003]. Per questo, il quesito affrontato nel contributo è come strutturare un modello HBIM affinché evidenze, diagnosi, vincoli conservativi e scelte di intervento restino collegati a specifici elementi architettonici.

Il contributo esamina tale quesito tramite un *workflow* pilota sviluppato per il *gavit* del Monastero di Neghuts. L'obiettivo non è automatizzare le decisioni conservative, ma rendere esplicita, tracciabile e verificabile nel modello digitale la catena osservazione–diagnosi–intervento, preservando il ruolo centrale del giudizio esperto. Il contributo proposto consiste nell'integrare nelle proprietà HBIM basate sugli elementi la catena del ragionamento conservativo stesso, e non solo i *record* documentativi.

Obiettivo, ambito e base documentaria

La ricerca definisce un *workflow* HBIM pilota che collega le evidenze conservative alla logica di supporto decisionale all'interno del modello digitale. L'approccio integra dati di rilievo, degrado mappato, attributi diagnostici, vincoli e opzioni di intervento ammissibili. Il *workflow* è testato sul *gavit* del Monastero di Neghuts, struttura medievale in muratura nella Provincia di Kotayk, Armenia. Il caso studio offre un contesto conservativo compatto ma complesso, con geometria irregolare, stratificazione materica e molteplici forme di degrado. La sezione orientale N–S è stata scelta come dimostratore poiché include, in un'unica vista analitica, pareti, archi, volte ed elementi connessi alla cupola.

Per il pilota, la struttura informativa è stata applicata a elementi architettonici selezionati e zone di degrado mappate, invece che a una granularità pietra per pietra, poiché l'obiettivo era testare la tracciabilità decisionale alla scala del ragionamento e della pianificazione degli interventi. La base conoscitiva integra rilievo

Introduction

Historic Building Information Modelling (HBIM) is widely used for the digital documentation of architectural heritage. By combining survey-derived geometry, parametric modelling and semantic information, HBIM represents historic buildings as structured information systems linking drawings, photographs, material data and descriptive attributes [Murphy et al., 2009; Murphy et al., 2013].

However, the transition from heritage documentation to conservation decision-making remains only partially resolved. HBIM applications support survey, modelling, classification and information management, but the reasoning that links observed deterioration to intervention choices is often still managed outside the model, through separate reports, tables or expert discussions [Pocobelli et al., 2018; Jordan-Palomar et al., 2018]. This weakens decision traceability when evidence, diagnosis, material condition and intervention criteria need to be reviewed together.

This issue is particularly relevant because conservation decisions are not determined by technical effectiveness alone. They also depend on principles such as minimum intervention, material compatibility, reversibility where possible, respect for authenticity and long-term risk reduction [ICOMOS, 1964; ICOMOS, 1994; ICOMOS ISCARSAH, 2003]. For this reason, the question addressed in this paper is how an HBIM model can be structured so that evidence, diagnosis, conservation constraints and intervention choices remain connected to specific architectural elements.

The paper examines this question through a pilot workflow developed for the *gavit* of Neghuts Monastery. The aim is not to automate conservation decisions, but to make the observation–diagnosis–intervention chain explicit, traceable and reviewable within the digital model, while preserving the central role of expert judgement. The proposed contribution lies in embedding the conservation reasoning chain itself—not only documentation records—into element-based HBIM properties.

Aim, scope and evidence base

This research defines a pilot HBIM workflow that connects conservation evidence

metrico, documentazione fotografica, mappatura del degrado da ortofoto e caratterizzazione materica. La campagna di rilievo ha prodotto 4.429 immagini, di cui 2.221 allineate per l'elaborazione fotogrammetrica e usate per generare ortofoto per la mappatura delle patologie visibili e delle osservazioni diagnostiche (Fig. 1).

Nove campioni FTIR hanno fornito informazioni materiche per aree selezionate. Non erano finalizzati a caratterizzare l'intero monumento, ma a testare come evidenze basate su campioni possano essere collegate a *record* conservativi a livello di elemento. Questa struttura costituisce la base per connettere *output* di rilievo, mappe del degrado, campioni materici e *record* diagnostici al ragionamento conservativo nel *workflow* HBIM.

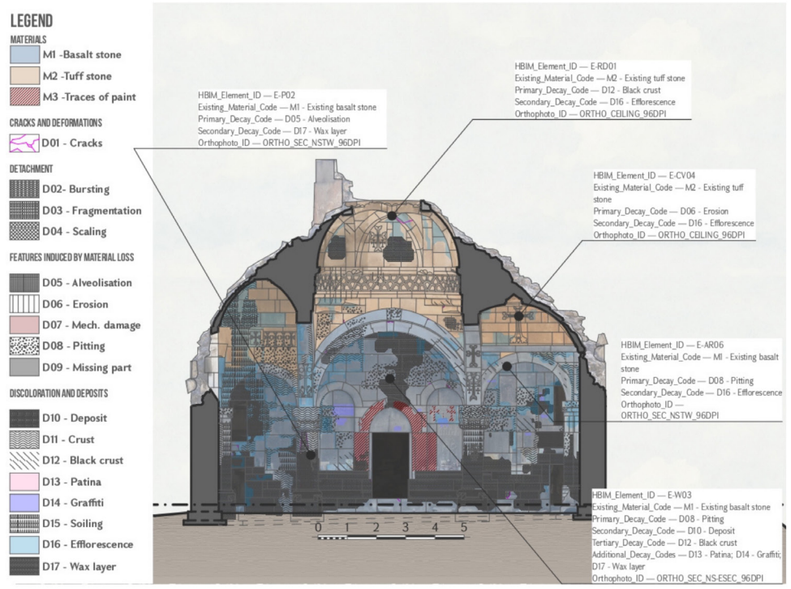


Fig. 1: Mappatura dei materiali e del degrado della sezione N–S orientale.

Fig. 1: Material and decay mapping of the N–S eastern section.

Workflow HBIM per il supporto decisionale

Il *workflow* organizza il ragionamento conservativo in cinque livelli collegati: evidenze, diagnosi, vincoli, opzioni di intervento e tracciabilità decisionale (Fig. 2). Tali livelli mantengono il legame tra osservazione, interpretazione, principi conservativi e azione selezionata. Nel *proof-of-concept*, essi sono tradotti in gruppi di proprietà personalizzati associati a elementi HBIM selezionati, consentendo di interrogare ogni componente insieme alle relative evidenze, diagnosi e logica di intervento.

Il livello delle evidenze registra ortofoto, fotografie, degrado mappato, dati di rilievo e analisi materiche, ciascuno associato a

to decision-support logic within the digital model. The approach links survey data, mapped deterioration, diagnostic attributes, constraints and admissible intervention options.

The workflow is tested on the *gavit* of Neghuts Monastery, a medieval masonry structure in Kotayk Province, Armenia. The case study offers a compact but complex conservation context, with irregular geometry, material stratification and multiple deterioration forms. The N–S eastern section was selected as the demonstrator because it includes walls, arches, vaults and dome-related elements within one analytical view.

For the pilot, the information structure was applied to selected architectural elements and mapped deterioration zones, rather than full stone-by-stone granularity, because the objective was to test decision traceability at the scale of reasoning and intervention planning. The evidence base combines metric survey, photographic documentation, orthophoto-based decay mapping and material characterization. The survey campaign produced 4,429 images,

un codice di riferimento, una localizzazione e, ove possibile, un livello di confidenza. Il livello diagnostico traduce tali evidenze in informazioni conservative, registrando tipo di patologia, posizione, estensione, gravità, attività e note interpretative. Separare evidenze e diagnosi è essenziale, poiché una condizione superficiale visibile può indicare cause diverse e non definisce automaticamente l'intervento corretto.



Fig. 2: Workflow HBIM a cinque livelli per il supporto decisionale.

Fig. 2: Five-layer HBIM decision-support workflow.

Il livello dei vincoli introduce principi conservativi che condizionano le azioni possibili, inclusi compatibilità materica, minimo intervento, reversibilità ove possibile, autenticità e riduzione del rischio a lungo termine [ICOMOS, 1964; ICOMOS, 1994; ICOMOS ISCARSAH, 2003]. Tali principi possono escludere, limitare o qualificare le opzioni di intervento prima della classificazione. Il livello delle opzioni di intervento registra azioni ammissibili quali monitoraggio, misure preventive, pulitura localizzata, ristilatura dei giunti o consolidamento, mentre il livello della tracciabilità decisionale collega l'azione preferita alle evidenze, alla diagnosi e ai vincoli che la supportano.

Il *workflow* supporta quindi la revisione rendendo il ragionamento conservativo esplicito, comparabile e tracciabile all'interno del modello.

Filtro dei vincoli e confronto MCDA

Dopo la diagnosi e la definizione dei vincoli, il *workflow* confronta i possibili interventi tramite una logica in due fasi. La prima è un filtro a vincoli rigidi. Le azioni in conflitto con i principi conservativi o con le condizioni materiche sono escluse prima del punteggio.

of which 2,221 were aligned for photogrammetric processing and used to generate orthophotos for mapping visible pathologies and diagnostic observations (Fig. 1).

Nine FTIR samples provided material information for selected areas. They were not intended to characterize the whole monument, but to test how sample-based evidence can be linked to element-level conservation records. This structure provides the basis for connecting survey outputs, decay maps, material samples and diagnostic records to conservation reasoning within the HBIM workflow.

HBIM decision-support workflow

The workflow organizes conservation reasoning into five linked layers: evidence, diagnosis, constraints, intervention options and decision trace (Fig. 2). These layers preserve the connection between observation, interpretation, conservation principles and selected action. In the proof-of-concept, they are translated into custom

Ciò vale, ad esempio, per trattamenti incompatibili con la fabbrica storica, eccessivamente invasivi, non sufficientemente reversibili ove richiesto, o non supportati dalle evidenze disponibili. In tal modo, il *workflow* evita di classificare opzioni che non dovrebbero essere considerate ammissibili fin dall'inizio.

Solo le opzioni residue passano alla seconda fase, basata su una *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) semplificata, famiglia di metodi usati per strutturare decisioni con criteri multipli e in parte conflittuali [Belton and Stewart, 2002; Ferretti et al., 2014]. La MCDA è adottata perché le scelte conservative non possono in genere essere ridotte a un solo parametro tecnico. Nel *workflow* pilota, gli interventi ammissibili sono confrontati secondo cinque criteri: mitigazione del rischio, compatibilità materica, reversibilità, fattibilità e coerenza conservativa. Quest'ultima indica qui il grado in cui un'opzione ammissibile supporta gli obiettivi conservativi specifici dell'elemento, dopo che le azioni non conformi sono già state escluse dal filtro a vincoli rigidi.

Ogni opzione riceve un punteggio da 1 a 5 per ciascun criterio, e il valore finale è calcolato moltiplicando ogni punteggio per il peso assegnato e sommando i punteggi ponderati. I pesi pilota sono: mitigazione del rischio 0,30, compatibilità materica 0,25, reversibilità 0,20, fattibilità 0,15 e coerenza conservativa 0,10. Questi valori dimostrativi privilegiano la riduzione del rischio, evitando al contempo azioni che possano danneggiare, falsificare o entrare in conflitto materico con la fabbrica storica. Richiedono validazione esperta prima della pianificazione finale degli interventi; la MCDA è qui usata come dispositivo trasparente di strutturazione, non come modello prescrittivo validato. I punteggi numerici vanno quindi letti come *output* dimostrativi della struttura informativa proposta, non come prescrizioni conservative validate; nelle applicazioni future, la procedura di attribuzione dei punteggi dovrebbe essere calibrata tramite gruppi di esperti e protocolli di valutazione documentati.

Il risultato è un insieme classificato di raccomandazioni che mostra perché un'opzione ammissibile risulti migliore di un'altra, rende visibile l'incertezza e supporta la revisione esperta prima della conferma di qualsiasi intervento (Fig. 3).

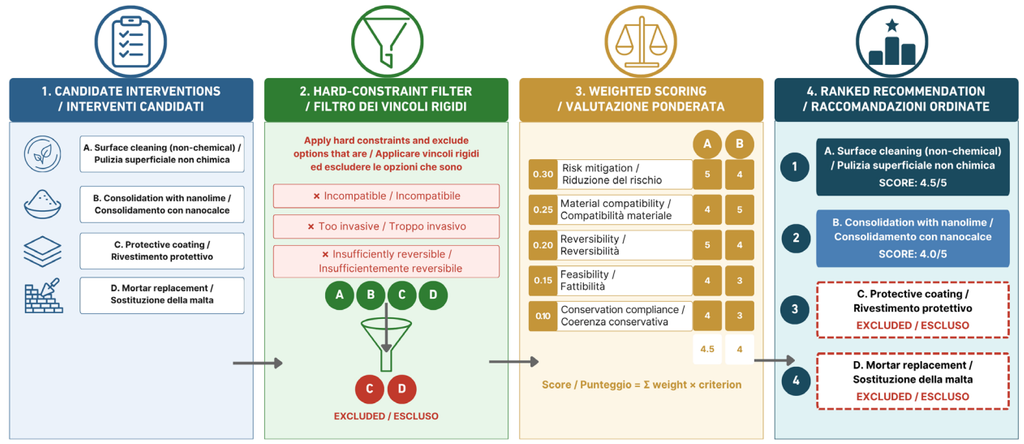


Fig. 3: Valutazione degli interventi in due fasi: filtro dei vincoli e confronto MCDA.

Fig. 3: Two-stage intervention assessment: constraint filtering and MCDA comparison.

property groups attached to selected HBIM elements, allowing each component to be queried together with its evidence, diagnosis and intervention reasoning.

The evidence layer records orthophotos, photographs, mapped decay, survey records and material analyses, each associated with a reference code, location and, where possible, confidence level. The diagnosis layer translates this evidence into conservation information by recording pathology type, position, extent, severity, activity and interpretative notes. Separating evidence from diagnosis is essential because a visible surface condition may indicate several causes and does not automatically define the correct intervention. The constraint layer introduces conservation principles that condition possible action, including material compatibility, minimum intervention, reversibility where possible, authenticity and long-term risk reduction [ICOMOS, 1964; ICOMOS, 1994; ICOMOS ISCARSAH, 2003]. These principles can exclude, limit or qualify intervention options before ranking. The intervention-options layer records admissible actions such as monitoring, preventive measures, localized cleaning, repointing or consolidation, while the decision-trace layer links the preferred action to the evidence, diagnosis and constraints that support it. The workflow therefore supports review by making conservation reasoning explicit, comparable and traceable within the model.

Proof-of-concept in Archicad e scheda di intervento rappresentativa

Il *workflow* è stato testato come *proof-of-concept* in Archicad tramite l'arricchimento semantico di elementi HBIM selezionati nella sezione orientale N–S del *gavit* di Neghuts. Il modello è stato considerato non solo come ricostruzione geometrica, ma come registro conservativo strutturato in cui ogni elemento selezionato collega evidenze, diagnosi, informazioni materiche, vincoli e ragionamento di intervento (Fig. 4). L'implementazione resta selettiva e va quindi intesa come dimostratore, non come *database* conservativo completo dell'intero monumento.

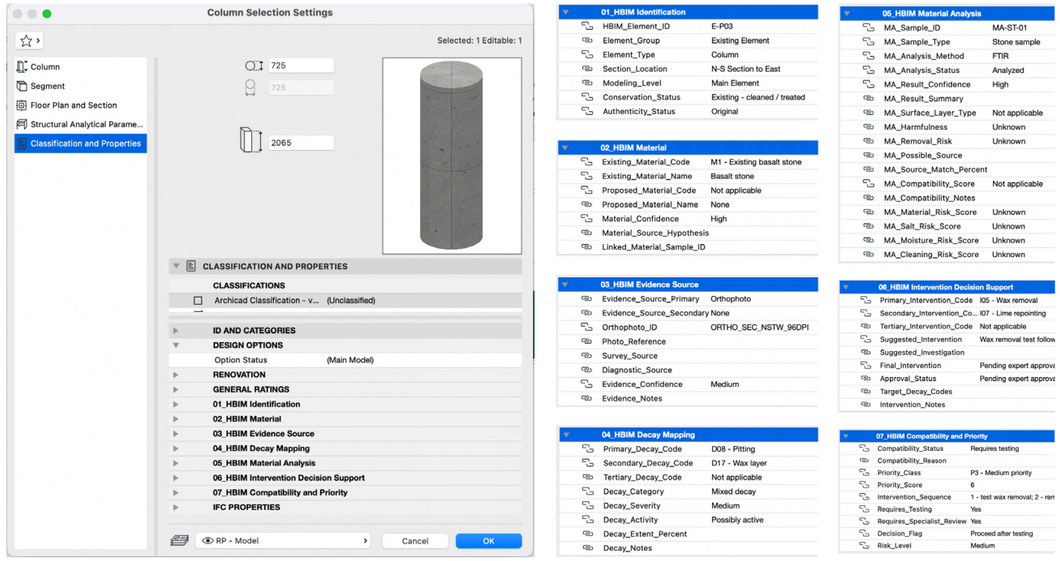


Fig. 4: Gruppi di proprietà Archicad personalizzati per le schede conservative HBIM.

Fig. 4: Custom Archicad property groups for HBIM conservation records.

La configurazione in Archicad usa gruppi di proprietà HBIM personalizzati assegnati a elementi selezionati, relativi a identificazione, informazioni materiche, fonte delle evidenze, mappatura del degrado, analisi materiche, supporto all'intervento e campi di compatibilità o priorità. Quattro identificativi collegati strutturano il *record*: E-ID per l'elemento architettonico, D-ID per la patologia o condizione diagnostica, S-ID per evidenze materiche o da campione, e I-ID per l'intervento proposto. Insieme, mantengono connessi *output* di rilievo, mappatura del degrado, informazioni materiche e proposte di intervento nello stesso ambiente HBIM. Sebbene implementata in Archicad, la logica degli identificativi è indipendente dal *software* e trasferibile ad altri ambienti HBIM tramite attributi elemento o *set* di proprietà equivalenti.

Constraint filtering and MCDA comparison

After diagnosis and constraint definition, the workflow compares possible interventions through a two-stage logic. The first stage is a hard-constraint filter. Actions that conflict with conservation principles or material conditions are excluded before scoring. This applies, for example, to treatments that are incompatible with the historic fabric, excessively invasive, insufficiently reversible where reversibility is required, or unsupported by available evidence. In this way, the workflow avoids ranking options that should not be considered admissible in the first place.

Only the remaining options enter the second stage, based on a simplified Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), a family of methods used to structure decisions involving multiple and partly conflicting criteria [Belton and Stewart, 2002; Ferretti et al., 2014]. MCDA is used because conservation choices cannot usually be reduced to one technical parameter. In the pilot workflow, admissible interventions are compared through five criteria: risk mitigation, material compatibility, reversibility, feasibility and conservation compliance. Conservation compliance refers here to the degree to which an admissible option supports the specific conservation objectives of the element after non-compliant actions have already been excluded by the hard-constraint filter. Each option is scored from 1 to 5 for every criterion, and the final value is calculated by multiplying each score by its assigned weight and summing the weighted scores. The pilot weights are: risk mitigation 0.30, material compatibility 0.25, reversibility 0.20, feasibility 0.15 and conservation compliance 0.10. These demonstrative values prioritize risk reduction while avoiding actions that may damage, falsify or materially conflict with the historic fabric. They require expert validation before final intervention planning; MCDA is used here

Un esempio rappresentativo è l'elemento E-P03, colonna esistente in basalto nella sezione orientale N–S. Il *record* diagnostico identifica *pitting* e uno strato di cera come principali condizioni superficiali. Nel livello dei vincoli, puliture chimiche aggressive, rivestimenti incompatibili o trattamenti poco reversibili sono esclusi perché potrebbero alterare la superficie lapidea storica o non sono sufficientemente giustificati dalle evidenze disponibili.

Le opzioni ammissibili restano quindi limitate ad azioni a basso impatto, quali pulitura superficiale non chimica, monitoraggio e, ove necessario, consolidamento localizzato dopo test preliminari. Per questo elemento, l'azione preferita può essere registrata come pulitura superficiale non chimica controllata, con rimozione della cera solo dove la sua presenza è confermata, seguita da revisione post-trattamento. Il consolidamento resta condizionale e va considerato solo se ulteriori verifiche confermano debolezza materica.

Questa raccomandazione è archiviata come *record* di intervento tracciabile, collegato a elemento, condizione diagnostica, evidenze di origine e vincoli conservativi (Fig. 5), consentendo agli specialisti di rivedere l'azione proposta, le evidenze di supporto, le alternative escluse e l'incertezza residua prima dell'attuazione.

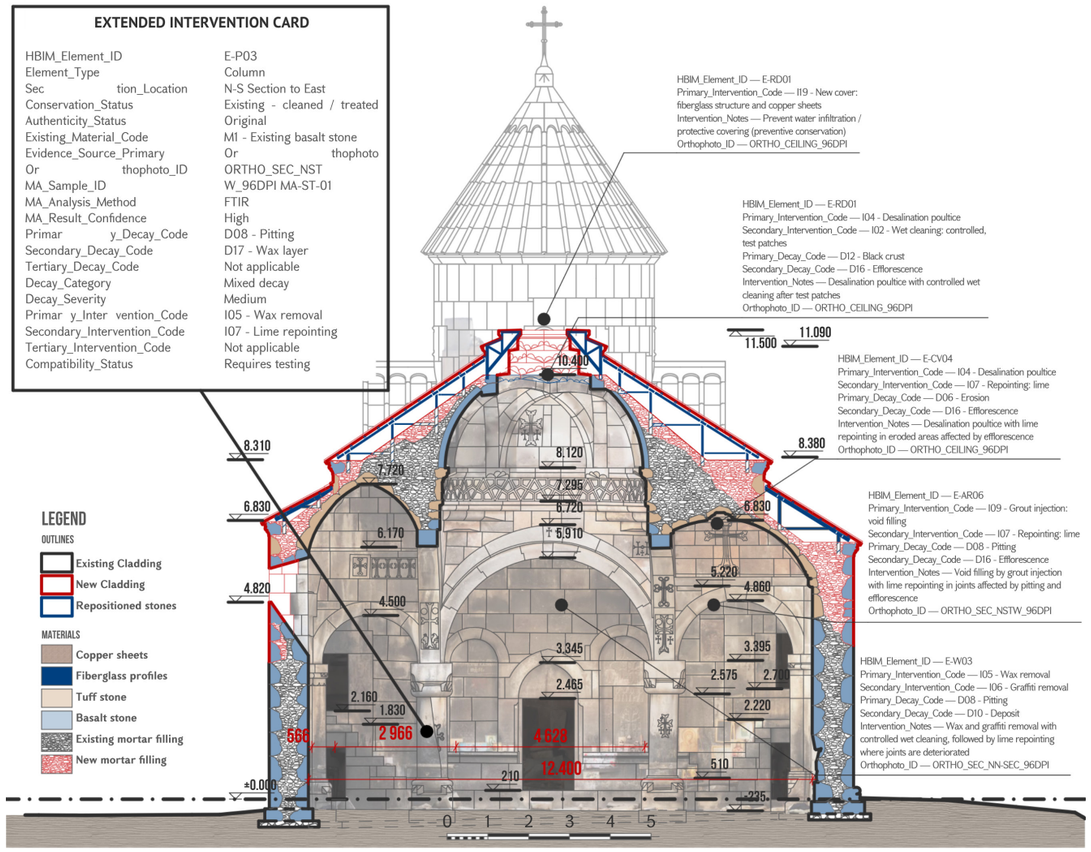


Fig. 5: Scheda di intervento rappresentativa per l'elemento E-P03.

Fig. 5: Representative intervention record for element E-P03.

Risultati, limiti e sviluppi futuri

Il *workflow* pilota produce tre *output*: un *record* di intervento, una scheda decisionale e un insieme classificato di raccomandazioni. Il *record* di intervento sintetizza identificativo dell'elemento, condizione diagnostica, evidenze collegate, opzioni ammissibili, azione preferita e nota d'incertezza. La scheda decisionale organizza tali informazioni per elemento, patologia o tipo di intervento, riportando priorità conservativa, stato delle evidenze, azione proposta e requisiti di revisione [ICOMOS, 1996]. L'insieme classificato di raccomandazioni elenca solo le opzioni ammissibili dopo il filtro dei vincoli e il confronto MCDA.

Il loro valore risiede nel preservare il ragionamento evidenziale e diagnostico che sostiene ciascuna azione proposta, affinché possa essere riesaminato, aggiornato o rivisto nelle future fasi conservative [Belton and Stewart, 2002; Pedersoli et al., 2016].

Il *workflow* resta un'implementazione pilota, non un sistema completo di supporto decisionale. È stato testato su elementi selezionati del *gavit* di Neghuts, ma non ancora applicato sistematicamente a tutti i componenti architettonici del monumento. La componente MCDA va quindi intesa come test procedurale, non come modello decisionale validato.

Sviluppi futuri dovrebbero estendere la struttura delle proprietà all'intero modello HBIM, validare criteri, pesi e punteggi con esperti della conservazione e migliorare interrogazione, reportistica e interoperabilità con *workflow* più ampi di gestione conservativa.

Conclusioni

Il contributo ha proposto un *workflow* HBIM pilota per il supporto decisionale alla conservazione, testato su elementi selezionati del *gavit* del Monastero di Neghuts. Il *workflow* collega evidenze di rilievo, interpretazione diagnostica, vincoli conservativi, opzioni di intervento ammissibili e tracciabilità decisionale in un'unica struttura basata sul modello.

Il contributo principale consiste nel passaggio dall'HBIM come archivio documentativo all'HBIM come ambiente verificabile per il ragionamento conservativo. Il pilota resta limitato per scala, ma dimostra la fattibilità di collegare gli interventi proposti alla loro base evidenziale. Gli sviluppi futuri dovrebbero estendere il *workflow* all'intero monumento, validare criteri, pesi e punteggi della MCDA con esperti della conservazione e migliorare l'interoperabilità con processi più ampi di gestione del patrimonio.

Ringraziamenti

La ricerca è stata sostenuta dal Comitato per l'Istruzione superiore e la Scienza del Ministero dell'Istruzione, della Scienza, della Cultura e dello Sport della Repubblica d'Armenia (progetto di ricerca n. 25AA-2A060).

as a transparent structuring device, not as a validated prescriptive model. The numerical scores should therefore be read as demonstrative outputs of the proposed information structure, not as validated conservation prescriptions; in future applications, scoring should be calibrated through expert panels and documented assessment protocols.

The result is a ranked set of recommendations that shows why one admissible option performs better than another, makes uncertainty visible and supports expert review before any intervention is confirmed (Fig. 3).

Archicad proof-of-concept and representative intervention record

The workflow was tested as a proof of concept in Archicad through the semantic enrichment of selected HBIM elements in the N–S eastern section of the Neghuts *gavit*. The model was treated not only as a geometric reconstruction, but as a structured conservation register in which each selected element links evidence, diagnosis, material information, constraints and intervention reasoning (Fig. 4). The implementation remains selective and should therefore be understood as a demonstrator rather than a complete conservation database for the whole monument.

The Archicad setup uses custom HBIM property groups assigned to selected elements, covering identification, material information, evidence source, decay mapping, material analysis, intervention support and compatibility or priority fields. Four linked identifiers structure the record: E-ID for the architectural element, D-ID for the pathology or diagnostic condition, S-ID for material or sample-based evidence, and I-ID for the proposed intervention. Together, they keep survey outputs, decay mapping, material information and intervention proposals connected within the same HBIM environment. Although implemented in Archicad, the identifier logic is software-independent and could be transferred to other HBIM environments through equivalent element attributes or property sets.

A representative example is element E-P03, an existing basalt column in the N–S eastern section. The diagnostic record identifies pitting and a wax layer as the main surface conditions. In the constraint layer, aggressive chemical cleaning, incompatible coatings or poorly reversible treatments are excluded because they could affect the historic stone surface or are not sufficiently justified by the available evidence.

The admissible options therefore remain limited to lower-impact actions, such as non-chemical surface cleaning, monitoring and, where necessary, localized consolidation after preliminary testing. For this element, the preferred action can be recorded as controlled non-chemical surface cleaning, including wax removal only where its presence is confirmed, followed by post-treatment review. Consolidation remains conditional and should only be considered if material weakness is verified through additional assessment.

This recommendation is stored as a traceable intervention record connected to the element, diagnostic condition, source evidence and conservation constraints (Fig. 5), allowing specialists to review the proposed action, supporting evidence, excluded alternatives and remaining uncertainty before implementation.

Bibliografia

Belton V., Stewart T.J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Ferretti V., Bottero M., Mondini G. (2014). Decision making and cultural heritage: An application of the Multi-Attribute Value Theory for the reuse of historical buildings. In *Journal of Cultural Heritage, 15(6)*, pp. 644–655.

ICOMOS. (1964). *International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964)*. Venice: IInd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments.

ICOMOS. (1994). *The Nara Document on Authenticity*. Nara: ICOMOS.

ICOMOS. (1996). *Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites*. Sofia: ICOMOS.

ICOMOS ISCARSAH. (2003). *ICOMOS Charter: Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*. Paris: ICOMOS.

Jordan-Palomar I., Tzortzopoulos P., García-Valldecabres J., Pellicer E. (2018). Protocol to manage heritage-building interventions using Heritage Building Information Modelling (HBIM). In *Sustainability, 10(4)*, 908.

Murphy M., McGovern E., Pavia S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). In *Structural Survey, 27(4)*, pp. 311–327.

Murphy M., McGovern E., Pavia S. (2013). Historic Building Information Modelling: Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 76*, pp. 89–102.

Pedersoli J.L. Jr., Antomarchi C., Michalski S. (2016). *A Guide to Risk Management of Cultural Heritage*. Rome: ICCROM; Ottawa: Canadian Conservation Institute.

Pocobelli D.P., Boehm J., Bryan P., Still J., Grau-Bové J. (2018). BIM for heritage science: A review. In *Heritage Science, 6*, 30.

Outputs, limitations and future development

The pilot workflow produces three outputs: an intervention record, a decision schedule and a ranked recommendation set. The intervention record summarizes the element identifier, diagnostic condition, linked evidence, admissible options, preferred action and uncertainty note. The decision schedule organizes this information by element, pathology or intervention type, reporting conservation priority, evidence status, proposed action and review requirements [ICOMOS, 1996]. The ranked recommendation set lists only admissible options after constraint filtering and MCDA comparison.

Their value lies in preserving the evidential and diagnostic reasoning that supports each proposed action, so that it can be reviewed, updated or revised during future conservation phases [Belton and Stewart, 2002; Pedersoli et al., 2016].

The workflow remains a pilot implementation rather than a complete decision-support system. It has been tested on selected

elements of the Neghuts *gavit*, but not yet applied systematically to all architectural components of the monument. The MCDA component should therefore be understood as a procedural test rather than a validated decision model.

Further development should extend the property structure to the complete HBIM model, validate the criteria, weights and scores with conservation experts, and improve querying, reporting and interoperability with broader conservation-management workflows.

Conclusion

This paper proposed a pilot HBIM workflow for conservation decision support, tested on selected elements of the Neghuts Monastery *gavit*. The workflow links survey evidence, diagnostic interpretation, conservation constraints, admissible intervention options and decision trace within a single model-based structure.

Its main contribution is the shift from HBIM as a documentation repository toward HBIM as a reviewable environment for conservation reasoning. The pilot remains limited in scale, but demonstrates the feasibility of linking proposed interventions to their evidential basis. Future development should extend the workflow to the full monument, validate the MCDA criteria, weights and scores with conservation experts, and improve interoperability with broader heritage-management processes.

Acknowledgements

The research was supported by the Higher Education and Science Committee of MESCS RA (Research project № 25AA-2A060).

Autori

Dmitri Jilin[1]

Email

jilin@meixner.com

[1] Meixner Vermessung ZT GmbH, società di ingegneria catastale e topografia, Vienna

Keywords

HBIM
COMPLEX TRANSFORMATION
ART NOUVEAU ARCHITECTURE
RESTORATION
CULTURAL HERITAGE

Metamorfosi di un complesso in stile liberty viennese

Metamorphosis of a Viennese Art Nouveau Complex

Abstract

La modellazione HBIM dell'area Otto Wagner documenta edifici storici in stile liberty, supportando restauro, gestione e trasformazione del complesso in un sito multifunzionale aperto, nel rispetto della tutela monumentale.

The HBIM modelling of the Otto Wagner Areal documents historic *Art Nouveau* buildings and supports the restoration, management, and transformation of the complex into an open multifunctional site while ensuring compliance with heritage protection requirements.

Descrizione del complesso

L'Otto Wagner Areal (OWA), noto storicamente come Steinhof, si trova nella periferia occidentale di Vienna. Il nome deriva dall'antica attività estrattiva presente nell'area, utilizzata come cava di pietra. Il complesso dell'ex ospedale psichiatrico fu realizzato tra il 1905 e il 1907 sotto la direzione di Carlo von Boog, con la collaborazione di Franz Berger e di Otto Wagner, figura centrale dell'*Art Nouveau* austriaca. [Architektenlexikon, 2026; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015.; Wikipedia, 2026a] L'impianto segue il modello ospedaliero a padiglioni, considerato all'epoca il più moderno dal punto di vista igienico e terapeutico. I sessanta edifici sono distribuiti su terrazze lungo il versante meridionale del Gallitzinberg e organizzati attorno a un asse centrale. Lungo tale asse si trovano gli edifici amministrativi, il teatro in stile liberty, la cucina centrale e la celebre chiesa di Steinhof progettata da Otto Wagner, mentre ai lati si sviluppano i padiglioni di degenza, prevalentemente a pianta a U. [Joerg-Ronceray, 2022; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015.; Wikipedia, 2026] L'intero complesso occupa circa 51 ettari, mentre l'area centrale (Fig. 1) oggetto della modellazione BIM comprende 34 edifici distribuiti su 27,2 ettari. La chiesa non rientra nel progetto BIM descritto in questo contributo. La superficie edificata rappresenta circa il 14% dell'area totale, mentre il 26% è destinato a percorsi e infrastrutture e il restante 60% a spazi verdi. La superficie costruita complessiva è stimata in circa 115.000 m². Questa distribuzione spaziale è rimasta sostanzialmente invariata dalla conclusione dei lavori nel 1907. [Fruhauf, 2026; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015]

Description of the Complex

The Otto Wagner Areal (OWA), historically known as Steinhof, is located on the western outskirts of Vienna. The name derives from the former quarrying activities carried out on the site, which was historically used as a stone quarry. The former psychiatric hospital complex was constructed between 1905 and 1907 under the direction of Carlo von Boog, with the collaboration of Franz Berger and Otto Wagner, one of the leading figures of Austrian *Art Nouveau*. [Architektenlexikon, 2026; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] The layout follows the pavilion hospital model, which at the time was considered the most advanced solution from both hygienic and therapeutic perspectives. The sixty buildings are distributed across terraces along the southern slope of the Gallitzinberg hill and organized around a central axis. Along this axis are located the administrative buildings, the *Art Nouveau* theatre, the central kitchen, and the famous Church of Steinhof designed by Otto Wagner, while the patient

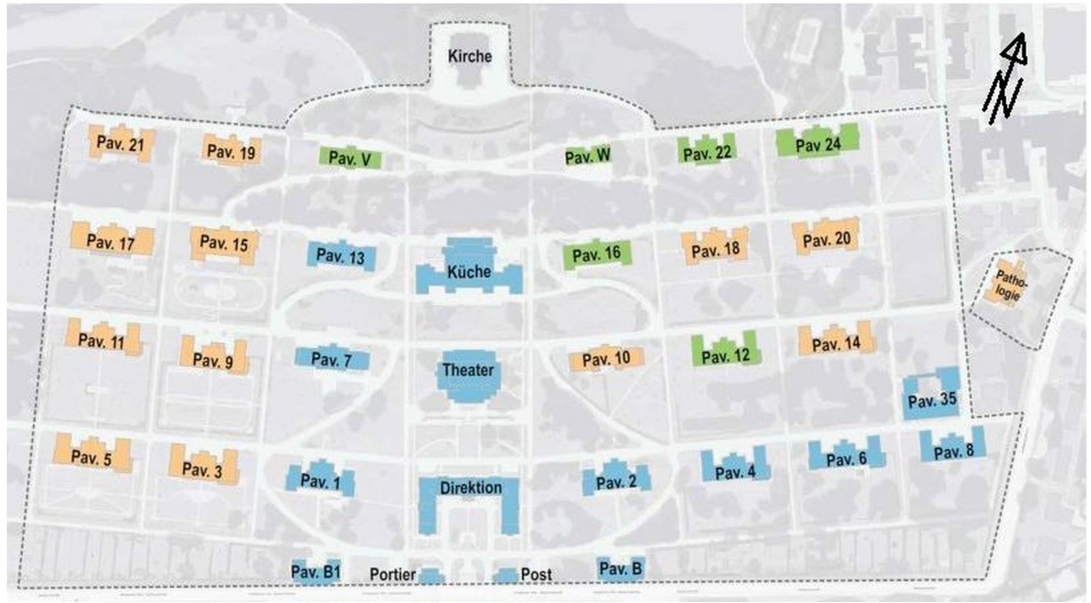


Fig. 1: Area centrale di OWA. (D. H. Fruhauf, *THE FUTURE, OWA HELLO!*, Vienna: OWA, 2026).
Fig. 1: OWA central area. (D. H. Fruhauf, *THE FUTURE, OWA HELLO!*, Vienna: OWA, 2026).

Storia della struttura

Nel 1904 il Parlamento della Bassa Austria avviò la realizzazione di una nuova struttura destinata a sostituire il precedente ospedale psichiatrico di Vienna. Carlo von Boog elaborò il concetto generale dell'insediamento, mentre Franz Berger collaborò alla progettazione e alla direzione dei lavori. Otto Wagner ricevette invece l'incarico della progettazione della chiesa e del relativo apparato decorativo. [Architektenlexikon, 2026; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015; Wikipedia, 2026a] La collaborazione tra Wagner e von Boog fu caratterizzata da frequenti tensioni. Wagner vedeva Steinhof come un'opera d'avanguardia capace di esprimere una nuova architettura moderna, mentre von Boog privilegiava l'efficienza economica richiesta a una struttura pubblica finanziata dallo Stato. Dopo la morte di von Boog nel 1905, la direzione dei lavori passò a Berger, che proseguì la collaborazione con Wagner in modo più equilibrato. [Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] Gli edifici furono realizzati principalmente in muratura di laterizio con intonaci decorati, pietra naturale, ferro, vetro, legno e dettagli in rame. Per alcuni elementi di particolare pregio venne impiegato marmo di Carrara. La costruzione richiese la movimentazione di circa 300.000 tonnellate di materiale e comportò la realizzazione di terrazzamenti, infrastrutture ferroviarie temporanee e un intenso sfruttamento della cava esistente. Gli operai vivevano in baracche sul posto e lavoravano spesso oltre dodici ore al giorno; nel 1906 si verificarono anche scioperi. [Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] All'inaugurazione del 1907 il complesso venne descritto dalla stampa come uno dei più grandi e moderni ospedali psichiatrici d'Europa. La struttura era progettata per accogliere fino a 2.200 pazienti e rappresentava un esempio innovativo di collaborazione interdisciplinare tra architetti, medici, tecnici e amministratori pubblici. Anche il paesaggio era concepito come parte integrante del processo terapeutico: i giardini terrazzati offrivano ampie viste sulla città garantendo al contempo la privacy dei degenti. [Joerg-Ronceray, 2022; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015; Wikipedia, 2026] Dopo la Prima guerra mondiale il settore occidentale destinato ai pazienti privati fu trasformato in un sanatorio polmonare indipendente composto da dieci padiglioni. [Joerg-Ronceray, 2022; Wikipedia, 2026]

Il periodo nazionalsocialista

Durante il regime nazionalsocialista il complesso fu coinvolto direttamente nelle politiche di persecuzione ed eliminazione delle persone considerate "indegne di vivere". Numerosi pazienti furono sottoposti a sterilizzazione forzata e, nel 1940, circa 3.200 ricoverati furono trasferiti nell'ambito dell'*Aktion T4* verso i centri di sterminio. [DÖW, 2026] Diversi padiglioni liberati furono convertiti nell'istituto giovanile "Am Spiegelgrund", tristemente noto per il programma di eutanasia infantile. Nel Padiglione 23 fu inoltre istituito un centro di lavoro forzato per donne considerate "asociali", sottoposte a disciplina estremamente severa, punizioni fisiche e isolamento. Molte persone morirono anche durante le successive operazioni di elimina-

History of the Facility

In 1904, the Lower Austrian Parliament initiated the construction of a new institution intended to replace Vienna's existing psychiatric hospital. Carlo von Boog developed the overall concept of the settlement, while Franz Berger collaborated in both design and construction management. Otto Wagner was commissioned to design the church and its decorative programme. [Architektenlexikon, 2026; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] The collaboration between Wagner and von Boog was marked by frequent tensions. Wagner regarded Steinhof as an avant-garde project capable of expressing a new modern architecture, whereas von Boog prioritised the economic efficiency required of a publicly funded institution. Following von Boog's death in 1905, construction management passed to Berger, who continued the collaboration with Wagner in a more balanced manner. [Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] The buildings were constructed primarily using brick masonry, decorated plasterwork, natural stone, iron, glass, timber, and copper detailing. Carrara marble was employed for selected high-quality architectural elements. Construction required the movement of approximately 300,000 tonnes of material and involved extensive terracing of the hillside, temporary railway infrastructure, and intensive exploitation of the existing quarry. Workers lived in wards are arranged on either side, predominantly with U-shaped floor plans. [Joerg-Ronceray, 2022; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] The entire complex covers approximately 51 hectares, while the central area (Fig. 1) included in the BIM project comprises 34 buildings distributed over 27.2 hectares. The church is not included in the BIM project discussed in this paper. Built structures account for approximately 14% of the total area, while 26% is occupied by circulation routes and infrastructure and the remaining 60% consists of green spaces. The total built floor area is estimated at approximately 115,000 m². This spatial distribution has remained largely unchanged since the completion of the complex in 1907. [Fruhauf, 2026; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015]

zione legate all'*Aktion Brandt*. [DÖW, 2026] I resti anatomici di alcune vittime furono utilizzati a fini scientifici e conservati per decenni. Soltanto nel 2002 e nel 2012 essi ricevettero una degna sepoltura nel Cimitero Centrale di Vienna. [DÖW, 2026]

Dal dopoguerra alla trasformazione contemporanea

Negli anni Sessanta l'istituto assunse il nome di ospedale psichiatrico Baumgartner Höhe. Nel linguaggio popolare viennese i nomi Steinhof e Baumgartner Höhe divennero progressivamente sinonimi di ospedale psichiatrico. A partire dal 2012 la Città di Vienna annunciò il trasferimento graduale delle attività sanitarie, ritenendo il complesso non più adeguato alle esigenze della psichiatria contemporanea. La prospettiva di una nuova destinazione d'uso generò un ampio dibattito pubblico, culminato in un processo di mediazione che definì alcuni principi fondamentali per il futuro sviluppo dell'area: mantenimento della proprietà pubblica, tutela del patrimonio monumentale, assenza di nuove edificazioni nell'area centrale e accessibilità pubblica del sito. [Fruhauf, 2026; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] Nel 2020 il Consiglio Comunale di Vienna approvò il rinnovamento delle infrastrutture tecniche e affidò la gestione del processo di trasformazione alla Otto Wagner Areal Revitalisierung GmbH. Due anni più tardi fallì il progetto di trasferimento della Central European University (CEU) nel complesso. Secondo l'università, l'inserimento delle moderne funzioni accademiche avrebbe richiesto interventi incompatibili con la tutela monumentale degli edifici storici. I costi di adeguamento furono stimati in circa 700 milioni di euro. [APA, 2022; Fruhauf, 2026; Kurier, 2022] Nel 2025 la Città di Vienna e la Musik und Kunst Privatuniversität der Stadt Wien (MUK) presentarono un nuovo progetto di riutilizzo che prevede il trasferimento dell'università musicale in parte del complesso. Restano invariati i principi stabiliti nel 2012: nessuna nuova edificazione nell'area centrale, conservazione del patrimonio storico, limitazione del traffico automobilistico e valorizzazione delle qualità ecologiche e culturali del sito. [Fruhauf, 2026]

Progetto BIM e rilievo digitale

Nel 2023 Otto Wagner Areal bandì una gara europea per il rilievo digitale e la modellazione BIM dell'area centrale del complesso. L'appalto prevedeva la realizzazione di scansioni laser complete degli edifici e la produzione di modelli BIM con livello di sviluppo LOD 300, destinati a costituire la base informativa per i successivi interventi di conservazione, progettazione e gestione del patrimonio edilizio. [Pott & Böhm, 2023; Schramm Öhler Rechtsanwälte, 2023] L'incarico fu affidato a Meixner ZT GmbH, storico studio viennese di ingegneria geodetica fondato nel 1939. Il progetto venne suddiviso in sei lotti comprendenti cinque edifici ciascuno. Il Padiglione 8 fu utilizzato come progetto pilota e sottoposto a verifica da parte di OFFICE FOR DIGITAL ENGINEERING (ODE), società responsabile anche della redazione del capitolato informativo e delle specifiche tecniche. [Meixner Vermessung ZT GmbH, 2026; Pott & Böhm, 2023] Le principali norme di riferimento adottate nel progetto comprendevano la ISO 16739:2018 per il formato IFC, la ÖNORM A6240 per la documentazione CAD, la ÖNORM A6241 per la modellazione BIM e la ÖNORM A6250 per il rilievo e la documentazione degli edifici storici. Tali standard hanno garantito la compatibilità dei modelli con i successivi processi di gestione e conservazione del patrimonio costruito. [Pott & Böhm, 2023]

on-site barracks and frequently worked more than twelve hours per day; strikes also occurred in 1906. [Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] Upon its inauguration in 1907, the complex was described by contemporary newspapers as one of the largest and most modern psychiatric hospitals in Europe. The institution was designed to accommodate up to 2,200 patients and represented an innovative example of interdisciplinary collaboration among architects, physicians, engineers, and public administrators. The landscape itself was conceived as an integral component of the therapeutic process: the terraced gardens offered extensive views of the city while simultaneously ensuring patient privacy. [Joerg-Ronceray, 2022; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] Following the First World War, the western sector originally intended for private patients was converted into an independent pulmonary sanatorium consisting of ten pavilions. [Joerg-Ronceray, 2022; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015]

The National Socialist Period

During the National Socialist regime, the complex became directly involved in policies aimed at the persecution and extermination of individuals considered "unworthy of life." Numerous patients were subjected to forced sterilisation and, in 1940, approximately 3,200 patients were transferred under the *Aktion T4* programme to extermination centres. [DÖW, 2026] Several vacated pavilions were converted into the youth institution "Am Spiegelgrund," which became notorious for its child euthanasia programme. Pavilion 23 was additionally transformed into a forced labour facility for women classified as "asocial," who were subjected to harsh discipline, corporal punishment, and solitary confinement. Many individuals also died during subsequent extermination measures associated with *Aktion Brandt*. [DÖW, 2026] The anatomical remains of some victims were used for scientific purposes and preserved for decades. Only in 2002 and 2012 were these remains finally given a dignified burial at Vienna Central Cemetery. [DÖW, 2026]

Acquisizione dei dati

Le specifiche tecniche del progetto richiedevano un livello di accuratezza particolarmente elevato. Le scansioni dovevano essere georeferenziate nella rete di riferimento ufficiale e garantire una deviazione massima di ±10 mm sull'intero sistema. La densità minima richiesta era superiore a 10 punti/cm², mentre la precisione dei singoli punti doveva risultare inferiore a 4 mm a una distanza di 25 metri. Ogni posizione di scansione doveva inoltre essere documentata mediante immagini panoramiche sferiche HDR ad alta risoluzione. [Pott & Böhm, 2023] Le attività di rilievo sono state eseguite tra maggio 2024 e aprile 2025 mediante l'impiego simultaneo di due scanner laser Leica RTC360. Per l'inquadramento geometrico è stato adottato il sistema di coordinate nazionale austriaco GK M34. La registrazione delle scansioni è stata effettuata senza l'utilizzo di sfere di riferimento, sfruttando invece corrispondenze geometriche elaborate all'interno del *software* Leica Cyclone. La georeferenziazione è stata realizzata mediante *target* piani, mentre non sono stati utilizzati né droni né sistemi di acquisizione basati su tecnologia SLAM. [Pott & Böhm, 2023]

Modellazione BIM

La modellazione è stata realizzata in Archicad adottando il cosiddetto metodo *black box*, ampiamente utilizzato nei processi HBIM per edifici storici caratterizzati da geometrie complesse e informazioni costruttive incomplete. Le nuvole di punti sono state importate direttamente nell'ambiente BIM oppure utilizzate come base per la produzione di ortomosaici e ricostruzioni geometriche di dettaglio. [Bianchini et al., 2022; Pott & Böhm, 2023] Le prescrizioni del capitolato definivano con precisione il livello di dettaglio richiesto. Gli edifici dovevano essere rappresentati in forma idealizzata, senza modellare deformazioni, cedimenti o irregolarità costruttive derivanti dall'età della struttura. Finestre e porte dovevano essere riprodotte con la corretta suddivisione e con l'indicazione del verso di apertura, mentre parapetti ed elementi metallici potevano essere semplificati purché mantenessero un adeguato valore rappresentativo. Particolare attenzione era inoltre richiesta per gli elementi decorativi principali, considerati parte integrante del valore storico e architettonico del complesso. [Pott & Böhm, 2023] Le tolleranze massime ammesse tra rilievo e modello erano pari a 20 mm per gli elementi verticali e 30 mm per gli elementi orizzontali soggetti a deformazione. La modellazione è stata supportata anche da elaborati DWG provenienti da precedenti campagne di rilievo realizzate nell'ambito del progetto CEU. Poiché non erano previsti saggi distruttivi sulle murature storiche,

From Post-War Period to Contemporary Transformation

During the 1960s, the institution was renamed Baumgartner Höhe Psychiatric Hospital. In everyday Viennese language, the names *Steinhof and Baumgartner Höhe* gradually became synonymous with psychiatric care. Beginning in 2012, the City of Vienna announced the gradual relocation of psychiatric services, considering the complex no longer suitable for the requirements of contemporary mental healthcare. The prospect of a new use for the site triggered extensive public debate, culminating in a mediation process that established several fundamental principles for its future development: retention of public ownership, protection of the historic fabric, prohibition of new construction within the central area, and public accessibility of the site. [Fruhauf, 2026; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015] In 2020, the Vienna City Council approved the renewal of the technical infrastructure and entrusted the management of the transformation process to Otto Wagner Areal Revitalisierung GmbH. Two years later, plans to relocate the Central European University (CEU) to the site failed. According to the university, the integration of modern academic functions would have required interventions incompatible with the conservation requirements of the historic buildings. Adaptation costs were estimated at approximately €700 million. [APA, 2022; Fruhauf, 2026; Kurier, 2022] In 2025, the City of Vienna and the Musik und Kunst Privatuniversität der Stadt Wien (MUK) presented a new redevelopment strategy involving the relocation of the music university to part of the complex. The principles established in 2012 remain unchanged: no new construction within the central area, preservation of the historic heritage, limitation of vehicular traffic, and enhancement of the ecological and cultural qualities of the site. [Fruhauf, 2026]

BIM Project and Digital Survey

In 2023, Otto Wagner Areal launched a European-wide tender for the digital

le pareti sono state modellate come elementi monostrato (Fig. 2) . Ogni edificio è stato sviluppato all'interno di un sistema di coordinate locale, collegato alla rete nazionale mediante punti di riferimento topografici. [Pott & Böhm, 2023] I modelli finali comprendono file nativi Archicad, modelli IFC4 *Reference View*, rapporti di controllo qualità e documentazione delle decisioni modellative adottate durante il processo di sviluppo. La produzione è stata organizzata per lotti successivi, con tempi medi compresi tra tre e quattro mesi per edificio. Nel corso del progetto è stato inoltre effettuato il passaggio da Archicad 25 ad Archicad 28 senza particolari criticità operative. [Pott & Böhm, 2023]

Ricostruzione digitale della pensilina del teatro

Un caso particolarmente significativo di applicazione del BIM al patrimonio storico riguarda la ricostruzione della pensilina originaria del teatro in stile liberty, scomparsa nel corso del XX secolo. L'intervento è stato sviluppato come supporto alle future attività di conservazione e come strumento di documentazione

survey and BIM modelling of the central section of the complex. The contract required comprehensive laser scanning of the buildings and the production of BIM models at Level of Development (LOD) 300, intended to provide the information base for future conservation, planning, and facility management activities. [Pott & Böhm, 2023; Schramm Öhler Rechtsanwälte, 2023] The contract was awarded to Meixner ZT GmbH, a long-established Viennese geomatics engineering company founded in 1939. The project was divided into six packages, each comprising five buildings. Pavilion 8 served as a pilot project and was reviewed by OFFICE FOR DIGITAL ENGINEERING (ODE), the organisation responsible for preparing both the information requirements and the technical specifications. [Meixner Vermessung ZT GmbH, 2026; Pott & Böhm, 2023] The principal standards applied included ISO

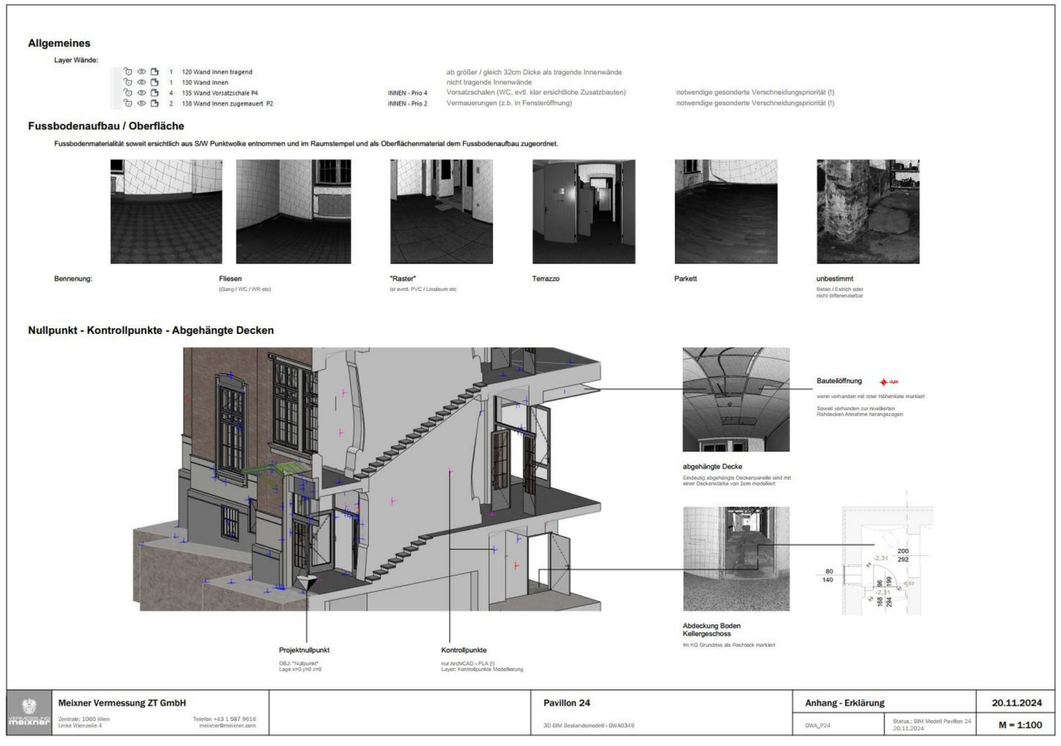


Fig. 2: Appendice al padiglione 24. (Meixner Vermessung ZT GmbH, 2024).
Fig. 2: Appendix of pavilion 24. (Meixner Vermessung ZT GmbH, 2024).

storica del complesso. [Joerg-Ronceray, 2022] Poiché non sono stati rinvenuti elaborati progettuali completi, la ricostruzione (Fig. 3) si è basata principalmente su tre fotografie storiche realizzate durante l'inaugurazione del 1907. Tali immagini sono state integrate con una sezione e una vista di facciata conservate negli archivi storici. Attraverso procedure di correzione fotogrammetrica è stato possibile ricostruire le dimensioni e le proporzioni dell'elemento architettonico, successivamente modellato in ambiente BIM e integrato nel modello digitale dell'edificio. [Joerg-Ronceray, 2022] La pensilina è inoltre legata a uno degli episodi più noti della storia dell'architettura viennese. Secondo una tradizione ampiamente riportata, durante la cerimonia inaugurale l'arciduca Francesco Ferdinando avrebbe espresso la propria preferenza per lo stile Maria Teresa, ricevendo da Otto Wagner la celebre risposta: «Ai tempi di Maria Teresa si costruiva in modo contemporaneo». Sebbene la veridicità storica dell'episodio non possa essere dimostrata con certezza, esso rappresenta simbolicamente il confronto tra storicismo e modernità che caratterizzò il dibattito architettonico dell'inizio del Novecento. [Joerg-Ronceray, 2022; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015]

16739:2018 for the IFC format, ÖNORM A6240 for CAD documentation, ÖNORM A6241 for BIM modelling, and ÖNORM A6250 for the survey and documentation of historic buildings. These standards ensured interoperability and long-term usability of the models for future conservation and management processes. [Pott & Böhm, 2023]

Data Acquisition

The technical specifications required an exceptionally high level of accuracy. All scans had to be georeferenced within the official survey network and achieve a maximum deviation of ±10 mm across the entire system. The minimum required point density exceeded 10 points/cm², while individual point accuracy had to remain below 4 mm at

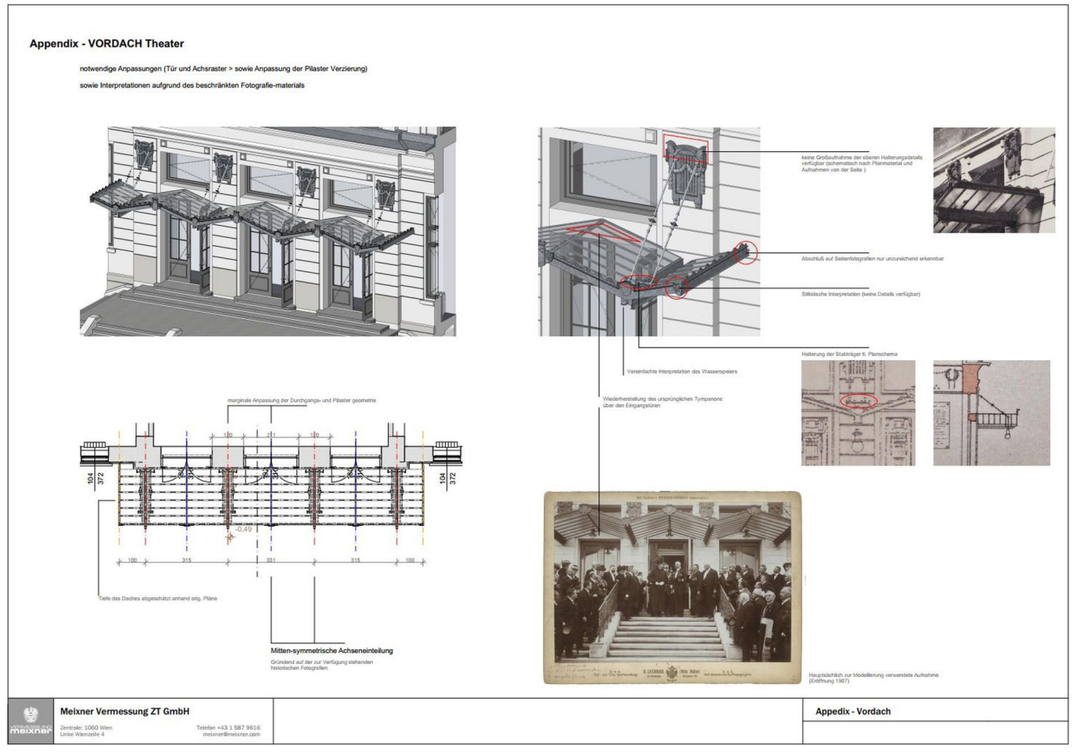


Fig. 3: Appendice della ricostruzione della tettoia storica. (Meixner Vermessung ZT GmbH, 2025).
Fig. 3: Reconstruction of the Historic Canopy. (Meixner Vermessung ZT GmbH, 2025).

Utilizzo futuro del complesso

La trasformazione dell'Otto Wagner Areal prevede il riutilizzo integrale degli edifici storici secondo una strategia che combina conservazione del patrimonio culturale, sostenibilità e nuove funzioni pubbliche. Il progetto mira a preservare l'identità storica del complesso garantendone al tempo stesso l'integrazione nella vita culturale e sociale contemporanea della città di Vienna. [Fruhauf, 2026] La Musik und Kunst Privatuniversität der Stadt Wien (MUK) occuperà quattordici padiglioni e parte degli edifici amministrativi. Il Padiglione 18 sarà adattato per ospitare gli studi artistici della Stadt Wien Kunst GmbH, mentre il Padiglione 15 diventerà la nuova sede del Dokumentationsarchiv des österreichischen Widerstandes (DÖW), contribuendo alla valorizzazione della memoria storica legata al periodo nazionalsocialista. [DÖW, 2026; Fruhauf, 2026] Parallelamente verranno eseguiti interventi di restauro delle facciate, recupero degli infissi storici, miglioramento dell'efficienza energetica e adeguamento tecnico degli edifici. Attualmente diciotto edifici dispongono già di una destinazione funzionale definita, mentre sedici restano disponibili per futuri utilizzi compatibili con il valore storico e paesaggistico del sito. [Fruhauf, 2026] Tra gli obiettivi a lungo termine figurano la certificazione secondo gli standard ÖGNI, l'implementazione di una strategia integrata di digitalizzazione e la candidatura dell'intero complesso come progetto di riferimento nell'ambito del programma *New European Bauhaus*. [Fruhauf, 2026]

Conclusioni

La modellazione BIM dell'Otto Wagner Areal rappresenta uno dei passaggi fondamentali nel processo di trasformazione dell'ex ospedale psichiatrico di Steinhof. Le attività di rilievo laser e la produzione dei modelli digitali documentano in modo sistematico lo stato del complesso prima degli interventi di recupero e costituiscono una base affidabile per la progettazione, la conservazione e la gestione futura del patrimonio costruito. [Fruhauf, 2026; Pott & Böhm, 2023] Oltre al loro valore operativo, i modelli HBIM assumono il ruolo di documentazione permanente di un patrimonio architettonico di eccezionale rilevanza storica e culturale. Essi consentono di integrare tutela monumentale, pianificazione contemporanea e gestione digitale delle informazioni, favorendo una comprensione più approfondita del complesso e delle sue trasformazioni nel tempo. [Bianchini et al., 2022] L'esperienza dell'Otto Wagner Areal dimostra come le tecnologie digitali possano contribuire in modo significativo alla conservazione e alla valorizzazione del patrimonio storico, accompagnando la metamorfosi di un'antica struttura sanitaria in un complesso aperto, multifunzionale e culturalmente attivo all'interno del contesto urbano viennese. [Fruhauf, 2026]

Bibliografia

APA. (2022). *CEU-Umzug auf Otto-Wagner-Areal gescheitert*. ORF Wien. https://wien.orf.at/stories/3162439

Architektenlexikon. (2026). *Franz Berger (1853–1938)*. https://www.architektenlexikon.at

a distance of 25 metres. Each scan position additionally had to be documented through high-resolution HDR spherical panoramic imagery. [Pott & Böhm, 2023] Survey activities were carried out between May 2024 and April 2025 using two Leica RTC360 laser scanners operating simultaneously. The Austrian national coordinate system GK M34 was adopted for georeferencing. Scan registration was performed without the use of reference spheres, relying instead on geometric correspondences processed within Leica Cyclone software. Georeferencing was achieved through planar targets, while neither UAVs nor SLAM-based acquisition systems were employed. [Pott & Böhm, 2023]

BIM Modelling

The modelling process was carried out in Archicad using the so-called black-box methodology, which is widely applied in HBIM workflows for historic buildings characterised by complex geometries and incomplete construction information. Point clouds were imported directly into the BIM environment or used as the basis for orthomosaics and detailed geometric reconstructions. [Bianchini et al., 2022; Pott & Böhm, 2023] The project specifications precisely defined the required level of detail. Buildings were to be represented in an idealised form, without modelling deformations, settlements, or age-related irregularities. Windows and doors had to be reproduced with the correct subdivisions and opening directions, while railings and metal elements could be simplified provided they retained their representative character. Particular attention was also required for the principal decorative elements, which were considered integral to the historic and architectural value of the complex. [Pott & Böhm, 2023] The maximum permitted deviations between survey data and BIM models were 20 mm for vertical elements and 30 mm for horizontal elements subject to deformation. Modelling was further supported by DWG documentation generated during previous survey campaigns undertaken for the CEU project. Since no destructive investigations of the historic masonry were permitted, walls were modelled as single-layer elements (Fig. 2). Each building was developed within a local coordinate system linked to the national reference framework through topographic control points. [Pott & Böhm, 2023] The final deliverables include native Archicad files, IFC4 Reference View models, quality-control reports, and documentation of modelling decisions adopted during the development process. Production was organised in successive project packages, requiring an average of three to four months per building. During the project, the software environment was successfully upgraded from Archicad 25 to Archicad 28 without significant operational issues. [Pott & Böhm, 2023]

Bianchini, C., et al. (2022). *HBIM Meta-Modelling: 50 (and More) Shades of Grey*. ISPRS International Journal of Geo-Information.

Dokumentationsarchiv des österreichischen Widerstandes (DÖW). (2026). *Gedenkstätte Steinhof*. https://www.doew.at

Fruhauf, D. H. (2026). *The Future, OWA Hello!* Vienna: Otto Wagner Areal Revitalisierung GmbH.

Joerg-Ronceray, M. M. (2022). *Das Jugendstiltheater am Steinhof*.

Kurier. (2022). *Warum die CEU am Otto-Wagner-Areal gescheitert ist*. https://kurier.at

Meixner Vermessung ZT GmbH. (2026). *Vermessung Meixner*. https://www.meixner.com

Plakolm-Forsthuber, S., & Jäger-Klein, C. (2015). *Die Stadt außerhalb: Zur Architektur der Niederösterreichischen Landes-Heil- und Pflegeanstalt für Geistes- und Nervenkranke Am Steinhof in Wien*. Wien.

Pott, B., & Böhm, B. (2023). *AIA für Bestandsaufnahme: Spezifikation digitale Bestandserfassung und Bestandsmodellierung*. Wien: OFFICE FOR DIGITAL ENGINEERING (ODE).

Schramm Öhler Rechtsanwälte. (2023). *Vergabeverfahren „Otto Wagner Areal – RV". Ausschreibungsunterlagen 1. Stufe*. Wien.

Digital Reconstruction of the Theatre Canopy

A particularly significant example of BIM application to historic heritage concerns the reconstruction of the original canopy of the *Art Nouveau* theatre, which disappeared during the twentieth century. The intervention was developed as a support tool for future conservation activities and as a means of documenting the historical evolution of the complex. [Joerg-Ronceray, 2022] Since no complete design drawings were found, the reconstruction (Fig. 3) was based primarily on three historic photographs taken during the inauguration ceremony in 1907. These images were supplemented by a section drawing and a façade elevation preserved in archival collections. Through photogrammetric correction procedures, it was possible to reconstruct the dimensions and proportions of the architectural element, which was subsequently modelled in the BIM environment and integrated into the digital building model. [Joerg-Ronceray, 2022] The canopy is also associated with one of the most famous anecdotes in Viennese architectural history. According to a widely reported tradition, during the inauguration ceremony Archduke Franz Ferdinand expressed his preference for the Maria Theresa style, to which Otto Wagner allegedly replied: "In the time of Maria Theresa, people built in a contemporary manner." Although the historical accuracy of the episode cannot be confirmed with certainty, it symbolically represents the confrontation between historicism and modernity that characterised architectural debate at the beginning of the twentieth century.

[Joerg-Ronceray, 2022; Plakolm-Forsthuber & Jäger-Klein, 2015]

Future Use of the Complex

The transformation strategy for the Otto Wagner Areal envisages the complete reuse of its historic buildings through an approach that combines heritage conservation, sustainability, and new public functions. The project aims to preserve the historical identity of the complex while ensuring its integration into Vienna's contemporary cultural and social life. [Fruhauf, 2026] The Musik und Kunst Privatuniversität der Stadt Wien (MUK) will occupy fourteen pavilions and part of the administrative buildings. Pavilion 18 will be adapted to accommodate artists' studios operated by Stadt Wien Kunst GmbH, while Pavilion 15 will become the new headquarters of the Dokumentationsarchiv des österreichischen Widerstandes (DÖW), further strengthening the site's role in preserving the memory of National Socialist persecution and resistance. [DÖW, 2026; Fruhauf, 2026] At the same time, restoration measures will include façade conservation, rehabilitation of historic windows, improvements in energy performance, and the technical upgrading of the buildings. At present, eighteen buildings already have defined future functions, while sixteen remain available for compatible future uses. [Fruhauf, 2026] Long-term objectives include certification according to ÖGNI sustainability standards, the implementation of an integrated digitalisation strategy, and the nomination of the entire complex as a flagship project within the framework of the New European Bauhaus initiative. [Fruhauf, 2026]

Conclusions

The BIM modelling of the Otto Wagner Areal represents one of the key milestones in the transformation process of the former Steinhof psychiatric hospital. Laser-scanning activities and digital models systematically document the condition of the complex prior to restoration interventions and provide a reliable basis for future planning, conservation, and facility management activities. [Fruhauf, 2026; Pott & Böhm, 2023] Beyond their operational value, the HBIM models serve as a permanent record of an architectural heritage site of exceptional historical and cultural significance. They enable the integration of heritage conservation, contemporary planning, and digital information management, fostering a deeper understanding of the complex and its transformations over time. [Bianchini et al., 2022] The Otto Wagner Areal demonstrates how digital technologies can make a substantial contribution to the preservation and enhancement of cultural heritage, supporting the transformation of a former healthcare institution into an open, multifunctional, and culturally active complex within the urban context of Vienna. [Fruhauf, 2026]

Autori

Andrea Sias[1]

Email

a.sias@uniss.it

[1] Università degli Studi di Sassari, Dipartimento di Architettura, Design e Urbanistica

Modelli informativi paesaggistici. Integrazione tra HBIM e HGIS

Landscape Information Models. Integration between HBIM and HGIS

Keywords

HBIM
HGIS
LANDSCAPE INFORMATION MODELING (LIM)
MULTISCALARITY
CULTURAL HERITAGE

Abstract

Il presente contributo descrive una metodologia per l'integrazione tra HBIM e HGIS, orientata alla costruzione di uno strumento unificato di gestione dei beni culturali. La ricerca propone l'utilizzo di QGIS, piattaforma open source, come ambiente in grado di accogliere i dati informativi tridimensionali derivanti da modelli HBIM, attraverso la conversione di file IFC in formato GeoJSON, con l'obiettivo di preservare gli attributi semantici e parametrici del modello originario.

This paper describes a methodology for integrating HBIM and HGIS, aimed at building a unified cultural heritage management tool. The research proposes using QGIS, an open-source platform, as an environment capable of hosting three-dimensional information data from HBIM models through the conversion of IFC files into GeoJSON format, with the goal of preserving the semantic and parametric attributes of the original model.

Introduzione e obiettivi

La salvaguardia e la valorizzazione del patrimonio architettonico e paesaggistico richiedono strumenti e metodi capaci di gestire simultaneamente la complessità del singolo manufatto e la sua dimensione territoriale. In questo contesto, la rappresentazione informativa si configura come risposta metodologica alla duplice esigenza di documentare il bene nella sua materialità e, al contempo, comprenderne le relazioni con il contesto, superando i limiti della documentazione tradizionale mediante l'integrazione di dati geometrici, semantici e relazionali all'interno di sistemi digitali interconnessi.

La presente ricerca esplora le potenzialità dell'integrazione tra *Heritage Building Information Modeling* (HBIM) e *Heritage Geographic Information System* (HGIS), due paradigmi che operano tradizionalmente su scale differenti e che rispondono a esigenze conoscitive complementari [Murphy et al., 2009; Colucci et al., 2020]. L'HBIM consente di descrivere il patrimonio costruito attraverso modelli informativi ricchi di attributi geometrici, costruttivi e semantici [Murphy et al., 2009, 2013]; l'HGIS permette invece di contestualizzare tali informazioni all'interno di sistemi territoriali complessi, supportando analisi spaziali e letture multiscalari.

L'obiettivo della ricerca è sviluppare una metodologia interoperabile capace di integrare i due approcci in un ecosistema informativo unitario, in grado di operare efficacemente dal dettaglio costruttivo alla scala territoriale. La convergenza HBIM–HGIS viene intesa non come semplice sovrapposizione geometrica dei modelli, ma come allineamento informativo che consenta interrogazioni, selezioni, tematizzazioni e analisi coerenti tra le diverse scale di osservazione, preservando il patrimonio semantico associato agli oggetti e supportando attività di conoscenza, monitoraggio e conservazione del patrimonio culturale.

Metodologia

La sperimentazione adotta QGIS come piattaforma di convergenza tra dati territoriali e modelli informativi architettonici, valorizzandone la natura *open source*, l'ampia disponibilità di estensioni e il supporto a standard interoperabili. L'utilizzo di una piattaforma aperta costituisce un elemento qualificante della metodologia poiché favorisce accessibilità, replicabilità e trasparenza del processo.

La scelta di QGIS è motivata non soltanto dalla sua consolidata diffusione nell'ambito dei *Geographic Information Systems*, ma anche dalla possibilità di integrare efficacemente la dimensione tridimensionale attraverso il *plugin* Qgis2threejs [Colucci et al., 2020]. Tale estensione consente infatti di generare ambienti di visualizzazione 3D georeferenziati nei quali modelli digitali del terreno, dati territoriali e modelli architettonici possono essere rappresentati all'interno di uno stesso spazio informativo. Questa caratteristica risulta particolarmente vantaggiosa nel contesto della ricerca poiché permette di collocare il modello HBIM all'interno del proprio contesto paesaggistico e territoriale, superando la tradizionale separazione tra rappresentazione architettonica e rappresentazione geografica e favorendo letture integrate tra scala edilizia e scala territoriale.

Introduction and Objectives

The safeguarding and valorization of architectural and landscape heritage require tools and methods capable of simultaneously managing the complexity of the individual artifact and its territorial dimension. In this context, information representation configures itself as a methodological response to the dual need of documenting the asset in its materiality while understanding its relationships with the context. This overcomes the limitations of traditional documentation by integrating geometric, semantic, and relational data within interconnected digital systems.

The present research explores the potential of integrating Heritage Building Information Modeling (HBIM) and Heritage Geographic Information System (HGIS), two paradigms that traditionally operate on different scales and address complementary cognitive needs [Murphy et al., 2009; Colucci et al., 2020]. HBIM allows for the description of built heritage through information models rich in geometric, constructive, and semantic attributes [Murphy et al., 2009, 2013]; conversely, HGIS enables the contextualization of such information within complex territorial systems, supporting spatial analyses and multiscale readings.

The objective of the research is to develop an interoperable methodology capable of integrating the two approaches into a unified information ecosystem, operating effectively from the construction detail to the territorial scale. The HBIM–HGIS convergence is understood not as a simple geometric superposition of models, but as an informational alignment that allows for consistent queries, selections, thematizations, and analyses across different scales of observation, preserving the semantic heritage associated with the objects and supporting activities related to the knowledge, monitoring, and conservation of cultural heritage.

Methodology

The experimentation adopts QGIS as the convergence platform between territorial data and architectural information models, leveraging its open-source nature, wide availability of extensions, and support for interoperable standards. The use of an open platform constitutes a qualifying element of the methodology, as it promotes accessibility, replicability, and transparency of the process.

The choice of QGIS is motivated not only by its consolidated widespread use in the field of Geographic Information Systems, but also by the possibility of effectively integrating the three-dimensional dimension through the Qgis2threejs plugin [Colucci et al., 2020]. This extension allows for the generation of georeferenced 3D visualization environments in which digital terrain models, territorial data, and architectural models can be represented within the same information space. This feature is particularly advantageous in the context of this research, as it allows the HBIM model to be placed within its landscape and territorial context, overcoming the traditional separation between architectural representation and geographical representation, and fostering integrated readings between the building scale and the territorial scale.

The experimentation was developed through a workflow aimed at importing and visualizing HBIM models in IFC [Industry Foundation Classes] format, addressing the main critical issues of data exchange between BIM and GIS environments. These include the management of reference systems [Colucci et al., 2020; Suwardhi et al., 2026], model georeferencing, the hierarchical structure of objects, and the preservation of informational attributes.

The methodological process involves converting IFC models into GeoJSON format [Roxin & Hbeich, 2019], an open standard widely supported by GIS platforms for managing georeferenced vector data. This step represents a central phase of the methodology, as it does not exclusively concern the geometric transposition of objects, but above all the transfer of the informational content associated with the HBIM model.

During the conversion, the elements contained in the IFC file are transformed into geographical entities while maintaining the link with the information heritage originally defined in the BIM environment. The information associated with the objects—typological classifications, material properties, dimensional data, historical, conservative, and diagnostic information—is transferred into the attribute table of the new GeoJSON layer. In this way, the model is not imported

La sperimentazione è stata sviluppata attraverso un *workflow* finalizzato all'importazione e alla visualizzazione di modelli HBIM in formato IFC (*Industry Foundation Classes*), affrontando le principali criticità dell'interscambio tra ambienti BIM e GIS, quali la gestione dei sistemi di riferimento [Colucci et al., 2020; Suwardhi et al., 2026], la georeferenziazione dei modelli, la struttura gerarchica degli oggetti e la conservazione degli attributi informativi.

Il processo metodologico prevede la conversione dei modelli IFC in formato GeoJSON [Roxin & Hbeich, 2019], standard aperto ampiamente supportato dalle piattaforme GIS per la gestione di dati vettoriali georeferenziati. Tale passaggio rappresenta una fase centrale della metodologia poiché non riguarda esclusivamente la trasposizione geometrica degli oggetti, ma soprattutto il trasferimento del contenuto informativo associato al modello HBIM.

Durante la conversione, gli elementi contenuti nel file IFC vengono trasformati in entità geografiche mantenendo il collegamento con il patrimonio informativo originariamente definito nell'ambiente BIM. Le informazioni associate agli oggetti – classificazioni tipologiche, proprietà materiche, dati dimensionali, informazioni storiche, conservative e diagnostiche – vengono infatti trasferite nella tabella degli attributi del nuovo *layer* GeoJSON. In questo modo il modello non viene importato nel GIS come semplice geometria tridimensionale, ma come *dataset* informativo interrogabile e tematizzabile.

La tabella degli attributi assume quindi il ruolo di ponte semantico tra HBIM e GIS [Roxin & Hbeich, 2019; Santoro & Bonora, 2023], consentendo di applicare agli elementi architettonici le tradizionali operazioni di interrogazione, selezione, filtro e analisi proprie degli ambienti geografici. La conservazione degli attributi informativi rappresenta un aspetto fondamentale del processo, poiché consente di preservare la ricchezza conoscitiva costruita nel modello HBIM e di estenderne le potenzialità operative all'interno di un contesto territoriale più ampio.

Una volta importato in QGIS, il modello può essere visualizzato all'interno dell'ambiente tridimensionale generato mediante Qgis2threejs, consentendo la compresenza di livelli informativi territoriali – ortofoto, modelli digitali del terreno, cartografie storiche, tematismi ambientali e vincolistici – e componenti architettoniche dotate di informazioni semantiche. Tale integrazione rende possibile un dialogo operativo tra differenti scale di osservazione e supporta attività di conoscenza, monitoraggio e pianificazione degli interventi sul patrimonio culturale.

Caso di studio

La metodologia è stata sperimentata nel territorio di Alghero, assunto come caso di studio per verificare le potenzialità dell'integrazione HBIM–HGIS in un contesto caratterizzato dalla presenza di rilevanti componenti storico-culturali e paesaggistiche.

La costruzione del *database* territoriale è stata realizzata a partire dai dati resi disponibili dal Geoportale della Regione Sardegna. All'interno dell'ambiente QGIS sono stati predisposti i parametri per la visualizzazione tridimensionale del territorio e sono stati integrati i principali *layer* informativi, tra cui il *Digital Terrain Model* (DTM), il sistema insediativo, la rete infrastrutturale e ulteriori tematismi territoriali. (Fig. 1)

Particolare attenzione è stata dedicata all'integrazione delle cartografie storiche regionali, tra cui il Catasto De Candia e la Carta della Marmora, utilizzate come supporto per l'analisi delle trasformazioni territoriali e per la contestualizzazione storica del patrimonio architettonico.

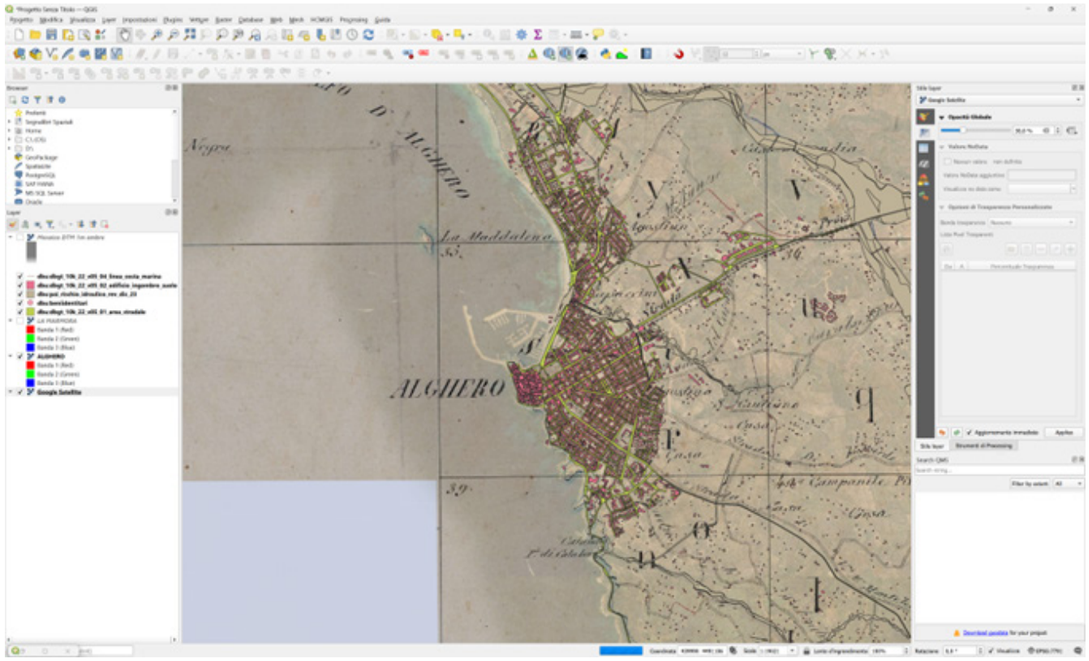


Fig. 1: Schermata della piattaforma QGIS con i *layer* necessari alla visualizzazione planimetrica della città di Alghero Elaborazione grafica dell'autore.

Fig. 1: Screenshot of the QGIS platform showing the layers required for the planimetric visualization of the city of Alghero. Graphical elaboration by the author.

Sul piano architettonico, l'oggetto di studio per la sperimentazione della componente HBIM è stato individuato in una villa in stile Liberty situata sul lungomare di Alghero, scelta in ragione del suo valore storico-architettonico e della sua posizione strategica all'interno del contesto paesaggistico costiero della città. L'acquisizione dei dati metrici dell'edificio è stata condotta mediante tecnica fotogrammetrica, impiegando due distinte modalità di acquisizione in funzione delle porzioni dell'edificio rilevate: una campagna fotogrammetrica terrestre, condotta con fotocamera Sony Alpha 7, per la documentazione delle facciate e degli apparati decorativi a quota pedonale, e una campagna fotogrammetrica aerea, eseguita mediante drone DJI Mini 3 Pro, per l'acquisizione delle coperture e delle porzioni dell'edificio non accessibili da terra.

I *dataset* fotografici acquisiti sono stati successivamente elaborati in ambiente Agisoft Metashape, attraverso un processo di *structure from motion* che ha permesso di generare la nuvola di punti densa dell'edificio. La nuvola di punti, una volta allineata e sottoposta a operazioni di pulizia e ottimizzazione, è stata importata all'interno dell'ambiente Revit, dove è stata utilizzata come riferimento geometrico per la modellazione informativa dell'edificio. (Fig. 2) In tale fase sono state create le famiglie parametriche relative alle diverse componenti architettoniche della villa, secondo un processo di *reverse modelling* che ha previsto la ricostruzione su base parametrica degli elementi rilevati, in coerenza con l'approccio metodologico proprio dell'HBIM [Murphy et al., 2009, 2013].

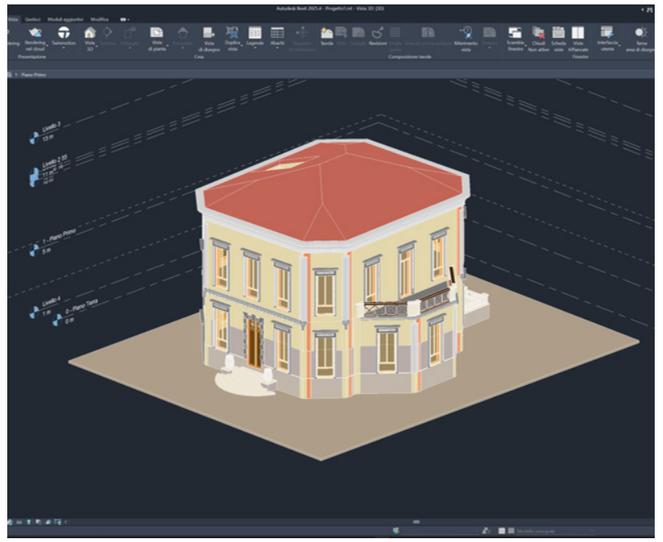


Fig. 2: Schermata della piattaforma BIM in cui è stato realizzato il modello tridimensionale informativo. Elaborazione grafica realizzata all'interno del corso di Rilievo e modellazione del patrimonio costruito.

Fig. 2: Screenshot of the BIM platform in which the three-dimensional information model was created. Graphical elaboration created within the course of Survey and Modeling of Built Heritage.

Il modello HBIM della villa è stato strutturato in modo da preservare, oltre alla componente geometrica, l'insieme degli attributi semantici relativi alle caratteristiche tipologiche, materiche e decorative proprie del linguaggio architettonico Liberty — quali apparati decorativi, elementi in ferro battuto, finiture di facciata e soluzioni distributive originarie — nonché eventuali informazioni relative allo stato di conservazione e a interventi di restauro pregressi.

Una volta completato il modello, l'edificio è stato georeferenziato secondo il sistema di riferimento adottato per il *database* territoriale e convertito in formato GeoJSON, secondo il *workflow* descritto nella sezione metodologica, al fine di trasferire il patrimonio informativo del modello IFC all'interno della struttura dati GIS. (Fig. 3)

All'interno di questo quadro informativo sono stati successivamente inseriti i modelli HBIM opportunamente convertiti e georeferenziati. L'integrazione tra dati territoriali, cartografie storiche e modelli informativi ha consentito di verificare l'efficacia dell'approccio proposto nella costruzione di un ambiente di consultazione e analisi multiscalare, capace di mettere in relazione il singolo elemento architettonico — la villa Liberty — con il sistema territoriale di appartenenza, evidenziando il rapporto storico tra l'edificio e la trasformazione del fronte mare di Alghero nel corso del tempo.

mation. Such integration enables an operational dialogue between different scales of observation and supports activities for the knowledge, monitoring, and planning of interventions on cultural heritage.

Case Study

The methodology was tested in the territory of Alghero, chosen as a case study to verify the potential of HBIM–HGIS integration in a context characterized by the presence of significant historical-cultural and landscape components.

The construction of the territorial database was carried out using data made available by the Geoportal of the Autonomous Region of Sardinia. Within the QGIS environment, parameters for the three-dimensional visualization of the territory were set up, and the main informational layers were integrated, including the Digital Terrain Model (DTM), the settlement system, the infrastructural network, and additional territorial themes (Fig. 1).

Particular attention was dedicated to the integration of historical regional maps, including the *De Candia Catasto* and the *La Marmora Map*, used as a support for analyzing territorial transformations and for the historical contextualization of the architectural heritage.

On the architectural level, the object of study for testing the HBIM component was identified as a Liberty-style villa located on the Alghero seafront. It was selected due to its historical-architectural value and its strategic position within the city's coastal landscape context. The acquisition of the building's metric data was conducted using photogrammetric techniques, employing two distinct acquisition modes based on the portions of the building being surveyed: a terrestrial photogrammetric campaign, conducted with a Sony Alpha 7 camera to document the facades and decorative apparatuses at pedestrian level, and an aerial photogrammetric campaign, executed using a DJI Mini 3 Pro drone to acquire the roofs and portions of the building inaccessible from the ground.

The acquired photographic datasets were subsequently processed in the Agisoft Metashape environment through a Structure from Motion process, which allowed for the generation of the building's dense

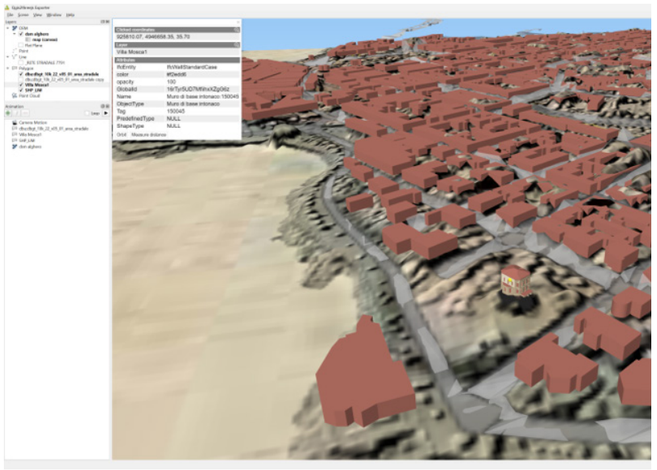


Fig. 3: Schermata della piattaforma QGIS dove emerge la villa con la relativa tabella degli attributi geolocalizzata all'interno della cartografia storica GIS. Elaborazione grafica dell'autore.

Fig. 3: Screenshot of the QGIS platform displaying the villa with its relative attribute table geolocalized within the historical GIS cartography. Graphical elaboration by the author.

Potenzialità e sviluppi futuri

I risultati della sperimentazione evidenziano come l'integrazione tra HBIM e HGIS possa costituire un efficace strumento di supporto ai processi di conoscenza, conservazione e gestione del patrimonio culturale. La possibilità di correlare informazioni architettoniche e territoriali all'interno di un unico ambiente informativo consente infatti di sviluppare analisi più articolate rispetto a quelle ottenibili mediante l'utilizzo separato dei due sistemi.

Uno degli aspetti più significativi emersi dalla ricerca riguarda la conservazione della continuità semantica tra ambiente HBIM e ambiente GIS. La possibilità di trasferire gli attributi informativi dal modello IFC alla struttura dati GeoJSON consente infatti di mantenere attivo il patrimonio conoscitivo associato agli elementi architettonici anche dopo il processo di interoperabilità. In tale prospettiva, l'integrazione HBIM–HGIS non può essere interpretata come una semplice interoperabilità geometrica, finalizzata alla visualizzazione dei modelli nello spazio geografico, ma come una forma di interoperabilità semantica che permette di conservare, interrogare e analizzare informazioni complesse alle diverse scale di osservazione [Roxin & Hbeich, 2019; Santoro & Bonora, 2023; Pomè, 2023]. Tra le principali potenzialità emerge inoltre la possibilità di costruire modelli informativi multiscalari in grado di mettere in relazione dati ambientali, paesaggistici e urbanistici con caratteristiche costruttive, materiche e conservative degli edifici storici [Chenaux et al., 2019; Deng et al., 2021].

Tale approccio può supportare attività di monitoraggio, valutazione del rischio e pianificazione degli interventi, favorendo processi decisionali basati su una conoscenza integrata del bene e del suo contesto.

point cloud. Once aligned, cleaned, and optimized, the point cloud was imported into the Revit environment, where it was used as a geometric reference for the building's information modeling (Fig.2). In this phase, parametric families related to the different architectural components of the villa were created through a reverse modeling process. This involved reconstructing the surveyed elements on a parametric basis, consistent with the methodological approach inherent to HBIM [Murphy et al., 2009, 2013].

The HBIM model of the villa was structured to preserve, in addition to the geometric component, the set of semantic attributes relating to the typological, material, and decorative characteristics inherent to the Liberty architectural language—such as decorative apparatuses, wrought iron elements, facade finishes, and original layout solutions—as well as any information regarding the state of conservation and past restoration interventions.

Once the model was completed, the building was georeferenced according to the reference system adopted for the territorial database and converted into GeoJSON format, following the workflow described in the methodology section, in order to transfer the information heritage of the IFC model into the GIS data structure.

Within this framework, the appropriately converted and georeferenced HBIM models were subsequently inserted. The integration between territorial data, historical mapping, and information models allowed for the verification of the proposed approach's effectiveness in constructing a multiscale consultation and analysis environment. This environment is capable of linking the individual architectural element—the Liberty villa—with its corresponding territorial system, highlighting the historical relationship between the building and the transformation of the Alghero waterfront over time (Fig.3).

Potential and Future Developments

The results of the experimentation highlight how the integration between HBIM and HGIS can constitute an effective supporting tool for the processes of knowledge, conservation, and management of cultural heritage. The ability to correlate architectural and territorial information within a single information environment allows for the development of more articulated analyses than those obtainable through the separate use of the two systems.

One of the most significant aspects emerging from the research concerns the preservation of semantic continuity between the HBIM environment and the GIS environment. The ability to transfer informational attributes from the IFC model to the GeoJSON data structure allows the knowledge base associated with architectural elements to remain active even after

Ulteriori sviluppi riguardano l'estensione della catena informativa verso la pubblicazione e la condivisione dei dati attraverso piattaforme webGIS e portali digitali (Fig. 4) [Fernandes Dionizio et al., 2025]. L'utilizzo di formati aperti e strumenti *open source* permette infatti di rendere accessibili differenti livelli di informazione a utenti specialisti e non specialisti, ampliando le possibilità di fruizione, comunicazione e partecipazione.

In prospettiva, l'evoluzione della metodologia potrà orientarsi verso l'automazione delle procedure di interoperabilità tra IFC e GIS, l'integrazione di dati provenienti da sistemi di monitoraggio in tempo reale e la costruzione di *digital twin* territoriali del patrimonio culturale, capaci di supportare strategie avanzate di gestione e conservazione del paesaggio storico [Suwardhi et al., 2026; Wang & Wang, 2024].

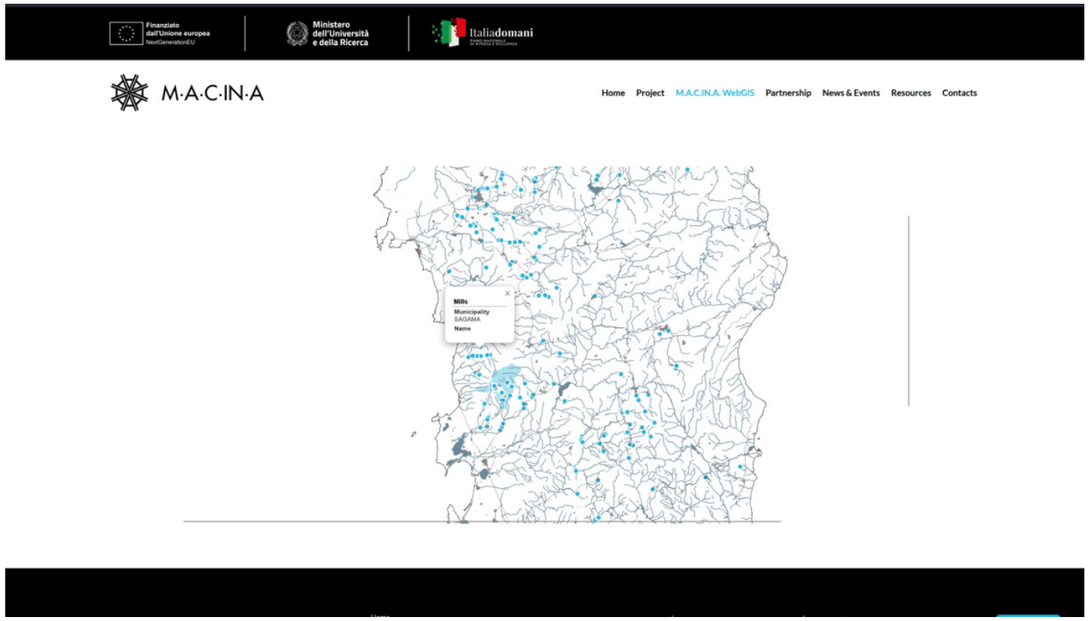


Fig. 4: Schermata rappresentativa del web LIM, Landscape Information Model, acquisita dal portale di M.A.C.IN.A. Multilevel Application for Cultural INformation Archives. A focus on the Inner Areas of Abruzzo and Sardinia regions.

Fig. 4: Representative screenshot of the WebLIM, Landscape Information Model, acquired from the M.A.C.IN.A. portal. Multilevel Application for Cultural INformation Archives. A focus on the Inner Areas of Abruzzo and Sardinia regions.

Bibliografia

Chenaux, A., Murphy, M., Pavia, S., Fai, S., Molnar, T., Cahill, J., & Corns, A. (2019). A review of 3D GIS for use in creating virtual historic Dublin. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W9*, 249–254. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-249-2019

Colucci, E., De Ruvo, V., Lingua, A., Matrone, F., & Rizzo, G. (2020). HBIM-GIS integration: From IFC to CityGML standard for damaged cultural heritage in a multiscale 3D GIS. *Applied Sciences, 10(4)*, 1356. https://doi.org/10.3390/app10041356

Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2021). From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction, 26*, 58–83. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005

Fernandes Dionizio, B., Murphy, M., & Dezen-Kempter, E. (2025). Integrating HBIM and WebGIS for the documentation, visualization and management of modern architectural heritage sites. *Journal of Architectural Conservation*. https://doi.org/10.1080/15583058.2025.2502528

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey, 27(4)*, 311–327. https://doi.org/10.1108/02630800910985108

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic building information modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 76*, 89–102. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006

Oreni, D., Brumana, R., Della Torre, S., Banfi, F., Barazzetti, L., & Previtali, M. (2014). Survey turned into HBIM: The restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake (L'Aquila). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5, 267–273. https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-267-2014*

Pomè, A. (2023). The application of historic building information modelling (HBIM) to cultural heritage: A review. *Heritage, 6(10)*, 6691–6717. https://doi.org/10.3390/heritage6100350

Roxin, A., & Hbeich, E. (2019). Semantic interoperability between BIM and GIS: Review of existing standards and depiction of a novel approach. In *Proceedings of the 36th CIB W78 Conference – Information Technology for Construction*. Newcastle, United Kingdom.

Santoro, A., & Bonora, V. (2023). Semantic interoperability for cultural heritage conservation: *Workflow* from ontologies to a tool for managing and sharing data. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*. https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00318

Suwardhi, D., Agustina, L. K., Purnama, I., Wikantika, K., Arianto, I. G., Andika, W., & Harto, A. B. (2026). An interoperable framework for heritage building monitoring integrating IFC-BIM, CityGML, and immersive visualization. *Heritage, 9(6)*, 240. https://doi.org/10.3390/heritage9060240

Wang, X., & Wang, Y. (2024). Deep learning based approaches from semantic point clouds to semantic BIM models for heritage digital twin. *npj Heritage Science, 12*, 1–18. https://doi.org/10.1038/s40494-024-01179-4+++

scale information models capable of relating environmental, landscape, and urban planning data with the construction, material, and conservative characteristics of historical buildings [Chenaux et al., 2019; Deng et al., 2021] (Fig. 4).

Such an approach can support monitoring activities, risk assessment, and intervention planning, favoring decision-making processes based on an integrated knowledge of the asset and its context.

Further developments relate to extending the information chain toward the publication and sharing of data through WebGIS platforms and digital portals [Fernandes Dionizio et al., 2025]. Indeed, the use of open formats and open-source tools allows different levels of information to be made accessible to both specialist and non-specialist users, expanding the possibilities for utilization, communication, and participation.

Looking ahead, the evolution of the methodology could orient itself toward automating the interoperability procedures between IFC and GIS, integrating data from real-time monitoring systems, and constructing territorial digital twins of cultural heritage capable of supporting advanced strategies for the management and conservation of the historical landscape [Suwardhi et al., 2026; Wang & Wang, 2024].

Autori

Davide Lorenzo Dino Aschieri[1]

[1] Politecnico di Torino

Email

davide.aschieri@polito.it

Keywords

MINOR ARCHITECTURAL HERITAGE
DISTRIBUTED HBIM
GEOBIM
INNER AREAS
PREVENTIVE CONSERVATION

Minor heritage: integrazione tra HBIM diffuso e GeoBIM per la gestione programmata

Minor Heritage: Integration of Distributed HBIM and GeoBIM for Scheduled Management

Abstract

Il contributo propone un *workflow* di accoppiamento tra HBIM diffuso e GeoBIM, inteso come modello informativo del sottosuolo, per supportare la conservazione preventiva del minor *heritage* nelle aree interne. L'obiettivo non è aumentare la complessità geometrica, ma correlare manufatti, suolo, falda e deflussi in indicatori preliminari per ispezione, monitoraggio e manutenzione programmata.

The contribution proposes a workflow for coupling distributed HBIM with GeoBIM, understood as an information model of the subsurface, to support the preventive conservation of minor heritage in inland areas. The aim is not to increase geometric complexity, but to correlate built assets, soil, groundwater and runoff into preliminary indicators for inspection, monitoring and scheduled maintenance.

Introduzione

Le aree interne sono definite dalla *Strategia Nazionale per le Aree Interne* (SNAI)[1] come territori distanti dai principali poli di offerta dei servizi essenziali, ma dotati di risorse ambientali, culturali e insediative rilevanti [Barca et al., 2014]. Questa distanza non è solo geografica, ma riguarda anche la disponibilità di presidi tecnici, risorse economiche e continuità manutentiva. La fragilità territoriale si intreccia quindi con una fragilità gestionale. Il patrimonio è diffuso, spesso poco censito, e affidato a interventi episodici. Accanto ai beni monumentali si trovano cappelle, ponti, lavatoi, portali, e mulattiere, che contribuiscono alla riconoscibilità dei luoghi. Il *minor heritage* è quindi una rete materiale e identitaria, più che una somma di oggetti isolati.

La sua vulnerabilità è amplificata da due condizioni convergenti: da un lato la fragilità territoriale, dall'altro la debolezza degli strumenti ordinari di conoscenza e manutenzione. Il quadro nazionale del dissesto idrogeologico conferma l'estensione del problema. Il Rapporto ISPRA 2024[2] segnala che il 94,5% dei comuni italiani è esposto a frane, alluvioni, valanghe o erosione costiera; il 23% del territorio italiano ricade in aree a pericolosità da frana o di attenzione, con quasi 14.000 beni culturali ubicati in aree a pericolosità elevata (P3) e molto elevata da frana (P4); mentre nello scenario medio di pericolosità idraulica i beni culturali esposti sono circa 36.000 [Trigila et al., 2025]. Tali indicatori non esauriscono il *minor heritage*, spesso meno formalizzato nei sistemi di tutela, ma chiariscono il quadro di esposizione entro cui esso si colloca (Fig.1).

Il degrado dei manufatti minori non dipende soltanto da vetustà, materiali o carenze manutentive. È spesso controllato dall'interazione tra manufatto, suolo, falda, versante e reticolo idrografico. Umidità persistente, erosioni al piede, inefficienze di drenaggio, piccole deformazioni e fessurazioni possono essere segnali ordinari di processi territoriali più ampi. Eventi recenti, dal dissesto urbano di Niscemi ai danni registrati in Valle Cervo durante l'evento del 2020, richiamano la necessità di leggere il costruito storico entro il comportamento del suolo e delle acque [Pierro & Scarpinato, 2026; Regione Piemonte, 2022].

Molti dati necessari per riconoscere queste relazioni esistono già: cartografie geologiche, geomorfologiche e IFFI[3], PAI[4], DTM[5] , reticoli idrografici, archivi di evento, rilievi locali, schede conservative e storici manutentivi. Tuttavia, tali informazioni restano spesso separate per scala e finalità d'uso. Il contributo indaga quindi come l'accoppiamento tra HBIM diffuso e GeoBIM possa trasformare dati separati su patrimonio costruito, suolo e acqua in indicatori operativi per la conservazione preventiva del patrimonio minore.

[1] La SNAI classifica le aree interne in funzione della distanza dai centri di offerta dei servizi essenziali—scuola, sanità e mobilità—assumendo tale distanza come indicatore di fragilità territoriale, ma anche come base per politiche di valorizzazione delle risorse locali.

[2] Il Rapporto ISPRA *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio – Edizione 2024* costituisce il principale quadro conoscitivo nazionale su frane, alluvioni, valanghe, erosione costiera e relativi indicatori di rischio.

3 Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia

4 Piano Assetto Idrogeologico

5 Digital Terrain Model

Introduction

Inner areas are defined by the *Strategia Nazionale per le Aree Interne* (SNAI)[1] as territories located far from the main centres providing essential services, yet endowed with significant environmental, cultural and settlement resources [Barca et al., 2014]. This distance is not only geographical, but also concerns the availability of technical support, economic resources and maintenance continuity.

Territorial fragility is therefore intertwined with management fragility. Heritage is widespread, often poorly inventoried, and subject to episodic interventions. Alongside monumental assets, there are chapels, bridges, wash houses, portals and mule tracks, which contribute to the recognisability of places. Minor heritage is therefore a material and identity-based network, rather than a sum of isolated objects.

Its vulnerability is amplified by two converging conditions: territorial fragility on the one hand, and the weakness of ordinary knowledge and maintenance tools on the other.

The national framework of hydrogeological instability confirms the scale of the issue. The ISPRA 2024[2] Report indicates that 94.5% of Italian municipalities are exposed to landslides, floods, avalanches or coastal erosion; 23% of the Italian territory falls within areas of landslide hazard or attention areas, with almost 14,000 cultural assets located in areas of high (P3) and very high (P4) landslide hazard; while, under the medium hydraulic hazard scenario, approximately 36,000 cultural assets are exposed [Trigila et al., 2025].

These indicators do not fully account for minor heritage, which is often less formalised within protection systems, but they clarify the exposure framework within which it is located (Fig. 1).

The degradation of minor built assets does not depend solely on age, materials or maintenance deficiencies. It is often controlled by the interaction between the asset, soil, groundwater, slope and hydrographic network. Persistent moisture, erosion at the base, drainage inefficiencies, small deformations and cracks may represent ordinary signs of broader territorial processes. Recent events, from the urban instability in Niscemi to the damage recorded in Valle Cervo during the 2020 event, highlight the need to interpret historic built assets in relation to the behaviour of soil and water [Pierro & Scarpinato, 2026; Regione Piemonte, 2022]. Much of the data required to identify these relationships already exists: geological, geomorphological and IFFI maps, PAI maps, DTMs, hydrographic networks, event archives, local surveys, conservation records and maintenance histories. However, these sources often remain separated by scale and purpose. This contribution therefore investigates how the coupling of distributed HBIM and GeoBIM can transform separate

[1] The Italian National Strategy for Inner Areas (SNAI) classifies Inner Areas according to their distance from centres providing essential services—education, healthcare, and mobility—using this distance as an indicator of territorial fragility, but also as a basis for policies aimed at enhancing local resources.

[2] The ISPRA report *Hydrogeological Instability in Italy: Hazard and Risk Indicators – 2024 Edition* provides the main national knowledge framework concerning landslides, floods, avalanches, coastal erosion, and the related risk indicators.

[3] Inventory of Landslide Phenomena in Italy (IFFI).

[4] Hydrogeological Management Plan (PAI).

[5] Digital Terrain Model (DTM).

HBIM per il Patrimonio diffuso

L'HBIM nasce come estensione del BIM al patrimonio storico, con attenzione alla modellazione dell'esistente, alla documentazione delle fonti, alla stratificazione costruttiva e alla gestione del dato geometrico e semantico [Murphy et al., 2009]. Le prime applicazioni si sono concentrate sul singolo edificio monumentale, spesso modellato da rilievi tridimensionali dettagliati. Per patrimoni composti da molti beni minori, eterogenei e distribuiti, questa impostazione richiede adattamenti.

Per HBIM diffuso si intende qui un sistema informativo georeferenziato, multi-asset e multi-scala, nel quale manufatti storici diversi sono descritti come oggetti informativi comparabili, interrogabili e aggiornabili [Pepe et al., 2024; Pozzoni et al., 2024]. La soluzione non si limita a collocare gli oggetti BIM su una mappa o federare dati geometrici e territoriali, ma è necessario costruire un registro operativo che sostenga controlli, manutenzione e priorità conoscitive.

In tale prospettiva il *level of geometry* (LOG) può restare contenuto e calibrato sullo scopo. Non è necessario modellare ogni manufatto con un LOG elevato, soprattutto nello *screening* conservativo a scala comunale. È invece utile scomporlo in oggetti essenziali—fondazioni, basamenti, pavimentazioni, murature—così da associare le patologie agli elementi più sensibili a specifici fenomeni di degrado. Il *level of information* (LOI) assume quindi un ruolo centrale. Il registro HBIM deve includere, oltre ai parametri tradizionali o preesistenti, livelli informativi aggiuntivi per indentificare, ad esempio, materiali, stato di conservazione, patologie, vulnerabilità nota per specifico degrado e storico manutentivo.

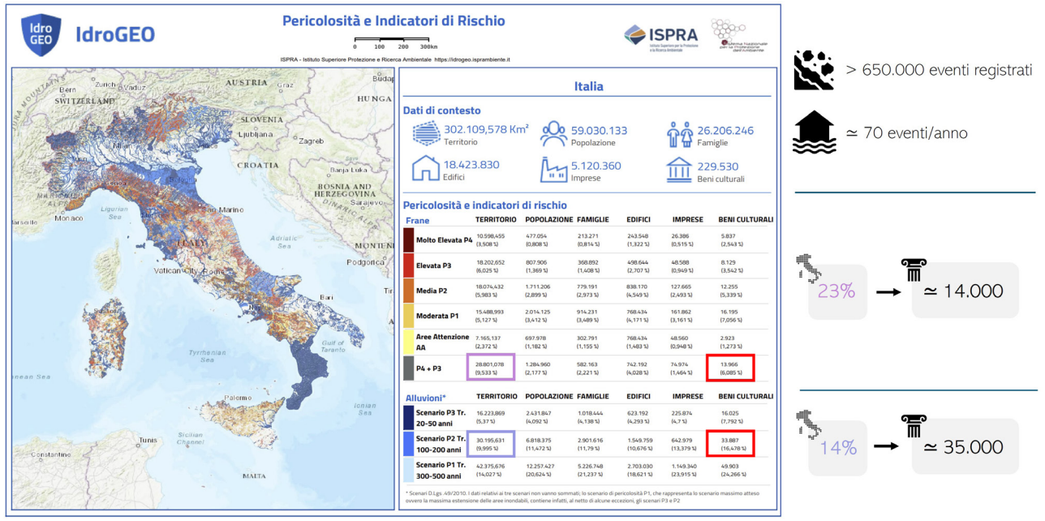


Fig. 1: Fragilità territoriale e patrimonio costruito esposto: sintesi visuale di dati su frane, alluvioni, edifici e beni culturali esposti.
Fig. 1: Territorial fragility and exposed built heritage: visual synthesis of data on landslides, floods, exposed buildings and cultural assets.

GeoBIM

Nel presente contributo il termine GeoBIM non è assunto come semplice *geospatial BIM*, ovvero integrazione BIM-GIS. Non basta georeferenziare un modello, né sovrapporlo a *layer* territoriali. Il GeoBIM è qui inteso come *geotechnical BIM*: un modello informativo BIM-nativo del sottosuolo e del suo contesto idraulico, capace di rappresentare stratigrafie, proprietà geotecniche e condizioni di falda, rendendo il sottosuolo un insieme di oggetti informativi.

La costruzione di un modello GeoBIM può seguire due logiche principali. La prima è *surface-based*. Parte da dati puntuali, come sondaggi, interfacce stratigrafiche e misure piezometriche, organizzati in tabelle strutturate e importati in Revit/Dynamo o in un *workflow* analogo (Fig.2). I punti georeferenziati alimentano superfici continue che delimitano volumi stratigrafici trasformabili in oggetti BIM parametrizzati per proprietà specifiche—litologia, proprietà geotecniche, quota di falda, fonte e affidabilità. Eventuali sovrapposizioni o incoerenze geometriche tra strati possono essere corrette mediante procedure automatizzate o semi-automatiche.

La seconda logica è *voxel-based*. In questo caso il volume di sottosuolo viene discretizzato in celle tridimensionali regolari o adattive. Ogni *voxel* è un elemento volumetrico con coordinate, dimensioni e parametri propri. I dati puntuali o intervallari sono associati alle celle secondo regole esplicite. Questo approccio è particolarmente utile per *dataset* con proprietà discontinue nello spazio. Ogni *voxel* diventa un oggetto BIM interrogabile, filtrabile e aggiornabile. Studi recenti hanno mostrato la rilevanza di rappresentazioni geologiche basate su geometrie di confine e *voxel* [Khan et al., 2023], mentre sperimentazioni GeoBIM su dati geotecnici confermano il ruolo della strutturazione degli input e dell'interoperabilità [Aschieri et al., 2025].

Questa impostazione non riduce il ruolo della modellazione specialistica. Le analisi geologiche, geotecniche e idrauliche restano indispensabili per verifiche e progettazione degli interventi. Il GeoBIM qui considerato ha una funzione più circoscritta: rendere il sottosuolo interrogabile e relazionabile agli oggetti HBIM, supportando decisioni preliminari di ispezione e manutenzione.

Metodologia

La metodologia organizza l'accoppiamento tra HBIM e GeoBIM come processo di estrazione, normalizzazione e integrazione delle informazioni provenienti dai due domini, con l'obiettivo di costruire metriche orientate alla priorità manutentiva (Fig.3).

Il punto di partenza è l'individuazione e georeferenziazione degli asset. Ogni manufatto viene associato a ID univoco, coordinate, quota e tipologia, costituendo un primo inventario interrogabile. In seguito, per ciascun asset viene costruito, o aggiornato se già disponibile, un modello informativo calibrato sugli obiettivi conoscitivi e decisionali. Nel dominio HBIM, il LOG dipende da risorse, scala e complessità del manufatto; il LOI, invece, deve includere non solo i parametri BIM tradizionali, ma anche informazioni relative a materiali, conservazione, patologie, vulnerabilità e manutenzione. Il risultato è un registro di degrado e vulnerabilità associato agli elementi del modello o all'asset nel suo complesso.

In parallelo viene costruito il modello GeoBIM, la cui configurazione dipende dalla disponibilità, qualità e affidabilità delle fonti. L'approccio è, quindi, *data-driven*. Con dati territoriali generali il modello assume forma *scenario-based*, utile per uno *screening* generale; con relazioni geologiche o geotecniche, piezometri e dati stratigrafici interpretabili, può essere sviluppato un modello *surface-based*; con dati puntuali densi, serie temporali o parametri distribuiti nello spazio, può risultare più adeguata una struttura *voxel-based* (Fig. 4). La scelta dipende dal livello di affidabilità del dato (LOR), inteso come origine, aggiornamento, precisione spaziale, attendibilità e coerenza rispetto allo scopo manutentivo.

L'obiettivo non è produrre due modelli paralleli, ma registri relazionabili. Il registro HBIM raccoglie degrado, materiali, patologi e manutenzione; il registro GeoBIM descrive pendenza, stratigrafia, falda, distanza da impluvi e suscettività specifiche. Il collegamento operativo si basa su georeferenziazione comune e su regole di prossimità spaziale. Attraverso uno *script* Dynamo dedicato (Fig.2), gli oggetti del modello GeoBIM—essi siano volumi continui o *voxel*—sono interrogati rispetto alla posizione degli elementi HBIM. Il sistema

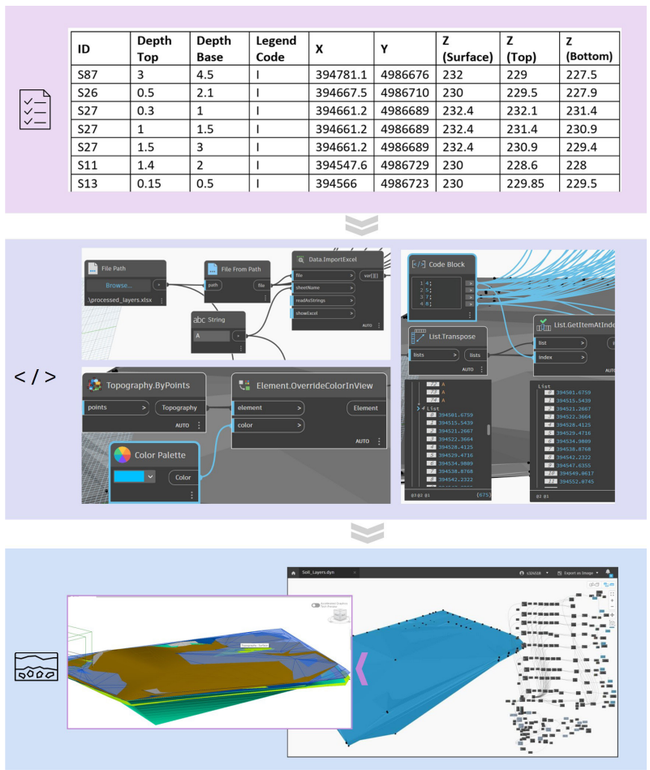


Fig. 2: Workflow parametrico per la generazione del modello GeoBIM del sottosuolo: dai dati stratigrafici organizzati in formato tabellare all'importazione in Dynamo, fino alla costruzione automatizzata delle superfici e dei volumi stratigrafici in ambiente BIM.

Fig. 2: Parametric workflow for generating the GeoBIM model of the subsurface: from stratigraphic data organised in tabular format to their import into Dynamo, up to the automated construction of stratigraphic surfaces and volumes in the BIM environment.

In this contribution, the term GeoBIM is not understood as simple geospatial BIM, namely BIM–GIS integration. Georeferencing a model or overlaying it with territorial layers is not sufficient. GeoBIM is understood here as geotechnical BIM: a BIM-native information model of the subsurface and its hydraulic context, able to represent stratigraphies, geotechnical properties and groundwater conditions, turning the subsurface into a set of information objects.

The construction of a GeoBIM model can follow two main approaches. The first is surface-based. It starts from point data, such as boreholes, stratigraphic interfaces and piezometric measurements, organised in structured tables and imported into Revit/Dynamo or an equivalent workflow (Fig. 2). The georeferenced points generate continuous surfaces that delimit stratigraphic volumes, which can be transformed into BIM objects parametrised with specific properties—lithology, geotechnical properties, groundwater level, source and reliability. Any overlaps or geometric inconsistencies between layers can be corrected through automated or semi-automated procedures.

The second approach is voxel-based. In this case, the subsurface volume is discretised into regular or adaptive three-dimensional cells. Each voxel is a volumetric element with its own coordinates, dimensions and parameters. Point or interval data are assigned to the cells according to explicit rules. This approach is particularly useful for datasets with spatially discontinuous properties. Each voxel becomes a BIM object that can be queried, filtered and updated. Recent studies have shown the relevance of geological representations based on boundary geometries and voxels [Khan et al., 2023], while GeoBIM experiments on geotechnical data confirm the role of input structuring and interoperability [Aschieri et al., 2025]. This approach does not reduce the role of specialist modelling. Geological, geotechnical and hydraulic analyses remain essential for verification and intervention design. The GeoBIM considered here has a more specific function: to make the subsurface queryable and relatable to HBIM objects, supporting preliminary decisions on inspection and maintenance.

HBIM for Distributed Heritage

HBIM emerged as an extension of BIM to historic heritage, with a focus on the modelling of existing assets, source documentation, construction stratification, and the management of geometric and semantic data [Murphy et al., 2009]. Early applications mainly focused on single monumental buildings, often modelled from detailed three-dimensional surveys. For heritage systems composed of many minor, heterogeneous and distributed assets, this approach requires adaptation.

Here, distributed HBIM is understood as a georeferenced, multi-asset and multi-scale information system in which different historic built assets are described as comparable, queryable and updatable information objects [Pepe et al., 2024; Pozzoni et al., 2024]. The solution is not limited to placing BIM objects on a map or federating geometric and territorial data; rather, it requires the construction of an operational register able to support inspections, maintenance and knowledge priorities.

From this perspective, the level of geometry (LOG) can remain limited and calibrated to the purpose. It is not necessary to model each asset with a high LOG, especially in conservation screening at the municipal scale. Instead, it is useful to decompose it into essential objects—foundations, plinths, floors and walls—so that pathologies can be associated with the elements most sensitive to specific degradation phenomena. The level of information (LOI) therefore plays a central role. In addition to traditional or pre-existing parameters, the HBIM register should include further information layers to identify, for example, materials, state of conservation, pathologies, known vulnerability to specific forms of degradation, and maintenance history.

Distributed HBIM therefore does not coincide with three-dimensional representation alone, but with a parametric structure capable of organising conservation and maintenance information, producing a register of parameters associated with degradation and vulnerability for each object in the model.

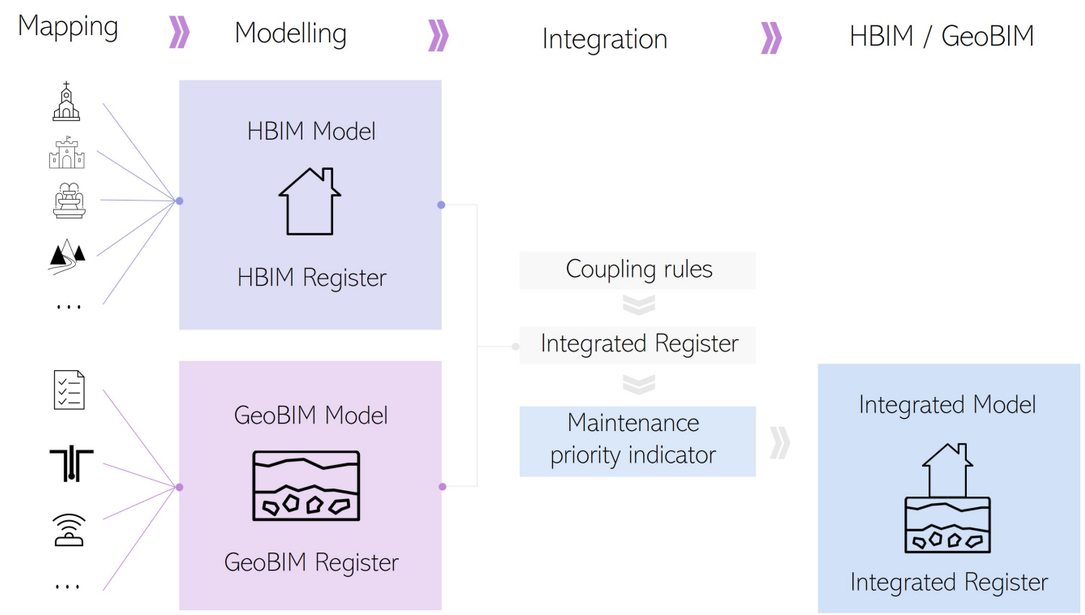


Fig. 3: Schema metodologico.

Fig. 3: Methodological scheme.

ma identifica le porzioni del suolo sotto, attorno o in prossimità del manufatto e trasferisce al registro HBIM gli attributi selezionati. Il trasferimento può essere modulato con aree di *buffer* e pesi basati sulla distanza orizzontale e verticale. Parametri, soglie e pesi restano configurabili in base al caso studio e alla qualità delle fonti.

Nei manufatti articolati, la scomposizione HBIM consente di associare specifici parametri GeoBIM a elementi sensibili, come fondazioni, basamenti, pavimentazioni o murature. Nei manufatti minori, l'asset può essere trattato come unità informativa unica. In entrambi i casi, l'esito è un registro integrato contenente ID, attributi HBIM, attributi GeoBIM e parametri derivati. Il modello finale

Methodology

The methodology organises the coupling between HBIM and GeoBIM as a process of extraction, normalisation and integration of information from the two domains, with the aim of building metrics oriented towards maintenance priority (Fig. 3).

The starting point is the identification and georeferencing of the assets. Each built asset is associated with a unique ID, coor-

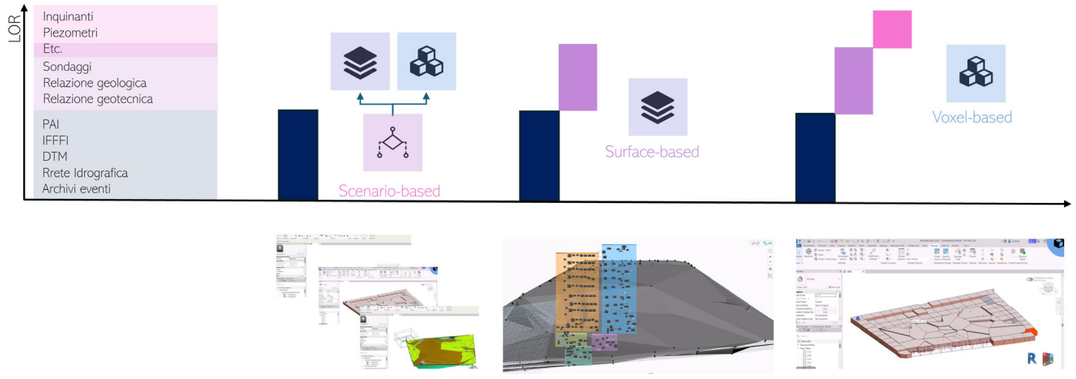


Fig. 4: Configurazione data-driven del modello GeoBIM in funzione delle informazioni disponibili e del livello di affidabilità del dato.

Fig. 4: Data-driven configuration of the GeoBIM model according to the available information and the level of reliability of the data.

non assume valore predittivo deterministico, ma rende esplicite relazioni disperse tra cartografie, rilievi conservativi, relazioni tecniche e conoscenze locali.

L'ultimo passaggio quantifica in modo preliminare la necessità di controllo, manutenzione o approfondimento. A questo scopo viene proposto un indicatore di priorità manutentiva (PM), inteso come schema operativo e non come formula validata:

$$PM = \omega_1 C \times \omega_2 S \times \omega_3 V \times \omega_4 E$$

dove C indica le condizioni osservate; S la suscettività del contesto specifica a un dato fenomeno di degrado; V la vulnerabilità del bene; E l'esposizione; ω_n il peso dei singoli fattori. La classificazione finale è stata articolata in cinque fasce (Tab. 1) che aiutano nella lettura rapida della necessità di intervento. Esso non stabilisce che cosa accadrà, ma supporta la scelta di che cosa controllare, documentare o approfondire.

Test bed moetodologico

L'Alta Valle Cervo, con i comini di Rosazza, Piedicavallo e Campiglia Cervo, costituisce un *test bed* metodologico per verificare l'applicabilità del *workflow* qui proposto in un contesto montano interno. La valle presenta morfologie complesse, versanti acclivi,

dinates, elevation and typology, forming an initial queryable inventory. Subsequently, for each asset, an information model is built, or updated if already available, and calibrated according to the knowledge and decision-making objectives. In the HBIM domain, the LOG depends on resources, scale and the complexity of the asset; the LOI, instead, must include not only traditional BIM parameters, but also information on materials, conservation, pathologies, vulnerability and maintenance. The result is a register of degradation and vulnerability associated with the elements of the model or with the asset as a whole.

In parallel, the GeoBIM model is developed, with a configuration depending on the availability, quality and reliability of the sources. The approach is therefore data-driven. With general territorial data, the model takes a scenario-based form, suitable for general screening; with geological or geotechnical reports, piezometers and interpretable stratigraphic data, a surface-based

Priorità	Livello	Descrizione
Urgente	P5	Rischio immediato per la sicurezza di persone e/o struttura
Alta priorità	P4	Degrado significativo, con possibile evoluzione rapida
Bassa priorità	P3	Problemi presenti, ma non critici nel breve periodo
Bassa priorità	P2	Manutenzione programmabile
Monitoraggio	P1	Nessun intervento richiesto

Priority	Level	Description
Urgent	P5	Immediate risk to the safety of people and/or the structure
High priority	P4	Significant deterioration, with potential for rapid progression
Low priority	P3	Problems are present, but are not critical in the short term
Low priority	P2	Maintenance can be scheduled
Monitoring	P1	No intervention is required

Tab. 1: Classificazione Indicatore di Priorità Manutentiva (PM)

Tab. 1: Maintenance Priority (MP) Indicator Classification

reticolo idrografico strutturante e insediamenti storici legati al torrente Cervo. Il patrimonio diffuso comprende architetture religiose, infrastrutture storiche, ponti e manufatti ordinari di relazione tra borgo, acqua e versante. L'identità materiale del territorio è legata all'uso della pietra locale e alla cultura costruttiva della Bürsch [Aschieri & Fiorino, 2024] (Fig.5). L'applicazione è una traduzione operativa della metodologia in una condizione reale, segnata da dati eterogenei e livelli informativi non uniformi. Le informazioni disponibili—basi topografiche, DTM, *layer* di pericolosità, rete idrografica, archivi di evento, cartografie geologiche, inventario dei manufatti e alcuni dati geotecnici—sono ricondotte a un quadro coerente. Il modello GeoBIM è stato impostato come modello *surface-based*. La Chiesa dei Santi Pietro e Giorgio a Rosazza è assunta come esempio applicativo su un *asset* complesso (Fig.6). Il modello HBIM è stato predisposto con un LOG sufficiente a distinguere basamento, pavimentazioni, murature, superfici esterne e copertura, evitando una geometria sovradimensionata. Il LOI descrive materiali, stato conservativo, patologie, umidità, fessurazioni, accessibilità e dati storici manutentivi.

Il passaggio successivo è l'accoppiamento tra i due registri. Gli elementi HBIM della chiesa vengono georiferiti e interrogati rispetto ai parametri del modello GeoBIM tramite apposto *script* Dynamo. Alle informazioni conservative possono così essere aggiunti attributi di contesto. Nello specifico: pendenza dell'area, distanza dal reticolo idrografico, prossimità a impluvi, unità geologica, condizioni di falda, classi di pericolosità specifiche. L'esito è un registro integrato dell'*asset* che mette in relazione condizioni osservate, vulnerabilità degli elementi edilizi e suscettività del contesto, producendo una classe preliminare di priorità manutentiva per ogni elemento nel modello HBIM della Chiesa. La consultazione dei risultati restituisce classi comprese tra P1 e P2, indicando condizioni complessivamente non critiche e compatibili con un regime di controllo. L'esito conferma quindi un generale stato di sicurezza dell'opera, pur mantenendo aperta la possibilità di affinare la valutazione attraverso l'integrazione progressiva di nuovi dati conservativi, geotecnici o idrogeologici.

model can be developed; with dense point data, time series or spatially distributed parameters, a voxel-based structure may be more appropriate (Fig. 4). The choice depends on the level of reliability of the data (LOR), understood in terms of source, update, spatial accuracy, reliability and consistency with the maintenance purpose.

The aim is not to produce two parallel models, but relatable registers. The HBIM register collects degradation, materials, pathologies and maintenance data; the GeoBIM register describes slope, stratigraphy, groundwater, distance from drainage lines and specific susceptibilities. The operational link is based on a shared georeferencing system and spatial proximity rules. Through a dedicated Dynamo script (Fig. 2), the objects of the GeoBIM model—whether continuous volumes or voxels—are queried in relation to the position of the HBIM elements. The system identifies the portions of soil below, around or near the built asset and transfers the selected attributes to the HBIM register. This transfer can be modulated through buffer areas and weights based on horizontal and vertical distance. Parameters, thresholds and weights remain configurable according to the case study and the quality of the sources.

In complex assets, HBIM decomposition makes it possible to associate specific GeoBIM parameters with sensitive elements, such as foundations, plinths, floors or walls. In minor assets, the whole asset can be treated as a single information unit. In both cases, the outcome is an integrated register containing IDs, HBIM attributes, GeoBIM attributes and derived parameters. The final model does not have deterministic predictive value, but makes explicit relationships that are otherwise dispersed across maps, conservation surveys, technical reports and local knowledge.

The final step provides a preliminary quantification of the need for inspection, maintenance or further investigation. For this purpose, a maintenance priority indicator (PM) is proposed, intended as an operational scheme rather than as a validated formula:

$$PM = \omega_1 C \times \omega_2 S \times \omega_3 V \times \omega_4 E$$

where C indicates the observed conditions; S the susceptibility of the context to

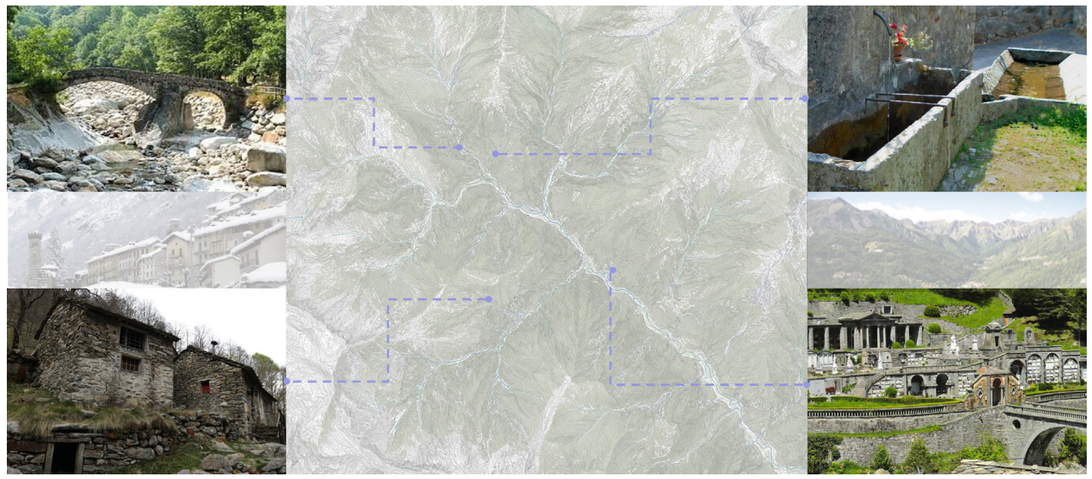


Fig. 5: Inquadramento Valle Cervo

Fig. 5: Overview of the Cervo Valley.

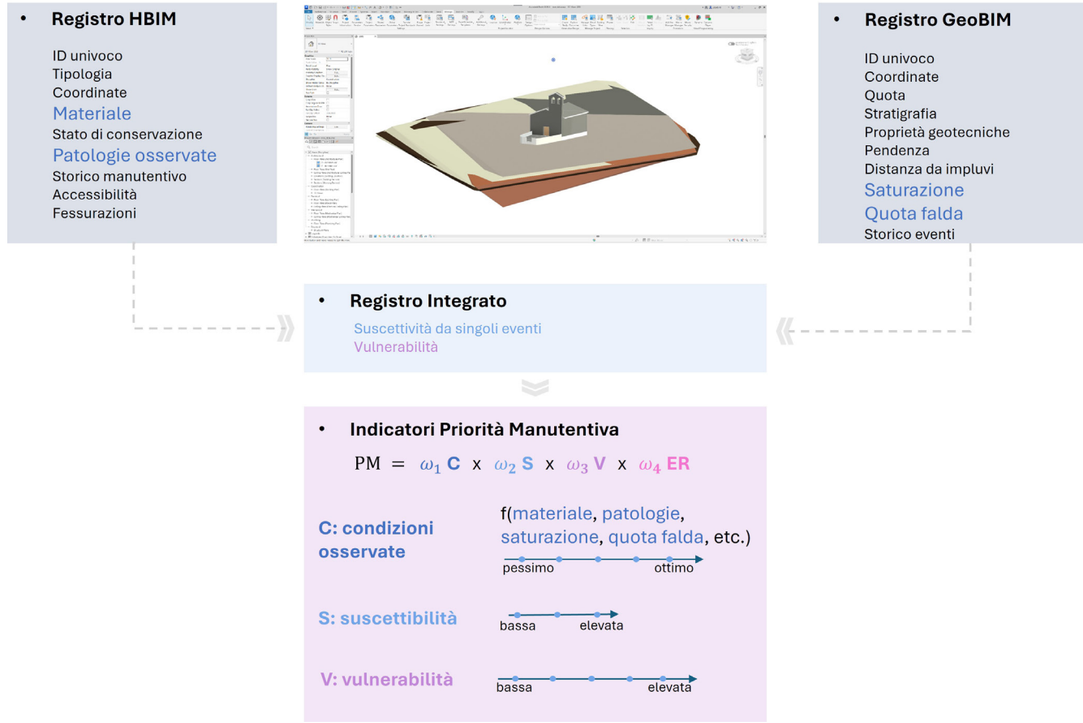


Fig. 6: Schema di integrazione tra registro HBIM e registro GeoBIM per la Chiesa dei Santi Pietro e Giorgio a Rosazza: gli attributi conservativi dell'asset vengono accoppiati ai parametri geotecnici e idrogeologici del contesto, generando un registro integrato e indicatori preliminari di priorità manutentiva.

Fig. 6: Integration scheme between the HBIM register and the GeoBIM register for the Church of Saints Peter and George in Rosazza: the conservation attributes of the asset are coupled with the geotechnical and hydrogeological parameters of the context, generating an integrated register and preliminary maintenance priority indicators.

Conclusioni

Il patrimonio minore nei territori fragili non può essere letto come oggetto isolato. La sua vulnerabilità dipende da caratteri materiali e manutentivi, ma anche dalle relazioni con suolo, acqua, falda, versante e deflussi. Il problema non è soltanto documentare meglio, né aumentare indistintamente la complessità geometrica dei modelli. La questione centrale è connettere dati già disponibili, spesso separati per scala, formato e finalità. L'accoppiamento tra HBIM diffuso e GeoBIM propone una risposta metodologica a questa discontinuità costruendo registri complementari, regole di relazione, attributi di contesto e indicatori operativi per ispezione, monitoraggio e manutenzione preventiva.

Il metodo non intende prevedere il danno né sostituire analisi specialistiche. Il suo campo di applicazione è circoscritto: organizzare priorità, orientare controlli, segnalare urgenze conoscitive e supportare decisioni manutentive in territori con risorse limitate. La sperimentazione in Alta Valle Cervo permetterà di verificare robustezza del *workflow*, qualità degli accoppiamenti e utilità degli

indicatori. In questa prospettiva, il *minor heritage* non necessita soltanto di modelli migliori, ma soprattutto di connessioni migliori.

Bibliografia

Aschieri, D. L. D., & Fiorino, L. (2024). Valle Cervo tra storia, pietra e tentativi di riscatto. *Il Giornale dell'Architettura*.

Aschieri, D. L., Khosravi, M., & Cano, V. C. (2025). *Bridging Above and Below: a Multi-Criteria Evaluation of GeoBIM Modelling Workflows for Contaminated Site Remediation*.

Barca, F., Casavola, P., & Lucatelli, S. (a cura di). (2014). *Strategia nazionale per le Aree interne: definizione, obiettivi, strumenti e governance* (Materiali UVAL, 31). Unità di valutazione degli investimenti pubblici.

Khan, M. S., Kim, I. S., & Seo, J. (2023). A boundary and voxel-based 3D geological data management system leveraging BIM and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 118*, 103277.

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey, 27*(4), 311–327.

Pepe, M., Palumbo, D., Dewedar, A. K. H., & Spacone, E. (2024). Toward to Combination of GIS-HBIM Models for Multiscale Representation and Management of Historic Center. *Heritage, 7*(12), 6966–6980.

Pierro, L., & Scarpinato, M. (2026, 28 gennaio). Niscemi: quando frana una città. *Il Giornale dell'Architettura*.

Pozzoni, L., Barazzetti, L., Cuca, B., & Oteri, A. M. (2024). An integrated HBIM-GIS digital environment for heritage preservation and enhancement in the inner Italian territory. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2/W4-2024*, 357–364.

Regione Piemonte. (2022). *Evento alluvionale del 2-3 ottobre 2020. Primo rapporto*. Torino: Regione Piemonte.

Trigila, A., Lastoria, B., Iadanza, C., Bussettini, M., Mariani, S., D'Ascola, F., Salmeri, A., Cassese, M. L., Pesarino, V., Di Paola, G., Romeo, S., Rischia, I., Dessì, B., Spizzichino, D., Licata, V., & Galloz-zi, P. L. (2025). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. Edizione 2024* (Rapporti ISPRA 415/2025). Roma: ISPRA.

a specific degradation phenomenon; V the vulnerability of the asset; E the exposure; and ω_n the weight of each factor. The final classification is divided into five classes (Tab. 1), supporting a rapid reading of the need for intervention. The indicator does not establish what will happen, but supports the choice of what should be checked, documented or investigated further.

Methodological Test Bed

The Upper Cervo Valley, including the municipalities of Rosazza, Piedicavallo and Campiglia Cervo, serves as a methodological test bed to verify the applicability of the proposed workflow in an inland mountain context. The valley is characterised by complex morphologies, steep slopes, a structuring hydrographic network and historic settlements connected to the Cervo stream. The distributed heritage includes religious architecture, historic infrastructures, bridges and ordinary built assets that mediate the relationship between village, water and slope. The material identity of the territory is linked to the use of local stone and to the building culture of the Bürsch [Aschieri & Fiorino, 2024] (Fig. 5).

The application translates the methodology into an operational process within a real context, marked by heterogeneous data and uneven information levels. The available information—topographic bases, DTM, hazard layers, hydrographic network, event archives, geological maps, asset inventory and some geotechnical data—is brought into a coherent framework. The GeoBIM model was set up as a surface-based model.

The Church of Saints Peter and George in Rosazza is used as an application example on a complex asset (Fig. 6). The HBIM model was prepared with a LOG sufficient to distinguish plinth, floors, walls, external surfaces and roof, while avoiding oversized geometry. The LOI describes materials, state of conservation, pathologies, moisture, cracking, accessibility and historical maintenance data.

The next step is the coupling of the two registers. The HBIM elements of the church are georeferenced and queried against the parameters of the GeoBIM model through a dedicated Dynamo script. Contextual attributes can therefore be added to the conservation information, specifically: slope of the area, distance from the hydrographic network, proximity to drainage lines, geological unit, groundwater conditions and specific hazard classes. The result is an integrated asset register that relates observed conditions, vulnerability of building elements and contextual susceptibility, producing a preliminary maintenance priority class for each element in the HBIM model of the church.

The results return classes between P1 and P2, indicating overall non-critical conditions compatible with a monitoring regime. The outcome therefore confirms a general state of safety of the asset, while leaving open the possibility of refining the assessment through the progressive integration of new conservation, geotechnical or hydrogeological data.

Conclusions

Minor heritage in fragile territories cannot be interpreted as an isolated object. Its vulnerability depends on material and maintenance conditions, but also on its relationships with soil, water, groundwater, slopes and runoff. The issue is not only to improve documentation, nor to increase the geometric complexity of models indiscriminately. The central task is to connect data that are already available, but often separated by scale, format and purpose. The coupling of distributed HBIM and GeoBIM offers a methodological response to this discontinuity by building complementary registers, relational rules, contextual attributes and operational indicators for inspection, monitoring and preventive maintenance.

The method does not aim to predict damage or replace specialist analyses. Its field of application is limited: organising priorities, guiding inspections, identifying knowledge gaps and supporting maintenance decisions in territories with limited resources. The experimentation in the Upper Cervo Valley will make it possible to verify the robustness of the workflow, the quality of the couplings and the usefulness of the indicators. From this perspective, minor heritage does not only require better models, but above all better connections.

Autori

Alberto Sdegno[1]
Michele Libralato[1]
Selin Cengiz[1]

[1] Università degli Studi di Udine

Email

alberto.sdegno@uniud.it
michele.libralato@uniud.it
cengiz.selin@spes.uniud.it

Keywords

VILLA SAVOYE
BIM TO BEM
THERMAL COMFORT
ENERGY PERFORMANCE
DIGITAL MODELING

Comfort termico di Villa Savoye attraverso un workflow BIM-to-BEM

Thermal Comfort of Villa Savoye through BIM-to-BEM Workflow

Abstract

Il comfort termico degli edifici è stato un tema centrale dell'architettura del XX secolo, soprattutto in quella moderna. Questo studio ha la finalità di valutare il comfort termico di Villa Savoye mediante un *workflow* BIM-to-BEM da Revit a IES VE. Le simulazioni, basate su un modello semplificato, evidenziano condizioni di disagio termico, confermando le testimonianze storiche e mostrando il potenziale degli strumenti digitali per analizzare e migliorare la prestazione energetica.

Providing thermally comfortable buildings has been a crucial subject in architecture, especially for 20th century modern architecture. Today digital simulation tools enable us to reassess the thermal performance of iconic modern architecture. The study examines Villa Savoye's thermal comfort using a BIM to BEM workflow from Revit to IES VE. Simplified modeling enabled simulations showing discomfort, validating historical complaints and suggesting ways to improve energy performance.

Introduzione

Garantire il comfort termico è da sempre un obiettivo centrale della progettazione architettonica. Nell'architettura moderna sono stati sviluppati diversi principi per migliorare le prestazioni ambientali e il comfort degli occupanti [Lucchi, 2023].

Oggi gli strumenti di simulazione digitale permettono di rivalutare le prestazioni termiche degli edifici storici [Costa et al., 2024]. Il *Building Information Modeling* (BIM) consente la creazione di modelli digitali accurati [Begić & Galić, 2021], mentre il *Building Energy Modeling* (BEM) permette di simulare prestazioni energetiche e comfort termico [Li et al., 2021]. Il *workflow* BIM-BEM è quindi sempre più rilevante per l'analisi degli edifici [Alhammad et al., 2024].

Nel patrimonio storico, la modellazione digitale è complessa a causa di geometrie articolate e dati incerti sui materiali [Calcerano et al., 2024]. Inoltre, la ricerca sull'interoperabilità BIM-BEM si concentra soprattutto sulle nuove costruzioni [Kamel & Memari, 2019]. Le criticità del *workflow* BIM-to-BEM negli edifici storici restano quindi aperte.

Questo tema è rilevante anche per l'impatto energetico del patrimonio costruito e per le strategie di riduzione delle emissioni, spesso poco applicate agli edifici storici [Franco & Mauri, 2024; Martínez-Molina et al., 2016]. Nel caso del modernismo del XX secolo emerge un paradosso: edifici troppo recenti per essere considerati pienamente patrimonio, ma difficili da riqualificare senza alterazioni profonde [Requena-Ruiz, 2016]. Ne deriva una carenza di studi che integrino requisiti energetici attuali e conservazione delle caratteristiche originarie [Lamberti et al., 2024].

In questo contesto, Villa Savoye di Le Corbusier, pur progettata con attenzione al comfort, è stata spesso criticata per condizioni termiche insoddisfacenti. Le fonti storiche riportano problemi di riscaldamento e *discomfort* [Sully, 2009]. Ciò solleva la domanda su come i metodi di simulazione digitale possano rivalutare tali prestazioni tramite *workflow BIM-to-BEM*.

Lo studio adotta un *workflow BIM-to-BEM* per analizzare il comfort termico di Villa Savoye con Autodesk Revit e IES VE. Il *plugin* Pollination è utilizzato per migliorare l'interoperabilità dei dati. Il processo consente di valutare il comfort termico e di evidenziare criticità di scambio informativo tra BIM e BEM.

I risultati della simulazione offrono indicazioni sulle prestazioni dell'edificio, confermano le testimonianze storiche di *discomfort* e suggeriscono possibili miglioramenti. Più in generale, lo studio mostra il potenziale degli strumenti digitali nella rivalutazione dell'architettura modernista dal punto di vista energetico.

Metodologia

Workflow BIM-to-BEM

Questo lavoro segue un flusso di lavoro BIM-to-BEM strutturato, costituito dalla realizzazione del modello BIM in Autodesk Revit, dalla sua semplificazione, dalla preparazione del modello per il trasferimento dei dati a IES VE tramite il plug-in Pollination e dalla successiva valutazione del comfort termico mediante i moduli di simulazione SunCast e Apache in IES VE. Autodesk Revit è uno strumento BIM completo [Elnabawi, 2020] ed è stato utilizzato per lo sviluppo BIM per la sua ampia diffusione e alle versatili capacità di gestione della progettazione parametrica nel settore delle costruzioni [Lins et al., 2024]. IES VE è una *suite software* commerciale progettata per l'analisi dettagliata della prestazione degli edifici, che consente agli utenti di ottimizzare l'efficienza energetica e il comfort degli occupanti durante l'intero processo progettuale [Crawley et al., 2008]. In questo studio è stato utilizzato il *workflow* Autodesk Revit - plug-in Pollination - IES VE, poiché tale *workflow* mostra un elevato potenziale per superare i problemi convenzionali di scambio dei dati [Ladybug Tools, 2026].

Caso di studio: Villa Savoye

Villa Savoye fu progettata da Le Corbusier tra il 1928 e il 1929 e costruita tra il 1929 e il 1931 a Poissy, circa 30 km dal centro di Parigi. L'edificio ha subito nel tempo vari interventi di manutenzione e restauro [Caccia Gherardini & Olmo, 2021]. In questo studio si considera lo stato originario della villa, in quanto l'analisi si concentra sui principi dell'architettura moderna.

Lo studio valuta le prestazioni termiche dell'edificio. La struttura portante è in calcestruzzo armato, mentre l'involucro comprende 430 m^2 di pareti esterne in laterizio, finestre a nastro con telaio metallico e 146 m^2 di superfici vetrate [Benton, 1987]. Sono inoltre presenti 336 m^2 di copertura in calcestruzzo e 205 m^2 di superficie del piano terra esposta.

Per quanto riguarda il sistema di climatizzazione, la documentazione disponibile è limitata a materiale fotografico. L'analisi delle immagini indica un sistema di riscaldamento decentralizzato con 16 radiatori, collocati soprattutto lungo le pareti perimetrali esterne, e un unico camino nella zona giorno.

L'involucro poco efficiente e le testimonianze di insoddisfazione degli occupanti rendono Villa Savoye un caso significativo per analizzare le implicazioni termiche dell'architettura modernista.

Sviluppo del modello BIM e semplificazione del modello

È stato sviluppato un modello BIM ad alta fedeltà di Villa Savoye utilizzando Autodesk Revit, sulla base dei disegni architettonici disponibili, inclusi piante, sezioni e documentazione storica. Il modello mira a rappresentare accuratamente la geometria e l'organizzazione spaziale dell'edificio (Fig. 1).

La semplificazione del modello BIM comporta la rimozione dei componenti non essenziali per accelerare i tempi di esportazione e minimizzare gli errori di conversione [An et al., 2024]. La semplificazione del modello è stata necessaria per garantire la compatibilità con gli strumenti BEM, e la strategia più adottata per questo trasferimento è rappresentata da strumenti correttivi middleware [Ciccozzi et al., 2023]. Il processo avviene a partire dal modello BIM dettagliato mostrato in Fig. 1. Durante queste fasi di semplificazione sono stati analizzati i componenti geometrici e le superfici specifiche (Fig. 2). L'esportazione diretta iniziale da Revit a IES VE tramite gbXML non ha avuto successo, poiché errori persistenti del modello hanno impedito al motore software di IES VE di eseguire la simulazione energetica. Per superare questo problema, in questo studio è stato utilizzato il *plugin* Pollination come *middleware* tra Revit e IES VE. Il *plugin* snellisce la transizione dei dati convertendo la geometria BIM complessa nel formato file GEM (VE geometry file) semplificato e validato. Poiché GEM è nativo di IES VE, il modello risultante è pronto per la simulazione energetica in ApacheSIM, riducendo significativamente gli errori del modello

Introduction

Ensuring thermal comfort for building occupants has long been a fundamental objective of architectural design. Especially in modern architecture, several design principles were developed to enhance environmental performance and improve occupant comfort [Lucchi, 2023]. Today, digital simulation tools make it possible to re-evaluate the thermal performance of historical buildings [Costa et al., 2024]. Building Information Modeling (BIM) enables the creation of accurate digital representations of buildings [Begić & Galić, 2021], while Building Energy Modeling (BEM) tools allow the assessment of energy performance and thermal comfort through simulation [Li et al., 2021]. BIM-BEM workflow has therefore become increasingly important for building performance analysis [Alhammad et al., 2024].

In heritage buildings creating reliable digital representations is often challenging due to complex geometries and uncertain material information relative to the new buildings [Calcerano et al., 2024]. The current studies related to the issue of interoperability between BIM and BEM focus mainly on the case of new building constructions [Kamel & Memari, 2019]. Consequently, the interoperability challenges that may arise during BIM-to-BEM workflows when assessing the thermal comfort of heritage buildings remain an open research question.

This question is highly crucial considering the heritage buildings' contribution to global energy demand and emissions and their potential impact on reducing global phenomena. While definitive steps have been taken to reduce these global trends, applying these energy-reduction strategies to the heritage buildings are mostly excluded from the regulations [Franco & Mauri, 2024; Martínez-Molina et al., 2016]. Particularly to twentieth-century modernist heritage paradox emerge here: 20th centuries modernist buildings are too recent to be socially understood as monuments; yet their experimental design makes it difficult to renovate them without dramatic changes [Requena-Ruiz, 2016]. Consequently, there is a clear lack of research on how to reconcile the demanding energy standards of today with the preservation of the unique thermal fabric and design principles that define modernist design principles [Lamberti et al., 2024].

Given these considerations, despite its careful design to enhance occupant's thermal comfort, one of the most iconic examples of modern architecture, Villa Savoye designed by Le Corbusier, has been criticized for poor thermal comfort conditions. Historical accounts describe problems such as insufficient heating which create uninhabitable conditions [Sully, 2009]. These contradictions raise an important question: To what extent can modern digital simulation tools be used to reassess the thermal comfort performance of Villa Savoye through BIM-to-BEM workflows. To this end, this study utilizes a BIM-to-BEM workflow to evaluate the thermal comfort of Villa Savoye via Autodesk Revit and Integrated Environmental Solution's Virtual Environment (IES VE). The Pollination plugin is integrated to address conventional data exchange challenges, specifically aiming to provide practical validation where existing literature remains limited.

The proposed workflow allows thermal comfort conditions while also revealing interoperability challenges during the BIM-to-BEM transfer process. The simulation results provide insights into the thermal performance of Villa Savoye, support historical accounts of thermal discomfort, and highlight potential strategies for improving thermal efficiency. More broadly, the study demonstrates how digital simulation tools can support the environmental reassessment of historically significant architecture.

Methodology

BIM-TO-BEM Workflow

The research follows a structured BIM-to-BEM workflow consisting of BIM Model preparation in Autodesk Revit, model simplification, model preparation through Pollination plug-in for data transfer to IES VE, and subsequent energy performance assessment using SunCast and Apache simulation modules in IES VE. Autodesk Revit is a comprehensive BIM tool [Elnabawi, 2020], was utilized for BIM development due to its widespread adoption and versatile parametric customization capabilities in the AEC industry [Lins et al., 2024]. IES VE is a commercial software suite designed for detailed building performance analysis, enabling users to optimize energy efficiency and occupant comfort throughout the design

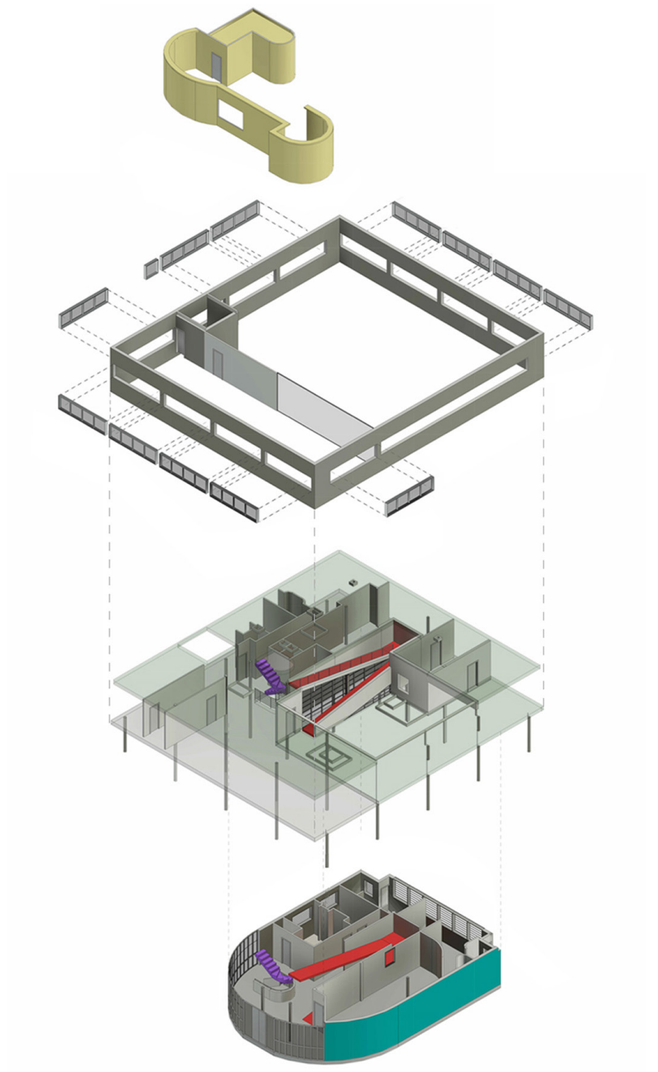


Fig. 1: Esploso assonometrico del modello BIM dettagliato di Villa Savoye.

Fig. 1: Exploded axonometric drawing of detailed Villa Savoye BIM model.

[Ladybug Tools, 2026]. Sono state applicate diverse strategie di semplificazione: rimozione dei *pilotis*, segmentazione delle pareti curve in elementi piani, semplificazione delle tipologie di parete e di solaio e definizione delle terrazze come componenti di ombreggiamento (Fig. 3).

Preparazione del modello BEM e analisi del comfort termico

La geometria ottenuta da Revit è stata importata nella sezione ModelIT di IES VE, modulo per importare e gestire la geometria dell'edificio. ModelIT ha generato il modello per il modulo ApacheSIM per l'analisi energetica e termica, indicando l'assenza di errori di conversione. Nell'ambiente ApacheSIM di IES VE sono state definite le proprietà termiche dei materiali, le assunzioni relative al sistema HVAC e i profili di occupazione di Villa Savoye.

L'analisi fotografica ha rivelato un impianto di riscaldamento costituito da 16 radiatori. Per modellare questi elementi in IES VE, i loro dati dimensionali sono stati stimati a partire dalle fotografie e confrontati con schede tecniche di radiatori standard di settore. Le capacità termiche specifiche sono state calcolate e assegnate individualmente alle rispettive zone termiche all'interno dell'interfaccia Tabular Space Data di IES VE. I dati relativi alle proprietà termiche dei materiali sono stati raccolti dalla documentazione storica digitale di edifici generici degli anni Trenta (Tab. 1). Il comfort termico è stato valutato mediante simulazione dinamica eseguita con IES VE. I dati climatici sono stati definiti con il file meteorologico corrispondente alla localizzazione dell'edificio. Le simulazioni sono state condotte utilizzando il modulo SunCast per l'analisi della radiazione solare e il modulo ApacheSIM per la simulazione della prestazione termica.

L'analisi si è concentrata su ambienti selezionati e su specifici periodi temporali per cogliere le variazioni stagionali nelle condizioni di comfort termico.

process [Crawley et al., 2008]. In this study Autodesk Revit - Pollination plug-in - IES VE workflow was used since this workflow shows great potential to overcome conventional data exchange problems [Ladybug Tools, 2026].

Case Study: Villa Savoye

Villa Savoye was designed by Le Corbusier in 1928–1929, built in 1929–1931 located at Poissy, almost 30 km from the center of Paris. The building went under repair and several restorations [Caccia Gherardini & Olmo, 2021]. In this research, Villa Savoye's original state was considered since study focuses on evaluating the modern architecture principle. The study evaluates the thermal efficiency of Villa Savoye, main load-bearing system is a reinforced concrete system, and the envelope is composed by 430 m² exterior brick walls, metal framed ribbon windows with 146 m² glass surface with 336 m² concrete roof surface and 205 m² exposed ground floor [Benton, 1987]. Additionally, about HVAC system, only incomplete photographic documentation is available. Photographic analysis revealed a decentralized heating layout comprising 16 radiators primarily mounted on the exterior perimeter walls, alongside a single fireplace in the living area. The building's inefficient envelope, combined with documented occupant dissatisfaction, makes Villa Savoye an ideal case study for examining the thermal implications of modernist design.

BIM Model Development and Model Simplification

A high-fidelity BIM model of Villa Savoye was developed using Autodesk Revit based on available architectural drawings including plans, sections and historical documentation. The model aimed to accurately represent the building's geometry and spatial organization (Fig. 1). BIM model simplification involves removing non-essential components to accelerate export times and minimize conversion errors. [An et al., 2024]. Model simplification was necessary to ensure compatibility with BEM tools and most adopted strategy for this transfer is middleware corrective tools [Ciccozzi et al., 2023].

The process was initiated based on the detailed BIM model shown in Fig. 1. During these simplification stages, geometric components and specific surface areas were analyzed (Fig. 2). The initial direct Revit-to-IES VE export via gbXML was unsuccessful, as persistent model errors prevented IES VE software engine from executing the energy simulation. To overcome this issue, this study implemented the Pollination plugin as a middleware solution between Revit and IES VE. The plugin streamlines the data transition by converting complex BIM geometry into a clean, validated GEM file format.

Because GEM is native to IES VE, the resulting model is ready for energy simulation in ApacheSIM, significantly reducing model errors [Ladybug Tools, n.d.]. Several simplification strategies were applied the removal of *pilotis*, segmentation of curved walls into planar elements, simplification of wall and floor types and definition of terraces as shading components (Fig. 3).

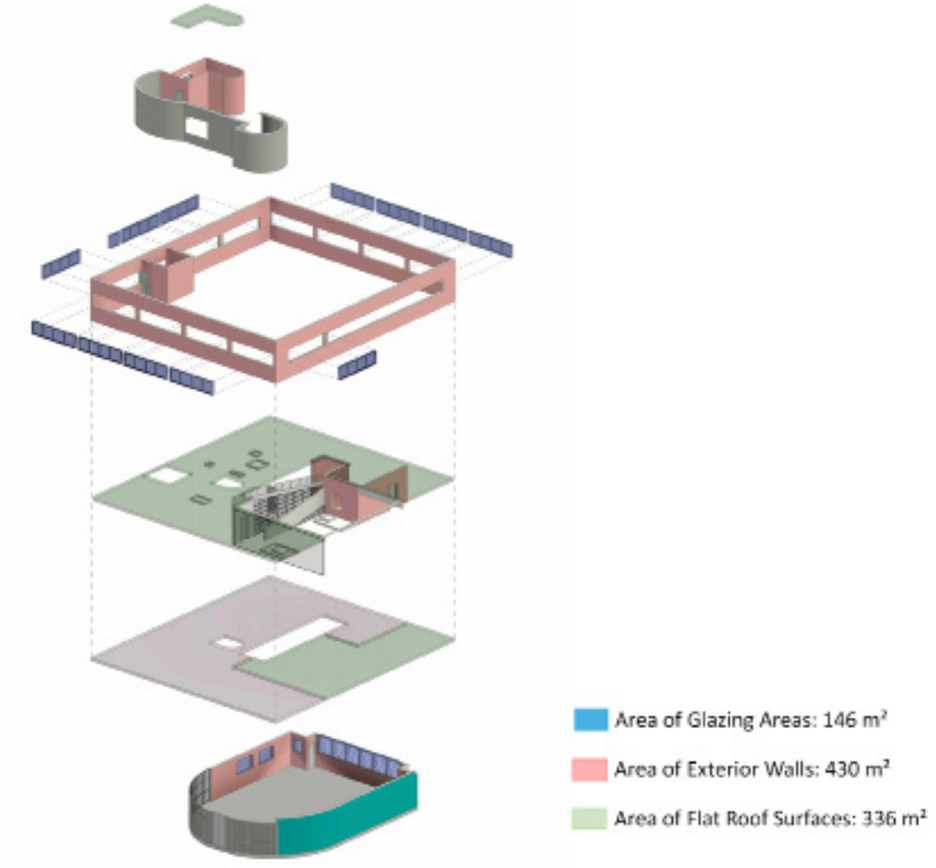
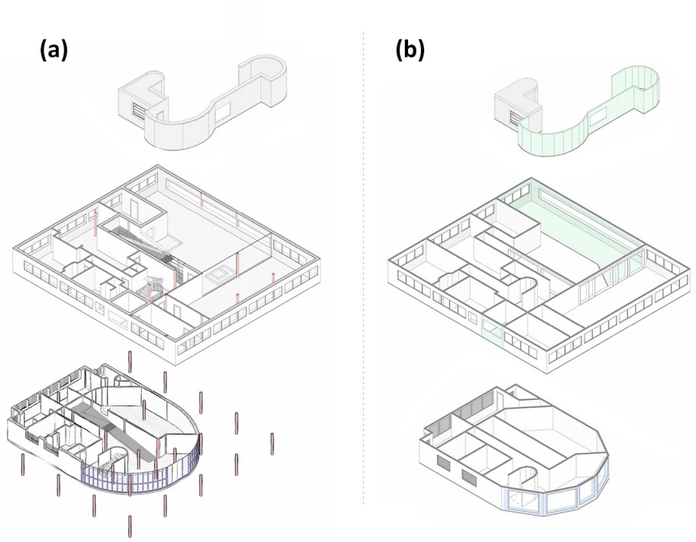


Fig. 2: Visualizzazione dettagliata dei componenti dell'involucro edilizio.

Fig. 2: Detailed visualization of the components of the building envelope.



Element	Detailed Revit Model	Simplified Revit Model
Columns	Architectural Columns	X
Curtain Wall	Curved Curtain Walls	Segmented Exterior Walls
Exterior walls	30 cm exterior walls	10 cm walls
Interior walls	10 cm walls	10 cm walls
Ground Floor Slab	30 cm generic floor	30 cm generic floor
First Floor Slab	20 cm generic floor	30 cm generic floor
Roof Slab	30 cm generic roof	30 cm generic roof
Curved Curtain Wall / Segmented Exterior Wall		
Columns		Shading

Fig. 3: Esploso assonometrico del modello BIM dettagliato (a) e del modello BIM semplificato (b). La tabella di destra riporta le semplificazioni applicate.

Fig. 3: (a) Exploded axonometric drawing of the detailed BIM model (b) Simplified BIM model. The table on the right reports the simplifications applied.

Il Voto Medio Previsto, (Predicted Mean Vote, PMV) è stato utilizzato come indicatore principale di comfort.

Il PMV è una variabile che descrive la sensazione termica media per un ampio gruppo di persone nello stesso ambiente, adottata in standard quali ISO 7730 e ASHRAE 55.

Utilizza una scala a 7 punti compresa tra -3 (freddo) e +3 (caldo), con 0 che indica la neutralità termica [Cheung et al., 2019]. Il PMV è stato calcolato all'interno di IES VE integrando i parametri ambientali simulati (temperature dell'aria e radiante, umidità e velocità dell'aria tramite ApacheSIM) con fattori personali standard per il livello di attività - tasso metabolico (Met) e livello di abbigliamento (Clo) [The Building Performance Modeling Handbook, 2025].

I valori di PMV degli ambienti selezionati di Villa Savoye sono stati valutati per il periodo invernale ed estivo.

Il sistema di riscaldamento in IES VE è stato definito a partire dai radiatori individuati nella documentazione fotografica ed è stato impostato come sistema centralizzato nella sezione ApacheSIM. La capacità dei radiatori è stata derivata da modelli di radiatori simili attualmente in produzione.

Interpretazione del comfort termico

Per garantire l'affidabilità del *workflow* BIM-to-BEM, sono stati anzitutto valutati il modello trasferito e la configurazione della simulazione. Il confronto tra il modello BIM originale e il modello BEM semplificato ha mostrato che le principali caratteristiche architettoniche e i componenti dell'involucro sono stati preservati nonostante le semplificazioni geometriche. Le strategie di semplificazione sono state l'unificazione di tipologie di parete, solaio e copertura termicamente equivalenti, la segmentazione delle pareti curve e la rimozione di componenti strutturali quali *pilotis*, scale e rampe, al fine di migliorare la compatibilità della simulazione. L'esportazione diretta del modello BIM in IES VE tramite il formato standard gbXML ha prodotto significative incoerenze topologiche, in particolare fori esterni e superfici non planari. Implementando il *plugin* Pollination, tali incoerenze geometriche sono state mitigate mediante algoritmi automatizzati di *snapping* dei vertici e planarizzazione. Questa transizione ha consentito un processo di trasferimento dei dati più stabile, riducendo gli errori geometrici e minimizzando le correzioni manuali. Nel complesso, il *workflow* ha fornito una base affidabile per la successiva analisi della prestazione termica. Mentre il trasferimento diretto tramite gbXML non ha avuto successo ed è risultato dispendioso in termini di tempo, il modello architettonico semplificato è stato importato con successo in IES VE tramite il *plugin* Pollination (Fig. 4).

Nella sezione ModelIT è stata trasferita a IES VE solo la geometria dell'edificio e le proprietà termiche dei materiali sono state definite nell'ambiente ApacheSIM di IES VE. Per valutare la prestazione di comfort termico dell'edificio, sono stati analizzati i valori di *Predicted Mean Vote* (PMV) per spazi selezionati. I valori di PMV degli ambienti selezionati di Villa Savoye sono stati valutati per l'inverno e per il periodo estivo (Fig. 5).

BEM Model Preparation and Thermal Comfort Analysis

Transferred geometry from Revit was imported In ModelIT section of IES VE, the central hub for creating, importing, and managing building geometry. The model performed no error in the report created in ModelIT section meaning that model was ready to be sent to ApacheSIM module for energy and thermal performance . In the ApacheSIM environment of IES VE thermal properties of materials, HVAC system assumptions and occupant profiles of Villa Savoye were defined. Photographic analysis revealed a heating system comprising 16 radiators. To model these elements in IES VE, their dimensional data was estimated from photographs and mapped against industry-standard radiator specification charts. The specific heating capacities were calculated and individually assigned to their respective thermal zones within the IES VE Tabular Space Data interface. The data for the thermal properties of materials were collected from the digital historic documentation of generic buildings from 1930's (Tab. 1).

Thermal comfort was evaluated using dynamic simulation performed using IES VE. Climate data were defined with the weather file corresponding to the building's location from. Simulations were conducted using the module SunCast for solar radiation analysis and the module ApacheSIM for thermal performance simulation.

The analysis focused on selected rooms and specific time periods to capture seasonal variations in thermal comfort conditions. The Predicted Mean Vote (PMV) index was used as the primary comfort indicator.

PMV is a variable that describes an average thermal sensation for a large group of people in the same environment adopted in standards such as ISO 7730 and ASHRAE 55. It uses a 7-point scale ranging between -3 (cold) to +3 (hot) with 0 meaning thermally neutral [Cheung et al., 2019]. PMV was calculated within IES VE by integrating simulated environmental parameters (air and radiant temperatures, humidity, and air speed via ApacheSIM) with standard personal factors for activity level-metabolic rate(Met) and Clothing Level (Clo) [The Building Performance Modeling Handbook, n.d.]. PMV

Componente edilizio	Materiale	Spessore (cm)	Valore U (W/m²K)
Parete esterna	Laterizio	30	1.42
Solaio del piano terra	Calcestruzzo armato	31	2.50
Copertura	Calcestruzzo armato	31	2.40
Finestra	Telaio metallico + vetro	-	5.66
Parete interna	Laterizio	10	1.94
Soffitto interno	Calcestruzzo armato	27.5	2.22

Tab. 1: Proprietà termiche dei componenti edilizi.

Building component	Material	Thickness (cm)	U value (W/m²K)
Exterior Wall	Brick	30	1.42
Ground Floor	Reinforced Concrete	31	2.50
Roof	Reinforced Concrete	31	2.40
Window	Metal Frame + Glass	-	5.66
Internal Wall	Brick	10	1.94
Internal Ceiling	Reinforced Concrete	27.5	2.22

Tab. 1: Thermal properties of building components.

I risultati rivelano che in Villa Savoyegli occupanti sono sottoposti ad un significativo disagio termico, sia in condizioni invernali sia estive. La simulazione ha permesso di ottenere le serie temporali dei PMV, confermando le lamentele degli occupanti e mostrando che il sistema di riscaldamento era insufficiente a garantire il comfort termico durante i periodi invernali studiati. Durante la stagione estiva, gli spazi analizzati hanno mostrato una scarsa prestazione di comfort termico, in particolare nel mese di luglio. I valori di PMV si sono avvicinati a +2.5 durante gli intervalli di picco, indicando sensazioni di "caldo". Questo stress termico è in gran parte riconducibile all'elevato rapporto vetratura/parete delle caratteristiche finestre a nastro dell'edificio, che permette un eccessivo guadagno termico solare.

Conclusioni

Questo studio ha valutato la prestazione di comfort termico di Villa Savoye attraverso un workflow BIM-to-BEM. I risultati dimostrano che:

- La semplificazione del modello è necessaria
- L'interoperabilità BIM-BEM rimane complessa,
- Oltre alla valutazione energetica, il BEM costituisce una metodologia per migliorare la comprensione degli edifici storici.

I risultati evidenziano che la perdita di dati, le incoerenze geometriche e la traduzione problematica rimangono sfide chiave di interoperabilità nel *workflow BIM-to-BEM* [Andriamamonjy et al., 2019]. Per superare le complessità dei dati geometrici e semantici dettagliati, la semplificazione del modello è ancora necessaria [Vaz et al., 2024]. In questa ricerca, l'integrazione tra Autodesk Revit e IES VE è stata snellita con successo tramite il *plugin* Pollination. A differenza dei metodi convenzionali, la validazione da parte di Pollination delle zone termiche e dei confini prima dell'esportazione offre un *workflow* più rapido e robusto rispetto ai trasferimenti diretti di dati compromessi da errori geometrici e dalla ri-zonizzazione manuale.

I risultati PMV indicano che Villa Savoye presenta prestazioni insufficienti in termini di comfort termico rispetto agli standard contemporanei, sia in condizioni invernali sia estive. Durante l'inverno, l'edificio subisce un riscaldamento insufficiente a causa di un sistema di riscaldamento inadeguato. Al contrario, le simulazioni

values of selected rooms of Villa Savoye were assessed for winter and summer period. Heating system in IES VE was defined from the radiators that were find in the photographic documentation and it was defined as a centralized system in the ApacheSIM section. The capacity of the radiators has been derived from similar models.

Thermal comfort interpretation

To ensure the reliability of the BIM-to-BEM workflow, the transferred model and simulation setup were first evaluated. Comparison between the original BIM model and the simplified BEM model showed that the main architectural features and envelope components were preserved despite geometric simplifications. Simplification strategies included unifying thermally equivalent wall, floor, and roof types, segmenting curved walls, and removing non-thermal components such as *pilotis*, stairs, and ramps to improve simulation compatibility. The direct export of the BIM model to IES VE via standard gbXML format resulted in significant topological inconsistencies, specifically external holes and non-planar surfaces. By implementing the Pollination plug-in, these geometric inconsistencies were mitigated through automated vertex snapping and planarization algorithms. This transition enabled a more stable data transfer process by reducing geometry errors occurring and minimizing manual corrections. Overall, the workflow provided a reliable basis for subsequent thermal performance analysis.

While the direct gbXML transfer was unsuccessful and time-consuming, the simplified

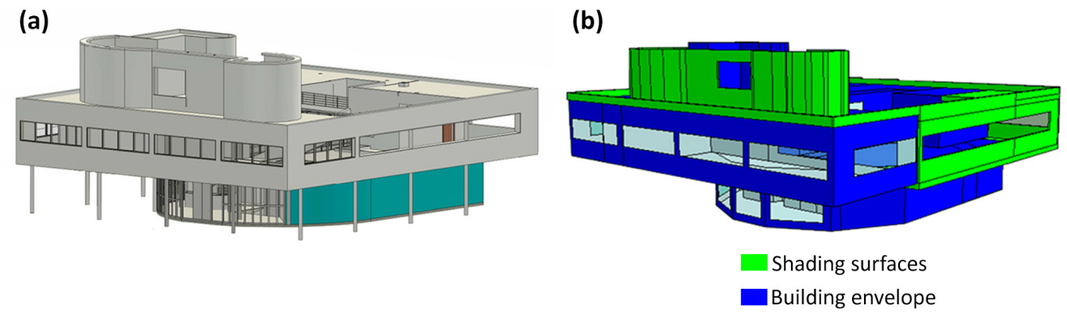


Fig. 4: (a) Modello dettagliato di Villa Savoye da Revit (b) Modello energetico schematico di Villa Savoye da IES VE.

Fig. 4: (a) Detailed model of Villa Savoye from Revit (b) Schematic Energy Model of Villa Savoye from IES VE.

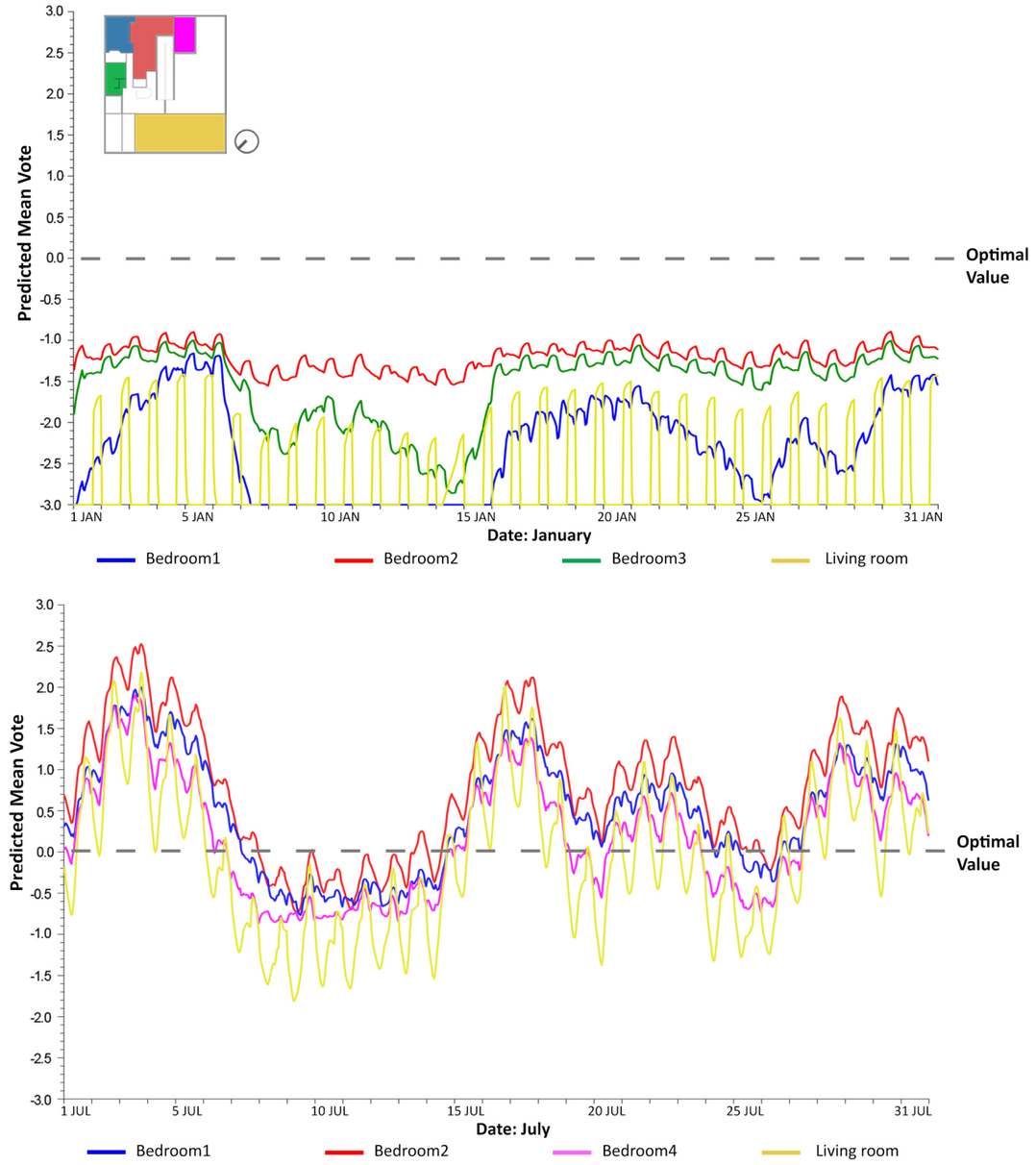


Fig. 5: Predicted Mean Vote (PMV). (a) Simulazione invernale (dal 1 gennaio al 31 gennaio) (b) Simulazione estiva (dal 1 luglio al 31 luglio).

Fig. 5: Predicted Mean Vote(PMV). (a) Wintertime simulation (1 January to 31 January (b) Summertime simulation (1 July to 31 July).

estive rivelano surriscaldamento - in particolare negli ambienti sud-orientali e sud-occidentali - determinato da elevati rapporti finestra/parete.

Questi risultati orientano la futura ricerca sul patrimonio storico mediante *workflow BIM-to-BEM*, validando al contempo le fonti storiche, analizzando le condizioni operative e individuando

architectural model was successfully imported into IES VE via Pollination plugin (Fig. 4).

Only building geometry was transferred to IES VE in ModelIT section and material thermal properties were defined in the ApacheSIM environment of IES VE. To assess

i miglioramenti di efficienza necessari per un ambiente costruito sostenibile e a basse emissioni di carbonio.

In lavori futuri saranno studiati potenziali miglioramenti del comfort interno mediante l'aggiunta di pannelli ombreggianti. Sarà condotta un'analisi parametrica utilizzando lo strumento Dynamo per Revit.

Bibliografia

Alhammad M., Eames M., & Vinai R. (2024). Enhancing Building Energy Efficiency through Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Modeling (BEM) Integration: A Systematic Review. In *Buildings*, n. 14(3), pp. 581. Basel: MDPI.

An N., Li X., Yang H., Pang X., Gao G., & Ding D. (2024). From Building Information Modeling to Building Energy Modeling: Optimization study for efficient transformation. In *Buildings*, n. 14(8), pp. 2444. Basel: MDPI.

Andriamamonjy A., Saelens D., & Klein R. (2019). A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation. In *Journal of Building Engineering*, n. 22, pp. 513-527. Amsterdam: Elsevier.

Begić H., & Galić M. (2021). A systematic review of Construction 4.0 in the context of the BIM 4.0 premise. In *Buildings*, n. 11(8), pp. 337. Basel: MDPI.

Benton T. (1987). *The Villas of Le Corbusier: 1920-1930*. New Haven: Yale University Press.

Caccia Gherardini S., & Olmo C. (2021). The cat and the ball of yarn: Interweaving the threads of the history and restoration of the Villa Savoye (1970-1986). In LC. *Revue de Recherches sur Le Corbusier*, n. 4, pp. 10. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

Calcerano F., Thravalou S., Martinelli L., Alexandrou K., Artopoulos G., & Gigliarelli E. (2024). Energy and environmental improvement of built heritage: HBIM simulation-based approach applied to nine Mediterranean case-studies. In *Building Research & Information*, n. 52(1-2), pp. 225-247. Abingdon: Taylor & Francis.

Cheung T., Schiavon S., Parkinson T., Li P., & Brager G. (2019). Analysis of the accuracy on PMV-PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. In *Building and Environment*, n. 153, pp. 205-217. Amsterdam: Elsevier.

Ciccozzi A., De Rubeis T., Paoletti D., & Ambrosini D. (2023). BIM to BEM for building energy analysis: A review of interoperability strategies. In *Energies*, n. 16(23), pp. 7845. Basel: MDPI.

Costa A. P., Cuperschmid A. R. M., & Neves L. O. (2024). HBIM and BEM association: Systematic literature review. In *Journal of Cultural Heritage*, n. 66, pp. 551-561. Amsterdam: Elsevier.

Crawley D. B., Hand J. W., Kummert M., & Griffith B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. In *Building and Environment*, n. 43(4), pp. 661-673. Amsterdam: Elsevier.

Elnabawi M. H. (2020). Building Information Modeling-Based Building Energy Modeling: Investigation of interoperability and simulation results. In *Frontiers in Built Environment*, n. 6, pp. 573971. Lausanne: Frontiers Media.

Franco G., & Mauri S. (2024). Reconciling heritage buildings preservation with energy transition goals: Insights from an Italian case study. In *Sustainability*, n. 16(2), pp. 712. Basel: MDPI.

Integrated Environmental Solutions. (2025). The building performance modeling handbook. Retrieved May 5, 2026, from https://www.iesve.com/corporate/guides/building-performance-modeling-handbook.pdf

Kamel E., & Memari A. M. (2019). Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. In *Automation in Construction*, n. 97, pp. 164-180. Amsterdam: Elsevier.

Ladybug Tools LLC. (2026). Pollination for IES VE. Retrieved May 5, 2026, from https://www.pollination.solutions/in/iesve

Lamberti G., Contrada F., & Kindinis A. (2024). Exploring adaptive strategies to cope with climate change: The case study of Le Corbusier's Modern Architecture retrofitting. In *Energy and Buildings*, n. 302, pp. 113756. Amsterdam: Elsevier.

Li Q., Zhang L., Zhang L., & Wu X. (2021). Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit. In *Energy*, n. 237, pp. 121509. Amsterdam: Elsevier.

Lins E. J. M., Palha R. P., Sobral M. do C. M., Araújo A. G. de, & Marques É. A. T. (2024). Application of Building Information Modelling in construction and demolition waste management: Systematic review and future trends supported by a conceptual framework. In *Sustainability*, n. 16(21), pp. 9425. Basel: MDPI.

Lucchi E. (2023). Energy and climatic performances of modern architecture: A complete overview of building physics implications. In *Proceedings of The 1st International Online Conference on Buildings*. Online, 24-26 October 2023, vol. 53, pp. 19. Basel: MDPI.

Martinez-Molina A., Tort-Ausina I., Cho S., & Vivancos J.-L. (2016). Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 61, pp. 70-85. Amsterdam: Elsevier.

Requena-Ruiz I. (2016). Thermal comfort in twentieth-century architectural heritage: Two houses of Le Corbusier and André Wogenscky. In *Frontiers of Architectural Research*, n. 5(2), pp. 157-170. Amsterdam: Elsevier.

Sully N. (2009). Modern Architecture and Complaints about the Weather, or, "Dear Monsieur Le Corbusier, It is still raining in our

the thermal comfort performance of the building, Predicted Mean Vote (PMV) values were analyzed for selected spaces. PMV values of selected rooms of Villa Savoye were assessed for winter and summertime (Fig. 5).

The results reveal that Villa Savoye experiences significant thermal discomfort under both winter and summer conditions. The simulation reports PMV time series, confirming occupants' complaints and showing that the heating system was insufficient to ensure thermal comfort during the studied periods of wintertime. During the summer season, the analyzed spaces exhibited poor thermal comfort performance, particularly in July. PMV values approached almost +2.5 during peak intervals, signifying "hot" sensations. This thermal stress is largely relatable to the high glazing ratio of the building's characteristic ribbon windows, which facilitates excessive solar heat gain.

Conclusions

This study investigated the thermal comfort performance of Villa Savoye through a BIM-to-BEM workflow. The results demonstrate that:

- Model simplification is necessary
- BIM–BEM interoperability remains challenging,
- Beyond energy assessment, BEM serves as a methodology to improve the understanding of historical buildings.

The findings highlight that data loss, geometric inconsistencies, and problematic translation remain key interoperability challenges in the BIM-to-BEM workflow [Andriamamonjy et al., 2019]. To overcome the complexities of detailed geometric and semantic data, model simplification is still necessary [Vaz et al., 2024]. In this research, the integration between Autodesk Revit and IES VE was successfully streamlined via the Pollination plugin. Unlike conventional methods, Pollination's validation of thermal zones and boundaries before export offers a faster, more robust workflow than direct data transfers compromised by geometric errors and manual re-zoning.

The PMV results indicate that Villa Savoye performs insufficiently in terms of thermal comfort for contemporary standards under both winter and summer conditions. During winter, the building experiences underheating due to an inadequate heating system. Conversely, summer simulations reveal overheating-particularly in south-eastern and southwestern rooms-driven by high window-to-wall ratios.

These findings guide future BIM-to-BEM heritage research while validating historical sources, analyzing operative conditions, and identifying efficiency improvements necessary for a sustainable, low-carbon built environment.

In future work, potential improvements to indoor comfort with the addition of shading panels will be studied. A parametric analysis will be undertaken using the tool Dynamo for Revit.

garage...". In *M/C Journal*, n. 12(4). Brisbane: Queensland University of Technology.

Vaz C. F., Guilherme L. L. de F., Maciel A. C. F., Araujo A. L. D., Costa B. B. F. D., & Haddad A. N. (2024). Building Information Modeling/Building Energy Simulation Integration Based on Quantitative and Interpretative Interoperability Analysis. In *Infrastructures*, n. 9(5), pp. 84. Basel: MDPI.

Autori

Luca Chiavacci[1]
Hangjun Fu[2]
Anna Dell'Amico[2]

Email

luca.chiavacci@unifi.it
hangjun.fu@unipv.it
anna.dellamico@unipv.it

[1] DIDA – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Firenze
[2] DICAr – Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia

Strutture metalliche offshore nel settore energy: strategie per la generazione di modelli informativi 3D reality-based

Offshore metallic structures in the energy sector: strategies for the generation of reality-based 3D information models

Keywords

BROWNFIELD
DIGITAL TWIN
SCAN-TO-BIM
DECOMMISSIONING
INDUSTRIAL ARCHAEOLOGY

Abstract

La documentazione di piattaforme *Brownfield* richiede *workflow* strutturati che integrino validazione metrica e modellazione parametrica. La digitalizzazione della complessità impiantistica genera, tramite processi *Scan-to-BIM*, un *Digital Twin* orientato alla gestione operativa, al *decommissioning* e alla conservazione della memoria tecnica.

The documentation of Brownfield platforms requires structured workflows that integrate metric validation and parametric modeling. The digitalization of facility complexity generates, through Scan-to-BIM processes, a Digital Twin oriented towards operational management, decommissioning, and the preservation of technical memory.

Premessa

L'urbanizzazione nel mare costituisce oggi un tessuto invisibile del paesaggio energetico globale. Nello spazio marino, l'assenza di limiti visivi e di riferimenti proporzionali crea una frattura tra percezione e realtà dimensionale [Bikker 2024]. La misura si pone come dispositivo capace di strutturare la rappresentazione del reale [Parrinello 2024]. L'antropizzazione del continente ha trovato nel mare aperto un nuovo territorio di espressione, dove il petrolio è stato il motore di un processo di colonizzazione spaziale che ha trasformato luoghi incontaminati in ecosistemi tecnologici complessi. Tali infrastrutture emergono tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo in risposta alla necessità di trivellare in mare imponendo la costruzione di veri e propri monumenti di acciaio al servizio dell'estrazione petrolifera [Douet 2020]. La loro natura isolata e la funzione prevalentemente estrattiva hanno relegato queste infrastrutture a una dimensione puramente funzionale, escludendole dal dibattito sulla rappresentazione e sui processi di tutela del patrimonio industriale contemporaneo. Per rendere visibile questo spazio, vengono utilizzate le proprietà formali per chiarire le complesse relazioni spaziali che intercorrono tra il manufatto industriale e l'ambiente che lo ospita. Esiste un'analogia tra la manutenzione di una piattaforma *offshore* e la conservazione di un bene architettonico monumentale: la necessità di gestire sistemi a elevata complessità morfologica, tecnologica e strutturale. La trasposizione digitale dell'oggetto non può limitarsi alla sola rappresentazione geometrico-spaziale, ma necessita l'implementazione di modelli informativi capaci di documentare e gestire l'intero ciclo di vita dell'opera [Bertocci et al. 2025]. L'obiettivo della ricerca[1] consiste nella strutturazione di un protocollo che permetta la costruzione di un modello informativo *As-Built*. Il modello si configura come un *database* fondamentale per documentare il manufatto con la possibilità di simularne i futuri scenari di *decommissioning*. La costruzione di questi modelli supera la sola archiviazione tecnica per porsi come strumento a supporto di applicativi per la gestione delle emergenze, rendendo la piattaforma esplorabile attraverso sistemi di visualizzazione interattiva. La serialità delle componenti industriali viene ricodificata secondo logiche parametriche. La digitalizzazione della piattaforma Nene WHP4 assume il ruolo di mediatore tra ciò che permane e ciò che si trasforma, ampliando il concetto di bene culturale al dominio dell'archeologia industriale (Fig. 1). La modellazione informativa diventa lo strumento per governare le trasformazioni irreversibili del costruito, rendendo tangibile un paesaggio che definisce l'identità tecnologica del nostro tempo.

[1] Il progetto Brownfield Digital Twin – Progetto di ricerca sperimentale per la generazione di modelli informativi 3D reality-based su stabilimenti Eni esistenti rientra tra le azioni sperimentali previste nell'ambito dell'applicazione dell'Accordo Quadro ENI–UNIPV n. 4410000465, finalizzato alla produzione di modelli informativi parametrici 3D per la gestione interattiva e dinamica di sistemi complessi (Digital Twin di siti produttivi brownfield Eni offshore). Il progetto è frutto dell'Accordo di collaborazione tra Eni S.p.A. e il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAr) dell'Università degli Studi di Pavia (Italia). La responsabile scientifica del progetto Brownfield Digital Twin è la Prof.ssa Francesca Picchio (DICAr, Università di Pavia). Per Eni S.p.A., il progetto è stato coordinato dai Referenti: Dott. Marcello Poggi dell'unità Facility Information Management (FIM) e Ing. Davide Sabbatini dell'unità Facility Engineering Innovation (FIN). Il gruppo di ricerca è composto dal personale del Laboratorio di didattica e ricerca sperimentale DAda-LAB dell'Università degli Studi di Pavia – Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAr): Dott.ssa Anna Dell'Amico, Dott. Hangjun Fu e ha visto la collaborazione del Laboratorio di ricerca e didattica sperimentale DARWIN dell'Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Architettura (DIDA), con: Prof. Sandro Parrinello, come coordinatore dell'Unità e PhD. student Luca Chiavacci, Dott. Matteo Bigongiari.

Introduction

Today, urbanization in the sea constitutes an invisible fabric of the global energy landscape. In the marine space, the absence of visual limits and proportional references creates a fracture between perception and dimensional reality [Bikker 2024]. Measurement acts as a device capable of structuring the representation of reality [Parrinello 2024]. The anthropization of the continent has found a new territory of expression in the open sea, where oil has been the engine of a process of spatial colonization that has transformed pristine places into complex technological ecosystems. These infrastructures emerged between the late 19th and early 20th centuries in response to the need for offshore drilling, necessitating the construction of true steel monuments at the service of oil extraction [Douet 2020]. Their isolated nature and predominantly extractive function have relegated these infrastructures to a purely functional dimension, excluding them from the debate on representation and the preservation processes of contemporary industrial heritage. To make this space visible, formal properties are used to clarify the complex spatial relationships that exist between the industrial artifact and its host environment.

There is an analogy between the maintenance of an offshore platform and the conservation of a monumental architectural asset: the need to manage systems of high morphological, technological, and structural complexity. The digital transposition of the object cannot be limited to geometric-spatial representation alone but requires the implementation of information models capable of documenting and managing the entire life cycle of the work [Bertocci et al. 2025]. The objective of the research[1] consists of structuring a protocol that allows for the construction of an As-Built information model. The model serves as a fundamental database for documenting the artifact, with the possibility of simulating future decommissioning scenarios. The construction of these models goes beyond mere technical archiving to serve as a tool supporting emergency management applications, making the platform explorable through interactive visualization systems. The seriality of industrial components is re-encoded according to parametric logic. The digitalization of the Nene WHP4 platform assumes the role of a mediator between what remains and what is transformed, expanding the concept of cultural heritage to the domain of industrial archaeology (Fig. 1). Information modeling becomes the tool for governing the irreversible transformations of the built environment, making tangible a landscape that defines the technological identity of our time.

[1] The Brownfield Digital Twin project – An experimental research project for the generation of reality-based 3D information models of existing Eni facilities – is one of the experimental initiatives envisaged under the ENI–UNIPV Framework Agreement No. 4410000465, aimed at producing parametric 3D information models for the interactive and dynamic management of complex systems (Digital Twin of Eni's offshore brownfield production sites). The project is the result of a collaboration agreement between Eni S.p.A. and the Department of Civil Engineering and Architecture (DICAr) at the University of Pavia (Italy). The scientific lead for the Brownfield Digital Twin project is Prof. Francesca Picchio (DICAr, University of Pavia). For Eni S.p.A., the project was coordinated by the following representatives: Dr Marcello Poggi from the Facility Information Management (FIM) unit and Eng. Davide Sabbatini from the Facility Engineering Innovation (FIN) unit. The research group comprises staff from the DAda-LAB Experimental Teaching and Research Laboratory at the University of Pavia – Department of Civil Engineering and Architecture (DICAr): Dr Anna Dell'Amico and Dr Hangjun Fu, and involved collaboration with the DARWIN Laboratory for Research and Experimental Teaching at the University of Florence – Department of Architecture (DIDA), with: Prof. Sandro Parrinello, as Unit Coordinator, PhD student Luca Chiavacci, and Dr. Matteo Bigongiari.

Il rilievo della piattaforma: point-cloud quality check

Il rilievo rappresenta il primo contatto con il luogo, un'azione conoscitiva in cui la struttura dell'oggetto emerge attraverso la relazione tra il rilevatore e l'oggetto da studiare [Parrinello et al. 2022]. Dentro questa relazione si definiscono le metodologie per indagare il sistema dove la proiezione del rilevatore sugli elementi del sistema complesso ne suggerisce le scelte operative per descrivere l'elemento e raggiungere gli obiettivi. Come nel caso della Nene WHP4, dove il dato è stato acquisito in una fase precedente e consegnato come prodotto finito, le operazioni di interpretazione e ricostruzione logica risultano complesse (Fig. 2). La lettura del *database* richiede un percorso a ritroso di ricostruzione logica del rilievo, che ne analizzi le operazioni e i relativi errori che il processo di registrazione porta con sé. Il rilievo diventa lo strumento per valutare ogni scelta operativa. Emerge la necessità di distinguere tra accuratezza strumentale e accuratezza di processo, derivante dalle metodologie di acquisizione, dalle condizioni ambientali e dalle procedure di registrazione del dato. Se la prima definisce il potenziale teorico della misura, è la seconda a determinarne l'effettiva affidabilità metrica all'interno del sistema di riferimento globale.

L'evoluzione delle metodologie *reality-based* favorisce un approccio integrato, in cui dati eterogenei e multi-scalari convergono in un unico sistema di riferimento spaziale. L'acquisizione del dato metrico supera così la sola dimensione di archiviazione visiva, diventando uno strumento per interpretare le dinamiche relazionali, strutturali e spaziali del manufatto [Dell'Amico 2021].

Nel caso specifico della piattaforma Nene WHP4, l'analisi è stata avviata su un *database* tridimensionale, composto da 468 scansioni, consegnato già registrato ma privo di metadati sulle modalità di svolgimento della campagna e dei report di allineamento. L'assenza di conoscenza sul dato rischia di compromettere la validità dell'intero processo, e rende indispensabile operare una ricostruzione logica inversa del rilievo, per acquisire cognizione dell'errore morfometrico, parametro fondamentale per definire le successive tolleranze di modellazione [Apollonio et al. 2017]. La prima fase, l'analisi qualitativa della nuvola di punti, indaga come fattori intrinseci al dato possano influenzare il riconoscimento geometrico durante i processi di modellazione automatizzata. Gli impianti *brownfield* sono strutture ad elevata densità impiantistica e strutturale: le vibrazioni indotte dall'ambiente marino, dai macchinari in funzione e dai piani di calpestio grigliati possono introdurre incertezze nella qualità del modello morfometrico. Se non adeguatamente analizzate, tali criticità - così come i coni d'ombra - verrebbero interpretate dagli algoritmi come geometrie incoerenti rispetto alla forma e alla funzione del componente nel sistema. La riflettanza dei materiali e le alterazioni delle superfici in ambiente marino influenzano direttamente la qualità del dato morfometrico; allo stesso modo, le occlusioni visive causate da attrezzature di cantiere e personale operativo generano un *database* che richiede un'attenta fase di interpretazione e *pre-processing*.

The platform survey: point-cloud quality check

The survey represents the first contact with the site, a cognitive action in which the structure of the object emerges through the relationship between the surveyor and the object under study [Parrinello et al. 2022]. Within this relationship, the methodologies for investigating the system are defined, where the surveyor's projection onto the elements of the complex system suggests the operational choices to describe the element and achieve the objectives.

As in the case of the Nene WHP4, where the data was acquired in a previous phase and delivered as a finished product, the operations of interpretation and logical re-



Fig. 1: La piattaforma nelle acque territoriali della Repubblica del Congo.
Fig. 1: The platform in the territorial waters of the Republic of the Congo.



Fig. 2: La nuvola di punti della piattaforma con valori RGB.
Fig. 2: The point cloud of the platform with RGB values.

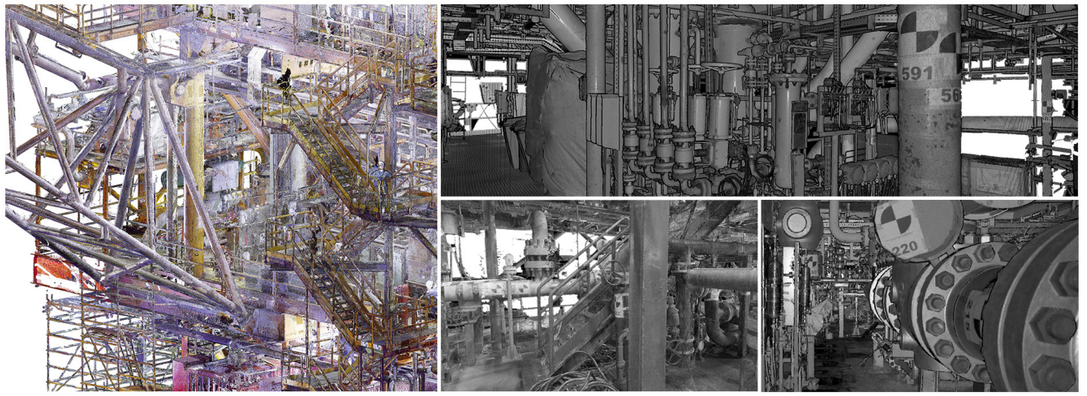


Fig. 3: Vedute della complessità impiantistica dalla nuvola di punti.
Fig. 3: Views of the facility complexity from the point cloud.



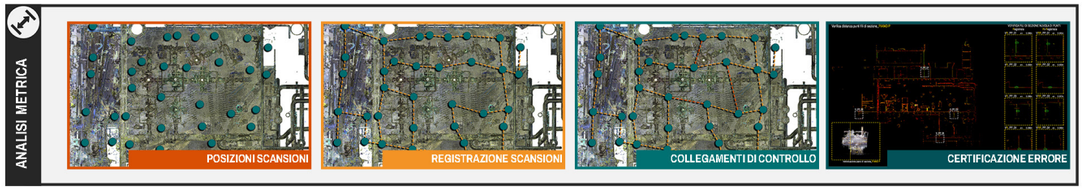


Fig. 4: Schema delle operazioni svolte durante il collaudo della nuvola di punti.
Fig. 4: Diagram of operations performed during the point cloud quality check.

La ricerca è stata strutturata lungo due direttrici collegate: la verifica metrica del *dataset* originario, e la ri-registrazione del dato. La prima indagine è stata condotta mediante verifiche puntuali, misurando le distanze fra i punti lungo specifici fili di sezione ed evidenziando scostamenti non sempre compatibili con le tolleranze richieste [Pancani 2016] (Fig. 3).

Il processo di ricostruzione logica a ritroso ha imposto l'individuazione delle originarie posizioni di scansione e la definizione di un percorso di acquisizione logico, strutturando i collegamenti per contenere l'errore di registrazione. La ripetizione delle verifiche, in questo caso, certifica oggettivamente l'affidabilità metrica del *database*. L'esito di tali operazioni induce a una riflessione: nella modellazione di un sistema impiantistico complesso, dove la precisione geometrica delle reti di tubazioni è misurabile nell'ordine dei millimetri, l'esattezza del dato di partenza assume un ruolo fondamentale. Emerge dunque l'esigenza di definire buone pratiche di acquisizione per il rilievo di complessi privi di riferimenti stabili [Parrinello et al. 2016] (Fig. 4). La trasparenza e la tracciabilità delle procedure di acquisizione si rivelano condizioni per garantire il controllo sulle construction prove complex (Fig. 2). Reading the database requires a reverse path of logical reconstruction of the survey, analyzing its operations and the related errors that the registration process entails. The survey becomes the tool for evaluating every operational choice.

There emerges a need to distinguish between instrumental accuracy and process accuracy, the latter deriving from acquisition methodologies, environmental conditions, and data registration procedures. While the former defines the theoretical potential of the measurement, it is the latter that determines its actual metric reliability within the global reference system.

The evolution of reality-based methodologies favors an integrated approach, in which heterogeneous and multi-scalar

tolleranze che il modello BIM finale incorpora al suo interno. Con l'applicazione di questo protocollo di validazione, il dato smette di essere un insieme di coordinate spaziali per evolversi in un database certificato: una base di conoscenza e un sistema a supporto delle discipline della rappresentazione [Lo Turco et al. 2017].

Un modello di sintesi per la rappresentazione delle piattaforme

Nel XXI secolo, il cantiere fisico è il riflesso di ciò che è stato pensato, risolto e costruito all'interno dello spazio digitale [Garagnani 2010]. Con il patrimonio industriale, ci troviamo molto spesso costretti a invertire questo processo: non si costruisce dal modello, ma si ri-costruisce il modello. Operando a ritroso la modellazione digitale in ambiente BIM diventa uno strumento capace di documentare e governare la complessità di sistemi altrimenti inaccessibili [Di Filippo et al. 2024]. Documentare infrastrutture *offshore* impone il confronto con strutture isolate in mare aperto, dove la gestione della manutenzione o la risoluzione di un'interferenza strutturale non può essere affidata a valutazioni in sito: su uno schermo richiede un semplice *clic*, mentre gestirla a chilometri dalla costa comporta costi logistici insostenibili. La sintesi dei dati e la conseguente interpretazione grafica hanno permesso di operare una riscrittura digitale della piattaforma Nene WHP4, dove il modello non si limita a documentare l'aspetto geometrico, ma costruisce un *database* informativo interrogabile. Fin dalla fase di impostazione si è resa necessaria una chiara definizione degli scopi del modello: il fine ultimo del processo, non è la sola rappresentazione [Chiavacci et al. 2025]. L'intento è generare uno strumento capace di supportare le strategie di *decommissioning*, simulare scenari di emergenza, organizzare l'apparato tecnico-documentale e rendere il dato accessibile attraverso piattaforme di consultazione intuitive. Il processo di digitalizzazione ha richiesto la definizione di un processo strutturato, finalizzato alla gestione della densità di tubazioni, valvole e componenti tecnologici. Il flusso di lavoro si è articolato attraverso un passaggio obbligato nei *software* di gestione di nuvole di punti (*Leica Cyclone e Autodesk ReCap*). In questa fase di *pre-processing*, il dato è stato sottoposto a operazioni di decimazione, pulizia e classificazione, utili per ottimizzare il carico computazionale e permettere l'importazione all'interno del *software* di *BIM-authoring* (*Autodesk Revit*) [Bianconi et al. 2021].

La modellazione è stata articolata lungo due percorsi interconnessi: la definizione del modello geometrico e la strutturazione dell'apparato informativo. Al fine di verificare la fattibilità e la scalabilità del protocollo, la sperimentazione si è concentrata su una circoscritta area di test. Soltanto in seguito alla validazione della metodologia, il *workflow* è stato esteso ad un'area più vasta (Fig. 5). Questo approccio permette di valutare oggettivamente la scalabilità del processo, dimostrando come la standardizzazione delle procedure consenta di ottimizzare le tempistiche di modellazione. Il livello di dettaglio geometrico e informativo, definito dagli scopi della ricerca, definisce un LOIN (*Level of Information Need*) in grado di documentare la piattaforma secondo un modello *As-Built* [Parrinello et al. 2023]. Ai fini di organizzare il sistema, l'infrastruttura è stata scomposta nelle macro-discipline: strutturale, impiantistica e architettonica, coordinate successivamente all'interno di un modello federato [Picchio et al. 2024]. La strutturazione di un linguaggio di nomenclatura e codifica permette di catalogare ogni componente con stringhe alfanumeriche, che lo rendono rintracciabile nel database [Parrinello et al. 2024]. Nel processo di trasposizione digitale in ambiente BIM, la definizione dei livelli di riferimento e delle griglie di sistema rappresenta la struttura logica su cui si ancora ogni componente modellato. La fase operativa è stata ottimizzata attraverso l'integrazione di strumenti di riconoscimento semi-automatico, come il *plug-in Faro As-Built*, che ha permesso di estrarre tubazioni e raccordi partendo dall'interpretazione della nuvola di punti. La costante sovrapposizione visiva e metrica tra il dato rilevato e il solido geometrico consente una verifica in tempo reale dell'aderenza del modello allo stato di fatto (Fig. 6).

La logica costruttiva del modello si è basata sulla generazione di famiglie parametriche: oggetti dinamici governati da vincoli dimensionali e informativi che hanno costruito una libreria parametrica, pronta per essere applicata ad altre infrastrutture offshore. La parametrizzazione ha interessato sia le componenti impiantistiche sia gli elementi strutturali e architettonici; data la natura seriale del complesso - caratterizzato dalla ripetizione di profili in acciaio, grigliati e sistemi di protezione - il processo è stato esteso anche agli elementi strutturali e architettonici. In questo caso, l'interpretazione del dato metrico è stata supportata e verificata attraverso lo studio delle schede tecniche (come per i profili IPE): l'integrazione tra dimensioni *standard* e la nuvola di punti ha permesso un controllo incrociato, riducendo i margini di errore nell'interpretazione della geometria [Bianchini et al. 2016] (Fig. 7).

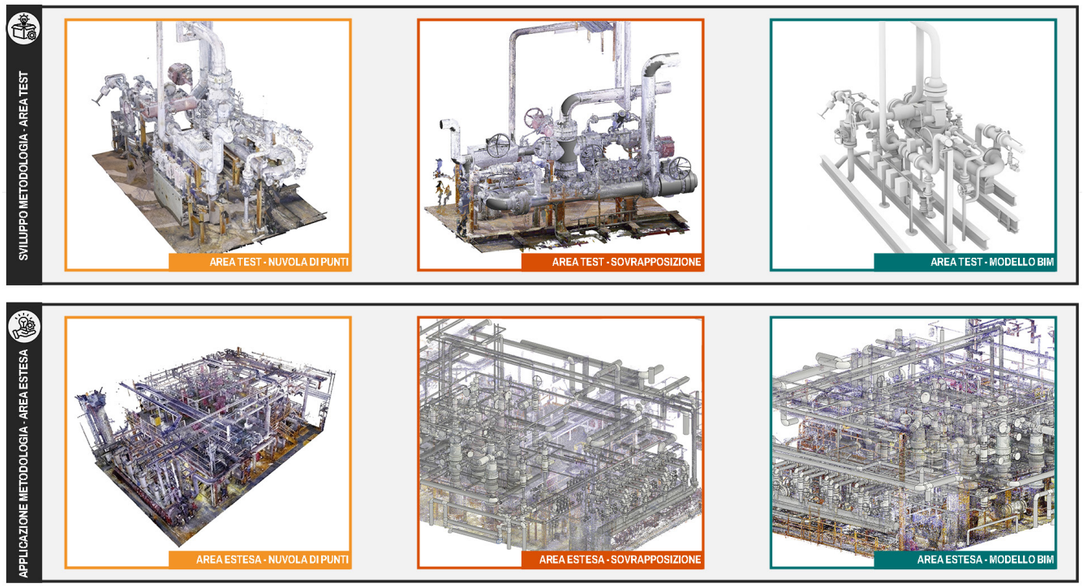


Fig. 5: La logica della sperimentazione: dallo sviluppo della metodologia all'applicazione su un'area estesa.

Fig. 5: The logic of experimentation: from methodological development to wide-area application.

data converge into a single spatial reference system. The acquisition of metric data thus goes beyond mere visual archiving, becoming a tool for interpreting the relational, structural, and spatial dynamics of the artifact [Dell'Amico 2021].

In the specific case of the Nene WHP4 platform, the analysis was initiated on a three-dimensional database consisting of 468 scans, delivered already registered but lacking metadata regarding the survey campaign methods and alignment reports. This lack of knowledge about the data risks compromising the validity of the entire process, making it essential to perform a logical reverse reconstruction of the survey to gain an understanding of the morphometric error - a fundamental parameter for defining subsequent modeling tolerances [Apollonio et al. 2017].

The first phase, the qualitative analysis of the point cloud, investigates how factors intrinsic to the data can influence geometric recognition during automated modeling processes. Brownfield facilities are structures with high plant and structural density: vibrations induced by the marine environment, operating machinery, and grated floorings can introduce uncertainties into the quality of the morphometric model. If not properly analyzed, such criticalities - as well as shadow zones - would be interpreted by algorithms as geometries inconsistent with the component's form and function within the system.

The reflectance of materials and surface alterations in a marine environment directly influence the quality of the morphometric data; similarly, visual occlusions caused by construction equipment and operational personnel generate a database that requires a careful phase of interpretation and pre-processing.

The research was structured along two connected lines: the metric verification of the original dataset and the re-registration of the data. The first investigation was conducted through point-by-point checks, measuring distances between points along specific section lines and highlighting discrepancies that were not always compatible with the required tolerances [Pancani 2016] (Fig. 3).

The reverse logical reconstruction process necessitated identifying the original scan positions and defining a logical acquisition path, structuring the connections to contain registration errors. In this case, repeating the verifications objectively certifies the metric reliability of the database. The outcome of these operations prompts a reflection: in the modeling of a complex plant system, where the geometric precision of piping networks is measured in millimeters, the accuracy of the source data plays a fundamental role. Consequently, the need emerges to define best acquisition practices for surveying complexes that lack stable references [Parrinello et al. 2016] (Fig. 4).

Transparency and traceability of acquisition procedures prove to be essential conditions for ensuring control over the tolerances that the final BIM model incorporates. From this logical premise comes the proposal of a quantifiable indicator, defined as the Survey Knowledge Index (SKI) [in Italian - Indice di Conoscenza del Rilievo - ICR]: a parameter capable of evaluating survey quality through specific coefficients, objectively defining the modeling tolerance. With the application of this validation protocol, the data ceases to be a mere set of spatial coordinates and evolves into a certified database: a knowledge base and a support system for the disciplines of representation [Lo Turco et al. 2017].

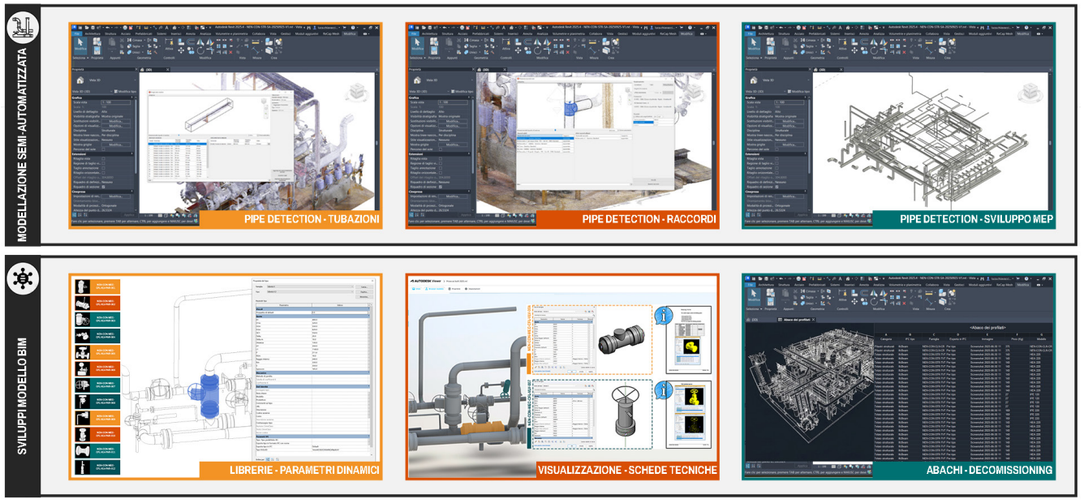


Fig. 6: Processo di modellazione semi-automatica e sviluppi del modello BIM.

Fig. 6: Semi-automatic modeling process and BIM model developments.

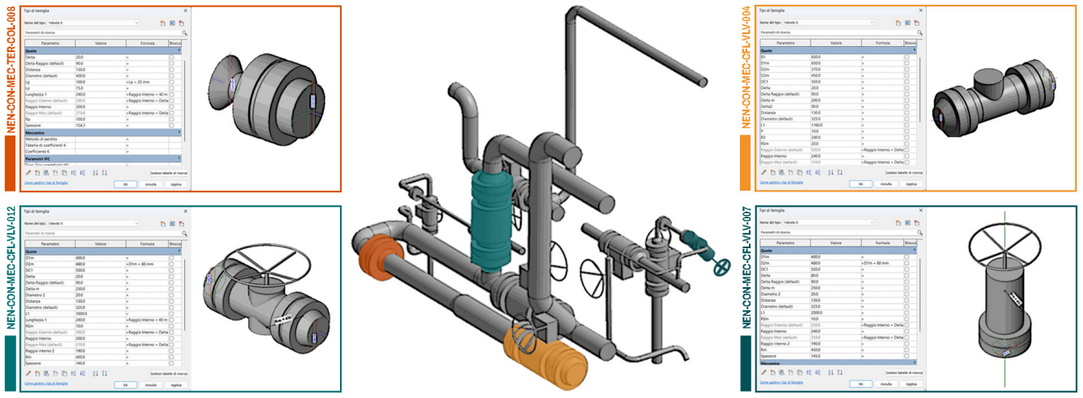


Fig. 7: Parametrizzazione delle componenti impiantistiche per lo sviluppo della libreria parametrica.

Fig. 7: Parameterization of plant components for the development of the parametric library.

Conclusioni e considerazioni

La ricerca condotta sulla piattaforma Nene WHP4 dimostra come le metodologie *reality-based* sono strumenti efficaci per essere applicati ad una piattaforma *offshore*. Il modello digitale diviene dispositivo di interpretazione e mediazione tra ciò che permane e ciò che è destinato a trasformarsi, applicato al concetto stesso di bene culturale [Empler 2019]. La modellazione parametrica definisce la sua funzione nella generazione di un modello orientato all'interoperabilità, alla creazione automatizzata di abachi e all'integrazione con i sistemi gestionali aziendali [Sanseverino et al. 2026]. L'utilizzo di procedure semi-automatiche per il riconoscimento geometrico delle reti impiantistiche consente una riduzione delle tempistiche; il processo evidenzia però un'esigenza di verifica manuale, specialmente in corrispondenza dei nodi morfologici complessi (Fig. 8).Il BIM si conferma un sistema adeguato a ospitare la complessa struttura informativa a condizione che sia supportato dall'implementazione di regole, librerie standardizzate e protocolli di coordinamento. I parametri descrivono i caratteri geometrici e, al contempo, diventano strumenti per documentare le configurazioni di impianto e gli stati di trasformazione, dall'esercizio operativo fino allo smantellamento. Il modello restituisce la complessità del reale in un sistema visivo navigabile, supera la funzione rappresentativa: si configura come un archivio dinamico di dati tecnici, spaziali e temporali. L'approccio supporta i processi decisionali legati alla sicurezza e alle pratiche di *decommissioning*, contribuendo alla conservazione della memoria tecnica di queste infrastrutture, il patrimonio dell'identità tecnologica di un'intera era.

A synthetic model for the representation of platforms

In the 21st century, the physical construction site is the reflection of what has been conceived, resolved, and built within the digital space [Garagnani 2010]. With industrial heritage, we are often forced to invert this process: we do not build from the model, but rather re-construct the model from the built reality. By operating in reverse, digital modeling in a BIM environment becomes a tool capable of documenting and governing the complexity of otherwise inaccessible systems [Di Filippo et al. 2024].

Documenting offshore infrastructure requires confronting structures isolated in the open sea, where maintenance management or the resolution of structural interference cannot be left to on-site assessments: on a screen, it requires a simple click, whereas managing it miles from the coast entails unsustainable logistical costs. The synthesis of data and the subsequent graphical interpretation allowed for a digital rewriting of the Nene WHP4 platform, where the model is not limited to documenting geometric aspects but builds a searchable information database.

From the initial setup phase, a clear definition of the model's purposes became necessary: the ultimate goal of the process is not representation alone [Chiavacci et al. 2025]. The intent is to generate a tool capable of supporting decommissioning strategies, simulating emergency scenarios, organizing the technical-documentary apparatus, and making the data accessible through intuitive consultation platforms.

The digitalization process required the definition of a structured workflow aimed at managing the density of piping, valves, and technological components. The workflow was articulated through an essential passage in point cloud management software (Leica Cyclone and Autodesk ReCap). In this pre-processing phase, the data underwent decimation, cleaning, and classification operations, useful for optimizing the computational load and allowing for importation into the BIM-authoring software (Autodesk Revit) [Bianconi et al. 2021].

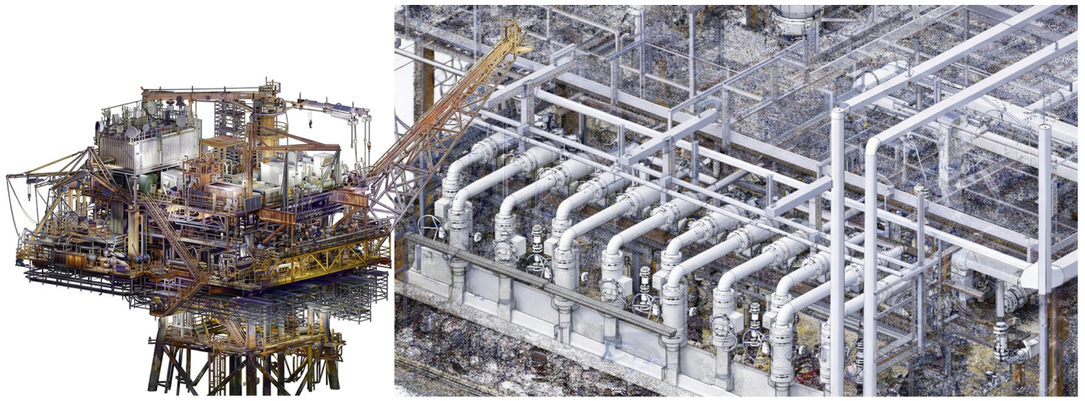


Fig. 8: Schema concettuale del processo scan-to-parametric model.

Fig. 8: Conceptual schema of the Scan-to-Parametric model process.

Bibliografia

Apollonio, F. I., Fallavollita, F., Giovannini, E. C., Foschi, R., & Corso, S. (2017). The reconstruction of drawn architecture. In *Studies in Digital Heritage*, vol. 1, n. 2, pp. 380-395. Bloomington: Indiana University.

Bertocci, S., Ricciarini, M., & Galasso, F. (2025). Gestione dei modelli Open H-BIM per l'interoperabilità dei dati. In T. Empler, A. Caldarone, J. Nunez, S. Tuzi (a cura di). *3D Modeling & BIM. Para la transformación digital*. Atti del Workshop, Buenos Aires, 8 maggio 2024, pp. 69-80. Milano: DEI – Tipografia del Genio Civile.

Bianchini, C., Inglese, C., & Ippolito, A. (2016). The role of BIM (Building Information Modeling) for representation and managing of built and historic artifacts. In *DISEGNARECON*, vol. 9, n. 16, pp. 10.1-10.9. L'Aquila: Università degli Studi dell'Aquila.

Bianconi, F., Filippucci, M., & Meschini, M. (2021). Survey, recovery and regeneration of post-modern architecture. The BIM approach in the case study of the Sports Hall in Bastia Umbra (Italy). In *The*

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLVI-M-1-2021, pp. 63-70. Göttingen: Copernicus Publications.

Bikker, L., Fishman, T., & Wang, G. (2024). *A worldwide mapping of the technical potential for floating urban development offshore* [preprint, versione 1]. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5280982/v1

Chiavacci, L., Dellabartola, G., & Pettineo, A. (2025). Scan-to-BIM per l'analisi del patrimonio architettonico-paesaggistico dell'isola di Santo Spirito a Venezia / Scan-to-BIM for Architectural and Landscape Heritage Analysis of Venice's Santo Spirito Island. In L. Carlevaris, D. Calisi, L. Baglioni, C. Bianchini, M. Canciani, M. G. Cianci, L. Farroni, C. Inglese, M. F. Mancini, A. Meschini, J. Romor, M. Salvatore, G. Spadafora, G. M. Valenti (a cura di). *ÈKPHRASIS. Descrizioni nello spazio della rappresentazione / Descriptions in the space of representation*. Atti del 46° Convegno internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione, Congresso della Unione Italiana per il Disegno, Roma, 11-13 settembre 2025, pp. 577-600. Milano: FrancoAngeli.

Dell'Amico, A. (2021). Mobile laser scanner mapping system's for the efficiency of the survey and representation processes. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVI-M-1-2021, pp. 199-205. Göttingen: Copernicus Publications.

Di Filippo, A., Limongiello, M., & Barba, S. (2024). Palantir-BIM: una piattaforma orientata al BIM per la documentazione del patrimonio architettonico. In T. Empler, A. Caldarone, A. Fusinetti (a cura di). *3D Modeling & BIM. Nuove evoluzioni*. Atti del Workshop, Roma, 11-12 aprile 2024, vol. IX, pp. 26-37. Roma: DEI – Tipografia del Genio Civile.

Douet, J. (2020). *The heritage of the oil industry. TICCIH thematic study*. [S.l.]: TICCIH – The International Committee for the Conservation of the Industrial Heritage.

Empler, T. (2019). Mixed virtuality in the communication of cultural heritage. In A. Luigini (a cura di). *Proceedings of the 1st International and Interdisciplinary Conference on Digital Environments for Education, Arts and Heritage. EARTH 2018*. Bressanone, 5-6 luglio 2018, collana Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 919, pp. 575-586. Cham: Springer International Publishing.

Garagnani, S. (2010). *Modelli digitali e archivi di progetto. Sistemi integrati di documentazione per l'architettura* [tesi di dottorato in Ingegneria edilizia e territoriale, XXII ciclo]. Bologna: Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. https://doi.org/10.6092/unibo/amsdottorato/2755

Lo Turco, M., Mattone, M., & Rinaudo, F. (2017). Metric survey and BIM technologies to record decay conditions. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-5/W1, pp. 261-268. Göttingen: Copernicus Publications.

Modeling was articulated along two interconnected paths: the definition of the geometric model and the structuring of the information apparatus. To verify the feasibility and scalability of the protocol, the experimentation focused on a limited test area. Only after the validation of the methodology was the workflow extended to a wider area. This approach allows for an objective evaluation of process scalability, demonstrating how the standardization of procedures enables the optimization of modeling timelines (Fig. 5).

The level of geometric and informative detail, defined by the research goals, establishes a LOIN (Level of Information Need) capable of documenting the platform according to an As-Built model [Parrinello et al. 2023]. To organize the system, the infrastructure was broken down into macro-disciplines: structural, mechanical/piping (plant), and architectural, subsequently coordinated within a federated model [Picchio et al. 2024]. The structuring of a nomenclature and coding language allows for the cataloging of each component with alphanumeric strings, making it traceable within the database [Parrinello et al. 2020].

In the digital transposition process within a BIM environment, the definition of reference levels and system grids represents the logical structure to which every modeled component is anchored. The operational phase was optimized through the integration of semi-automatic recognition tools, such as the Faro As-Built plug-in, which allowed for the extraction of piping and fittings based on the interpretation of the point cloud. The constant visual and metric overlap between the surveyed data and the geometric solid enables real-time verification of the model's adherence to the as-is state (Fig. 6).

The construction logic of the model was based on the generation of parametric families: dynamic objects governed by dimensional and informative constraints that formed a parametric library, ready to be applied to other offshore infrastructures.

This parameterization involved both plant components and structural and architectural elements. Given the serial nature of the complex - characterized by the repetition of steel profiles, gratings, and protection systems - the process was also extended to the structural and architectural elements. In this case, the interpretation of metric data was supported and verified through the study of technical data sheets (such as for IPE profiles). The integration between standard dimensions and the point cloud allowed for cross-checking, reducing error margins in geometric interpretation [Bianchini et al. 2016] (Fig. 7).

Conclusions and final considerations

The research conducted on the Nene WHP4 platform demonstrates that reality-based methodologies are effective tools for offshore applications. The digital model becomes a device for interpretation and mediation between what remains and what is destined to be transformed, applied to the very concept of cultural heritage [Empler 2019].

Parametric modeling defines its role in generating a model oriented toward interoperability, the automated creation of schedules, and integration with corporate management systems [Sanseverino et al. 2026]. While the use of semi-automatic procedures for the geometric recognition of plant networks allows for a reduction in timelines, the process highlights a need for manual verification, especially at complex morphological nodes (Fig. 8).

BIM proves to be an adequate system for hosting complex information structures, provided it is supported by the implementation of rules, standardized libraries, and coordination protocols. Parameters describe geometric characteristics while simultaneously becoming tools to document plant configurations and states of transformation, from operational exercise to decommissioning.

The model reflects the complexity of reality in a navigable visual system, moving beyond a representative function: it is configured as a dynamic archive of technical, spatial, and temporal data. This approach supports decision-making processes related to safety and decommissioning practices, contributing to the preservation of the technical memory of these infrastructures - the heritage of the technological identity of an entire era.

Pancani, G. (2016). Il Castello dei Conti Guidi a Poppi, la certificazione nel rilievo laser scanner quale base morfologica di indagini diagnostiche per la conservazione e la valorizzazione del monumento. In S. Bertocci, M. Bini (a cura di). *Le ragioni del disegno. Pensiero, forma e modello nella gestione della complessità*. Atti del 38° Convegno internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione, XIII Congresso UID, Firenze, 15-17 settembre 2016, pp. 1217-1224. Roma: Gangemi Editore.

Parrinello, S. (2024). Forma e linguaggio. La comunicazione nell'interazione grafica. In *TRIBELON. Journal of Drawing and Representation of Architecture, Landscape and Environment*, vol. 1, n. 2, pp. 4-11. Firenze: Firenze University Press.

Parrinello, S., & Dell'Amico, A. (2021). From survey to parametric models: HBIM systems for enrichment of cultural heritage management. In C. Bolognesi, D. Villa (a cura di). *From Building Information Modelling to Mixed Reality*, pp. 89-107. Cham: Springer International Publishing.

Parrinello, S., Picchio, F., & Bercigli, M. (2016). La 'migrazione' della realtà in scenari virtuali: banche dati e sistemi di documentazione per la musealizzazione di ambienti complessi. In *DISEGNARECON*, vol. 9, n. 17, pp. 14.1-14.8. L'Aquila: Università degli Studi dell'Aquila.

Parrinello, S., & Porcheddu, G. (2022). Sistemi informativi dinamici a supporto della documentazione archeologica per interventi in emergenza. In *Restauro Archeologico*, vol. 30, n. 2, pp. 48-65. Firenze: Firenze University Press.

Parrinello, S., Sanseverino, A., & Fu, H. (2023). HBIM modelling for the architectural valorisation via a maintenance digital eco-system. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-M-2-2023, pp. 1157-1164. Göttingen: Copernicus Publications.

Picchio, F., La Placa, S., Fu, H., & Doria, E. (2024). Towards virtual cultural heritage routes. Development of digital models for extended accessibility of the H2020 Prometheus project. In A. Giordano, M. Russo, R. Spallone (a cura di). *Advances in Representation. New AI- and XR-Driven Transdisciplinarity*, pp. 301-318. Cham: Springer Nature Switzerland.

Sanseverino, A., & La Placa, S. (2026). Open-oriented algorithmic approach for BIM modelling of complex historic water infrastructure. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-2/W12-2026, pp. 431-438. Göttingen: Copernicus Publications.

Autori

Giorgio Buratti[1]
Attilio Nebuloni[1]
Andrea Rossi[2]

[1] Politecnico di Milano, Dipartimento di Design, Milano
[2] Università für Angewandte Kunst Wien, Vienna, Austria

Email

giorgio.buratti@polimi.it
attilio.nebuloni@polimi.it
andrea.rossi@uni-ak.ac.at

Keywords

COMPUTATIONAL REUSE
COMPUTATIONAL DESIGN
DIGITAL FABRICATION
COMPUTER VISION
INDUSTRIAL WASTE

La forma come risorsa. Computational Reuse: processi digitali per il riutilizzo

Form as a Resource. Computational Reuse: Digital Processes for Reuse

Abstract

Il contributo introduce il Computational Reuse, approccio dedicato non solo alla riduzione dei rifiuti, ma qui inteso come principio strutturale per ridimensionare l'impatto ambientale. Ispirato alla continuità dei cicli materiali delle economie preindustriali, il Computational Reuse reimpiega scarti industriali preservandone la geometria, riducendo i costi e favorendone la scalabilità. La sperimentazione mostra come i principi del Computational Design integrino stabilmente il riuso nell'economia contemporanea.

This paper introduces Computational Reuse, an approach concerned not only with waste reduction but conceived here as a structural principle for mitigating environmental impact. Inspired by the continuity of material cycles in pre-industrial economies, Computational Reuse repurposes industrial waste while preserving its original geometry, thereby reducing costs and facilitating scalability. The experimental work demonstrates how the principles of Computational Design can systematically integrate reuse into the contemporary economy.

Introduzione

Il riuso è tornato al centro del dibattito progettuale non tanto in risposta alla scarsità di materiali, ma come criterio operativo capace di modificare la logica stessa della produzione. Nelle economie preindustriali, l'impiego ripetuto di oggetti e frammenti non era un gesto eccezionale: capitelli trasformati in acquasantiere, anfore ridotte a riempimento murario e componenti edilizi reinseriti in nuovi manufatti indicano una continuità materiale basata sul valore d'uso, sulla prossimità delle risorse e sulla necessità di non disperdere mezzi già disponibili [Sainsbury & Liu, 2022]. Il riuso non costituiva un'eccezione, bensì una prassi ordinaria inscritta nella logica materiale della produzione. Nel mondo agricolo-pastorale e nell'ambito della produzione artigianale risultava imprescindibile un rapporto costante con l'ambiente, regolato da uno sfruttamento attento e misurato delle risorse disponibili. Il sistema economico-produttivo era prevalentemente basato su produzioni di piccola scala e su circuiti economici locali, nei quali la limitatezza delle disponibilità induceva criteri di misura e ponderatezza. Tale atteggiamento non derivava tanto da una cultura ecologica consapevole, quanto piuttosto da vincoli materiali e da una struttura economica che non contemplava né l'accumulazione né il consumo di massa.

L'affermarsi di un'economia fondata sulla produzione seriale, sull'espansione dei mercati e sulla promozione del consumo quale motore dello sviluppo ha progressivamente consolidato la cultura dell'"usa e getta" e dell'obsolescenza programmata. Questa trasformazione, pur generando un benessere diffuso, ha contribuito in modo significativo alla crisi ambientale contemporanea. La serialità e l'espansione dei mercati hanno reso più conveniente sostituire che riparare o riutilizzare, consolidando un modello in cui lo scarto è considerato un problema gestionale.

L'ipotesi qui proposta muove da una distinzione essenziale che distingue il riutilizzo dal riciclo: il riciclo opera prevalentemente sulla materia, mentre il riuso opera sulla forma. Nel riciclo, l'oggetto viene separato, macinato, fuso o trasformato fino a perdere identità geometrica e tipologica; nel riuso, invece, la configurazione originaria, le tolleranze, le tracce d'impiego e le caratteristiche prestazionali restano informazioni attive del progetto [Kirchherr et al., 2017; Sun et al., 2026]. In questa prospettiva la forma non è un vincolo residuale, ma un dato da interpretare. Il Computational Reuse è quindi definito come un processo progettuale e produttivo che usa metodi computazionali per acquisire, descrivere, classificare e riassemblare componenti esistenti, riducendo gli interventi distruttivi e trasformando la disponibilità reale degli scarti in un inventario generativo (Fig. 1).

Quadro operativo e metodo

La ricognizione condotta su casi recenti conferma una convergenza tra *circular design*, *Computational Design* e fabbricazione digitale [Brütting et al., 2020; Brütting et al., 2021; Dévènes et al., 2022; Grangeot et al., 2025; Kycia et al., 2022]. Questi esempi dimostrano come varie tipologie materiche possano, attraverso strumenti e metodi propri del *Computational Design*, assumere nuove configurazioni, prolungandone il ciclo di vita. La necessità di tale approccio è rafforzata dai dati ambientali. A titolo informativo, i dati Eurostat relativi al 2024 indicano che in Italia i rifiuti domestici rappresentano circa il 15% del totale (29 milioni di tonnellate), mentre quelli generati dalla produzione incidono per il 43% (82,4 milioni di tonnellate) e gli inerti, in larga parte edilizi, per il 42% (78,1 milioni di tonnellate). Se le macerie presentano elevata eterogeneità, per molti residui industriali, invece, l'origine controllata, la ripetibilità dimensionale e la qualità prestazionale suggeriscono una traiettoria alternativa: non ridurli a materia prima seconda, ma conservarne la geometria come capitale informativo e costruttivo.

La digitalizzazione assume quindi un ruolo strategico: senza un inventario accurato, il riuso resta affidato alla competenza tacita dell'operatore; con un inventario dinamico, invece, ogni elemento può essere interrogato per forma, dimensione, spessore, area di contatto, orientamento e posizione potenziale nell'assemblaggio. Per ridurre costi e tempi, la sperimentazione privilegia una digitalizzazione bidimensionale. Gli inserti da tornitura presentano infatti geometrie piane standard - triangolari, romboidali, quadrate o trapezoidali - che rendono sufficiente l'analisi del contorno per molte applicazioni di prodotto. Il toolkit è sviluppato in Grasshopper mediante componenti Python 3 e librerie OpenCV. L'immagine è stata acquisita con la camera di uno smartphone, confrontando gli oggetti con un marker ArUco di dimensione nota. La documentazione OpenCV conferma che la stima metrica richiede parametri di calibrazione e coefficienti di distorsione della camera; per questo il processo prevede una calibrazione iniziale e la rettifica prospettica dell'immagine [OpenCV, 2026] (Fig. 2). L'integrazione in Grasshopper consente di mantenere continuità tra analisi, modellazione parametrica e produzione, sfruttando il componente Python 3 come ambiente di scripting interno [McNeel, 2024].

L'immagine è convertita in array NumPy, corretta con strumenti di contrasto, livelli e soglia, quindi analizzata tramite rilevamento dei contorni. I profili vengono trasformati in polilinee Rhino-Common e semplificati entro una tolleranza definita dall'utente, eliminando artefatti e vertici ridondanti. Poiché lo stesso componente può apparire con orientamenti e campionamenti diversi, il confronto diretto delle polilinee non è sufficiente. Si adotta quindi

Introduction

Reuse has returned to the centre of the design debate not so much as a response to material lack, but as an operational criterion capable of transforming the very logic of production. In pre-industrial economies, the repeated use of objects and fragments was not an exceptional act: capitals transformed into holy-water fonts, amphorae reused as wall infill, and architectural components incorporated into new artefacts reveal a material continuity grounded in use value, resource proximity, and the need to avoid wasting what was already available [Sainsbury & Liu, 2022]. Reuse was therefore not an exception, but an ordinary practice embedded within the material logic of production. In agricultural, pastoral, and craft-based contexts, a constant relationship with the environment was essential, regulated by careful and measured use of available resources. The economic and productive system was predominantly based on small-scale production and local economic circuits, in which limited availability encouraged criteria of moderation and restraint. This attitude did not derive so much from a conscious ecological culture, but rather from material constraints and from an economic structure that did not contemplate either accumulation or mass consumption.

The rise of an economy based on serial production, market expansion, and the promotion of consumption as a driver of development progressively consolidated a culture of "use and disposal" and planned obsolescence. Although this transformation generated widespread prosperity, it also contributed significantly to the contemporary environmental crisis. Serial production and the expansion of markets made replacement more convenient than repair or reuse, consolidating a model in which waste is understood primarily as a management problem.

The hypothesis proposed here is based on an essential distinction between reuse and recycling: recycling operates primarily on matter, whereas reuse operates on form. In recycling, the object is separated, shredded, melted, or transformed until it loses its geometric and typological identity; in reuse, by contrast, its original configuration, tolerances, traces of use, and performance characteristics remain active design information [Kirchherr et al., 2017; Sun et al., 2026]. From this perspective, form is not a residual constraint, but a datum to be interpreted. Computational Reuse is therefore defined as a design and production process that employs computational methods to acquire, describe, classify, and reassemble existing components, reducing destructive interventions and transforming the real availability of waste elements into a generative inventory (Fig. 1).



Fig. 1: Confronto tra riciclo e riuso a partire dal medesimo scarto. Nel riciclo, lo pneumatico viene destrutturato, trasformato in materia indifferenziata e reinserito in un nuovo ciclo produttivo; nel riuso, invece, conserva forma, integrità e prestazioni residue, diventando componente di un nuovo sistema funzionale. (immagini degli autori.)

Fig. 1: Comparison between recycling and reuse starting from the same waste object. In recycling, the tyre is broken down, transformed into undifferentiated matter and reintroduced into a new production cycle; in reuse, by contrast, it preserves its form, integrity and residual performance, becoming part of a new functional system through minimal transformation. (Image by authors).

Operational Framework and Method

The survey of recent case studies confirms a convergence between circular design, Computational Design, and digital fabrication [Brütting et al., 2020; Brütting et al., 2021; Dévènes et al., 2022; Grangeot et al., 2025; Kycia et al., 2022]. These examples demonstrate how different material typologies can acquire new configurations through the tools and methods of Computational Design, thereby extending their life cycle.

The need for such an approach is further supported by environmental data. By way of example, Eurostat data for 2024 indicate that, in Italy, household waste accounts for approximately 15% of the total, corresponding to 29 million tonnes, while waste generated by production activities represents 43%, equal to 82.4 million tonnes, and inert waste, largely deriving from the construction sector, accounts for 42%, equal to 78.1 million tonnes. While rubble is characterised by a high degree of heterogeneity,

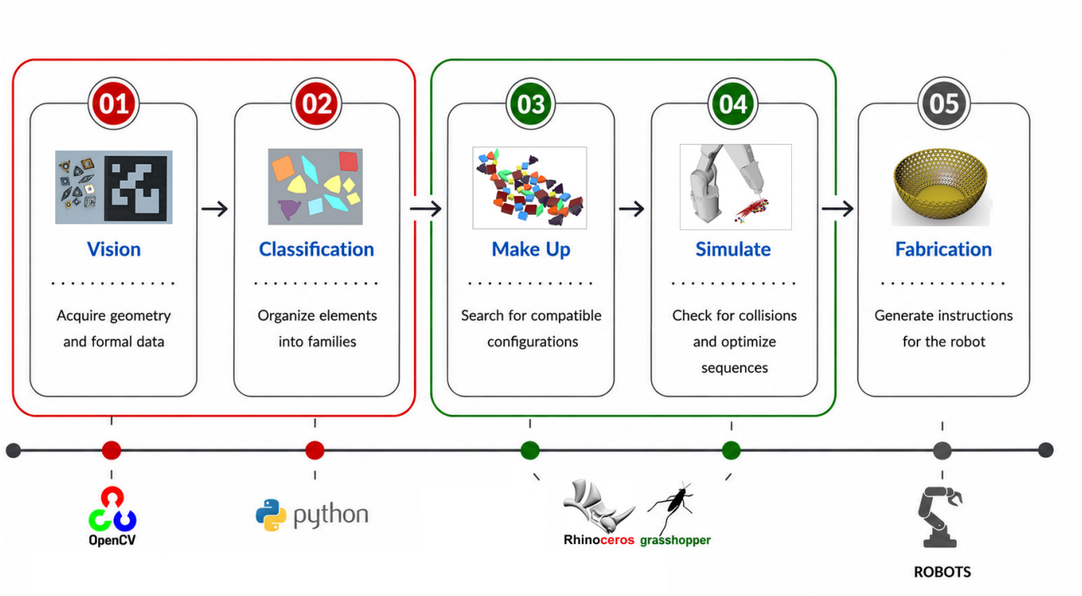


Fig. 2: Workflow del processo: gli elementi di scarto vengono acquisiti tramite computer vision, classificati in famiglie formali e successivamente riorganizzati in configurazioni compatibili all'interno di un ambiente parametrico. La simulazione consente il controllo delle collisioni e l'ottimizzazione delle sequenze operative, fino alla generazione delle istruzioni necessarie alla fabbricazione robotica del nuovo artefatto.

Fig. 2: Process workflow: waste elements are acquired through computer vision, classified into formal families, and subsequently reorganised into compatible configurations within a parametric environment. Simulation enables collision checking and the optimisation of operational sequences, ultimately generating the instructions required for the robotic fabrication of the new artefact. (Image by authors).

una firma di forma basata sul metodo Farthest Point Distance, che permette di confrontare profili indipendentemente da rotazione e scala, integrando una soglia dimensionale per distinguere pezzi simili ma non equivalenti [El-ghazal et al., 2009]. Il risultato è un insieme di famiglie formali univoche, aggiornabile in tempo reale e utilizzabile come base per la generazione progettuale (Fig. 3).

La visione artificiale riconosce contorni e marcatori; gli algoritmi di *clustering* trasformano differenze percettive in classi; la simulazione robotica verifica se una configurazione sia producibile prima della prova fisica. Il processo non coincide quindi con una generazione autonoma della forma, ma con la costruzione di un circuito di feedback tra rilievo, interpretazione e azione. Questo circuito permette di trattare lo scarto come dato aggiornabile e di collegare decisioni estetiche, vincoli tecnici e disponibilità di magazzino in un unico ambiente decisionale.

Nuova vita per gli inserti da tornitura CNC

Il caso di studio riguarda inserti esausti per torni e macchine CNC, realizzati in carburo di tungsteno, cermet o acciai rapidi. Durante la lavorazione questi elementi sono sottoposti a forti sollecitazioni meccaniche e termiche; il filo di taglio si degrada in tempi relativamente brevi, tra 10 e 22 ore di lavorazione, mentre la massa, la durezza e la stabilità chimica del componente rimangono in

many industrial residues, by contrast, originate from controlled processes and display dimensional repeatability and residual performance qualities. These conditions suggest an alternative trajectory: rather than reducing them to secondary raw materials, their geometry can be preserved as informational and constructive capital. Digitisation, therefore, assumes a strategic role: without an accurate inventory, reuse remains dependent on the tacit expertise of the operator; with a dynamic inventory, by contrast, each element can be queried according to shape, size, thickness, contact area, orientation, and potential position within the assembly. To reduce both costs and acquisition time, the experiment privileges two-dimensional digitisation. Turning inserts, in fact, are characterised by standardised planar geometries — triangular, rhomboidal, square, or trapezoidal — making contour analysis sufficient for many product-design applications.

The toolkit was developed in Grasshopper through Python 3 components and OpenCV libraries. The image was acquired using a smartphone camera, with the ob-

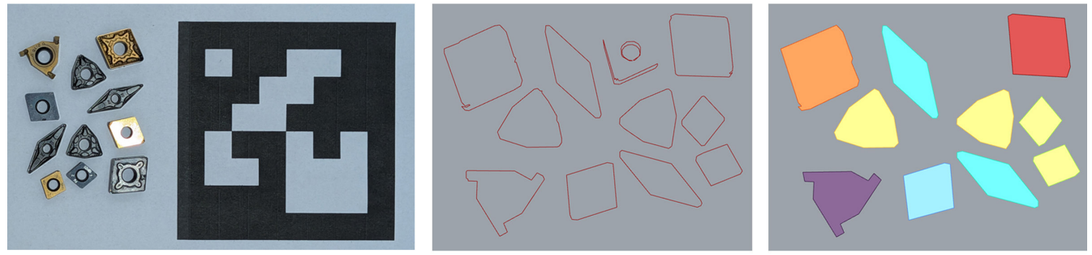


Fig. 3: Conversione della geometria reale in ambiente digitale mediante calibrazione, rettifica, estrazione dei contorni e approssimazione delle polilinee.

Fig. 3: Conversion of real geometry into the digital environment through calibration, rectification, contour extraction and polyline approximation. (Image by authors).

larga parte intatte. Le stesse caratteristiche che rendono l'inserto efficiente in produzione rendono però costoso il recupero materico, perché richiedono separazioni, trattamenti o processi energeticamente onerosi. Il riuso geometrico diventa pertanto una strategia plausibile: l'inserto non è considerato scoria, ma parte di uno stock (Fig. 4). Le informazioni ottenute dalla digitalizzazione permettono di comporre configurazioni a trama piena o aperiodica, nelle quali gli elementi più compatti e con maggiore superficie di contatto sono collocati in zone di sollecitazione più elevate, mentre gli elementi forati o irregolari sono impiegati in aree in cui sono richieste permeabilità visiva o alleggerimento. Il progetto non impone una forma predefinita bensì lavora per compatibilità, facendo emergere la configurazione finale dall'interazione tra disponibilità, regole distributive e obiettivi prestazionali.

La fase successiva traduce il modello in istruzioni robotiche. Per ciascun inserto sono calcolate le coordinate, l'orientamento sui tre assi, il punto di presa, la traiettoria di avvicinamento, il posizionamento e il distacco. La simulazione verifica collisioni, angoli di accesso, sequenza delle operazioni e tempi di esecuzione (Fig. 5). Un operatore umano, posto di fronte a decine o centinaia di elementi differenti, potrebbe ottenere risultati analoghi solo attraverso prove progressive e tempi produttivi difficilmente sostenibili. La robotica non sostituisce l'intelligenza progettuale, ma assorbe la ripetizione e l'accuratezza esecutiva, lasciando all'uomo la definizione di regole, criteri e scenari. Nel caso di studio, il sistema è applicato a portamatite e svuotatasche ottenuti mediante assemblaggio di inserti classificati tramite tassellazione dello stesso elemento, con giunzioni semplici quali incollaggio strutturale, o micro-saldatura (Fig. 6), ma le possibilità combinatorie sono virtualmente infinite.

Conclusione

Il valore del Computational Reuse non risiede esclusivamente nella capacità di generare morfologie complesse, difficilmente perseguibili attraverso procedure convenzionali. Sebbene l'articolazione formale rappresenti un esito progettualmente rilevante, il punto centrale riguarda soprattutto la dimensione economica e procedurale del processo: trasferire nel dominio computazionale il lavoro cognitivo necessario a riconoscere,

jects measured against an ArUco marker of known dimensions. OpenCV documentation confirms that metric estimation requires camera calibration parameters and distortion coefficients; for this reason, the process includes an initial calibration phase and the perspective rectification of the image [OpenCV, 2026] (Fig. 2). Integration within Grasshopper makes it possible to maintain continuity between analysis, parametric modelling, and production, using the Python 3 component as an internal scripting environment [McNeel, 2024].

The image is converted into a NumPy array, adjusted through contrast, levels, and thresholding tools, and then analysed through contour detection. The resulting profiles are converted into RhinoCommon polylines and simplified according to a user-defined tolerance, removing artefacts and redundant vertices. Since the same component may appear with different orientations and sampling conditions, a direct comparison of polylines is not sufficient. A shape signature based on the Farthest Point Distance method is therefore adopted, allowing profiles to be compared independently of rotation and scale, while integrating a dimensional threshold to distinguish between elements that are similar but not equivalent [El-ghazal et al., 2009].

The result is a set of unique formal families, updated in real time and usable as a basis for design generation (Fig. 3).

Computer vision identifies contours and markers; clustering algorithms translate perceptual differences into classes; robotic simulation verifies whether a configuration is producible before physical testing. The process, therefore, does not coincide with the autonomous generation of form,



Fig. 4: Esempi di inserti da tornitura CNC recuperati: famiglie geometriche e materiali diversi con potenziale di riuso.

Fig. 4: Examples of recovered CNC turning inserts: different geometric families and materials with reuse potential. (Image by authors).

misurare, confrontare e assegnare componenti non standard. In un processo manuale, ogni variazione geometrica richiede infatti valutazioni specifiche, adattamenti puntuali e decisioni operative non sempre generalizzabili. All'aumentare della variabilità degli elementi, il tempo necessario per selezionarli, verificarne la compatibilità e definirne le modalità di assemblaggio tende a crescere in modo lineare e, nei casi più complessi, persino esponenziale. Ne deriva un incremento significativo dei costi di lavoro e di gestione, che rende il riutilizzo poco competitivo all'interno dell'attuale scenario socio-economico. Per questa ragione, nonostante negli ultimi decenni sia progressivamente aumentata la sensibilità della società globale nei confronti delle questioni ambientali e della sostenibilità dei processi produttivi, il riuso continua a occupare una posizione marginale rispetto ad altre strategie circolari. I casi realmente operativi e replicabili risultano ancora limitati e sono spesso riconducibili a iniziative motivate da istanze etiche, pratiche artigianali o sperimentazioni progettuali di carattere dimostrativo. Pur rilevanti sul piano culturale e critico, tali esperienze faticano a incidere in modo strutturale sull'impatto ambientale, poiché troppo vincolate a

but rather with the construction of a feedback loop between survey, interpretation, and action. This loop makes it possible to treat waste as an updatable dataset and to connect aesthetic decisions, technical constraints, and stock availability within a single decision-making environment.

New Life for CNC Turning Inserts

The case study concerns worn inserts for lathes and CNC machines, made of tungsten carbide, cermet, or high-speed steel. During machining, these elements are subjected to intense mechanical and thermal stresses; the cutting edge deteriorates within a relatively short time, generally between 10 and 22 hours of operation, while

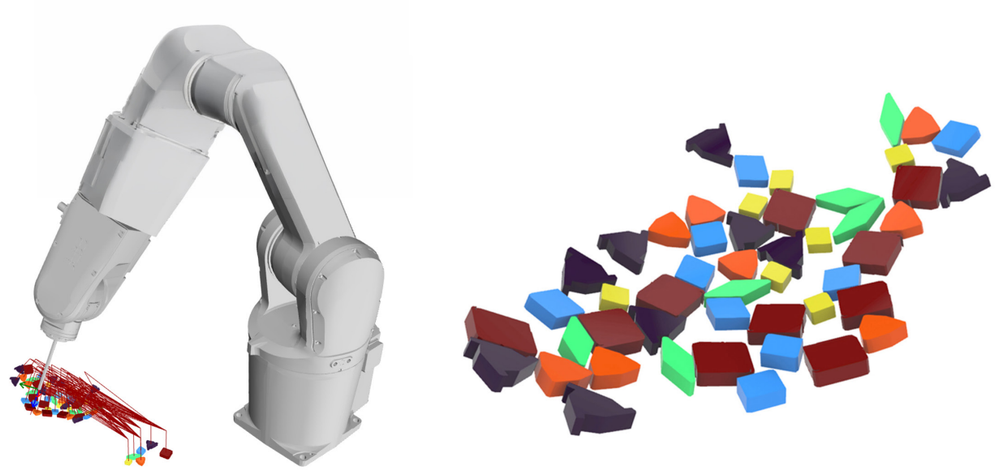


Fig. 5: Simulazione digitale della fabbricazione: è possibile studiare la disposizione di elementi eterogenei e le rispettive traiettorie operative, consentendo di ottimizzare tempistiche e disposizione prima della produzione fisica. (immagine degli autori)

Fig. 5: Digital fabrication simulation: the arrangement of heterogeneous elements and their operational trajectories can be studied, allowing timing and positioning to be optimised before physical production. Image by the authors.

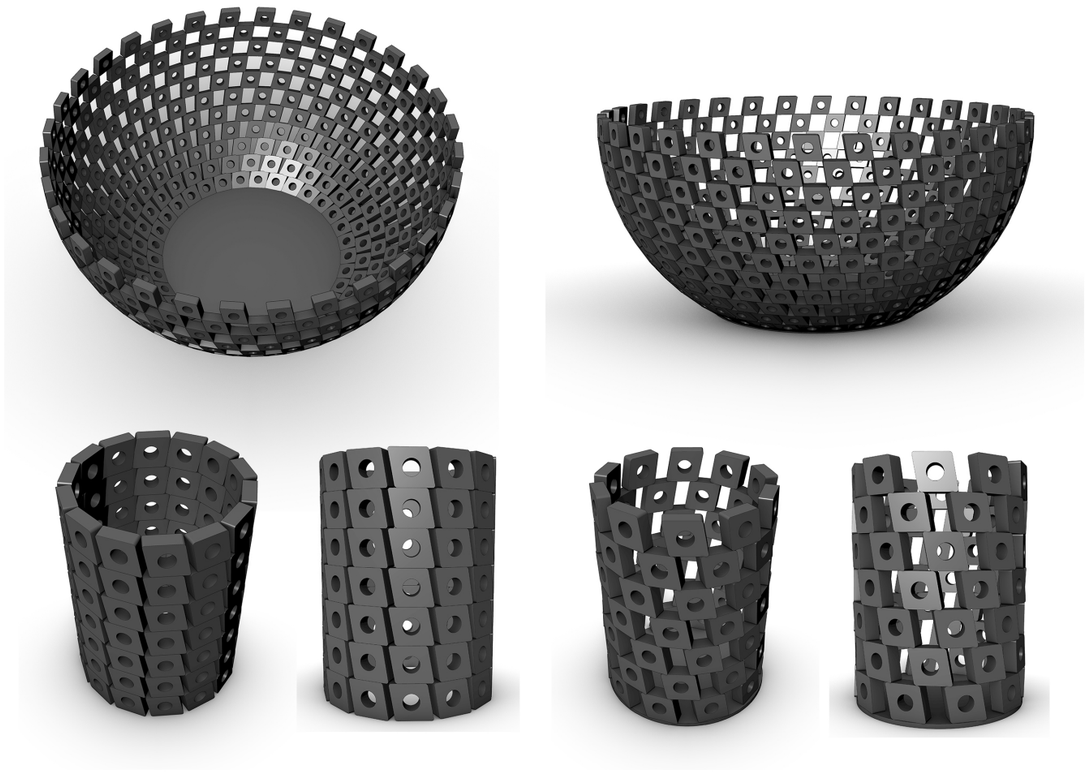


Fig. 6: Prototipi di svuotatasche e portamatite ottenuti mediante l'assemblaggio di inserti classificati. (Immagine degli autori.)

Fig. 6: Catchall tray and pencil holder prototypes obtained by assembling classified inserts. (Image by authors).

processi manuali ad alta difficoltà di lavorazione o a modelli difficilmente scalabili, che le confinano a una dimensione episodica o sperimentale. Così come nelle economie preindustriali il riutilizzo non era una scelta accessoria, ma una condizione strutturale imposta dalla scarsità delle risorse e dall'organizzazione stessa dei sistemi produttivi, oggi esso deve essere ripensato a partire dalle possibilità offerte dal contesto tecnico contemporaneo. Le medesime infrastrutture che contribuiscono alla crisi ambientale possono essere riconvertite in strumenti per affrontarne le conseguenze. Il Computational Reuse non deve recuperare nostalgicamente modelli produttivi del passato, ma tradurre il principio antico del "non sprecare ciò che possiede ancora valore" all'interno di un paradigma operativo odierno orientato alla conservazione del valore materiale, alla riduzione dello spreco e alla costruzione di modelli più sostenibili per il futuro.

Il paper è il risultato di un lavoro congiunto; il capitolo 1, parte del 2, parte del capitolo 3 e le immagini sono attribuibili a G. Buratti; parte del capitolo 2 e parte del capitolo 3 ad Attilio Nebuloni e parte del 3 ed il codice per il rilievo delle forme ad A. Rossi; conclusioni e revisione finale sono condivise.

Bibliografia

Ahlquist, S., & Menges, A. (2011). Computational design thinking. In S. Ahlquist & A. Menges (Eds.), *Computational Design Thinking*, pp. 10-29. Chichester: John Wiley & Sons.

Allner, L., Kroehnert, D., & Rossi, A. (2019). Mediating irregularity: Towards a design method for spatial structures utilising naturally grown forked branches. In *Impact: Design With All Senses*, pp. 433-445. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29829-6_34

Brütting, J., Senatore, G., Schevenels, M., & Fivet, C. (2020). Optimum design of frame structures from a stock of reclaimed elements. *Frontiers in Built Environment*, 6, 57. https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00057

Brütting, J., Senatore, G., Muresan, A., Mirtsopoulos, I., & Fivet, C. (2021). Synthesis of kit-of-parts structures for reuse. In *Advances in Architectural Geometry*, pp. 330-349. Paris: École des Ponts ParisTech.

Carl, T., Siefert, S., & Rossi, A. (2022). Upcycling shell: From scrap to structure. In *Towards Radical Regeneration*, pp. 211-222. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13249-0_18

Cetin, S., De Wolf, C., & Bocken, N. (2021). Circular digital built environment: An emerging framework. *Sustainability*, 13(11), 6348. https://doi.org/10.3390/su13116348

Dévènes, J. R., Brütting, J., Küpfer, C. M., Bastien-Masse, M., & Fivet, C. (2022). Re: Crete - Reuse of concrete blocks from cast-in-place building to arch footbridge. *Structures*, 43, 1854-1867. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.012

the mass, hardness, and chemical stability of the component remain largely intact. However, the same characteristics that make the insert highly efficient in production also make material recovery costly, as they require separation, treatment, or energy-intensive processes.

Geometric reuse therefore emerges as a plausible strategy: the insert is no longer understood as waste, but as part of an available stock (Fig. 4). The information obtained through digitization makes it possible to compose dense or aperiodic configurations, in which more compact elements with larger contact surfaces are positioned in areas subject to greater stress, while perforated or irregular elements are used where visual permeability or lightening is required. The project does not impose a predefined form; rather, it operates through compatibility, allowing the final configuration to emerge from the interaction between material availability, distributive rules, and performance objectives.

The following phase translates the digital model into robotic instructions. For each insert, the system calculates coordinates, orientation along the three axes, gripping point, approach trajectory, placement, and release. The simulation verifies collisions, access angles, operational sequence, and execution times (Fig. 5). A human operator, faced with dozens or hundreds of different elements, could achieve comparable results only through progressive testing and production times that would be difficult to sustain economically. Robotics does not replace design intelligence; rather, it absorbs repetition and executive precision, leaving the human operator responsible for defining rules, criteria, and scenarios.

In the case study, the system is applied to pencil holders and catchall trays obtained by assembling classified inserts through the tessellation of the same element, using simple joining techniques such as structural bonding or micro-welding (Fig. 6). However, the combinatorial possibilities are virtually unlimited.

Conclusion

The value of Computational Reuse does not lie exclusively in its capacity to generate complex morphologies that would be difficult to achieve through conventional procedures. Although formal articulation represents a relevant design outcome, the central issue is primarily economic and procedural: transferring to the computational domain the cognitive work required to recognise, measure, compare, and assign non-standard components.

In a manual process, each geometric variation requires specific assessments, punctual adaptations, and operational decisions that cannot always be generalised. As the variability of the elements increases, the time required to select them, verify their compatibility, and define their assembly strategies tends to grow linearly and, in more complex cases, even exponentially. This results in a significant increase in labour and management costs, making reuse poorly competitive within the current socio-economic context.

For this reason, despite the progressive growth of global awareness regarding environmental issues and the sustainability of production processes in recent decades, reuse continues to occupy a marginal position compared to other circular strategies.

Truly operational and replicable cases remain limited and are often associated with initiatives driven by ethical motivations, craft-based practices, or demonstrative design experiments. While culturally and critically relevant, these experiences struggle to produce a structural impact on environmental dynamics, as they remain too dependent on manual processes characterised by high operational complexity or on models that are difficult to scale, thereby confining them to an episodic or experimental dimension.

Just as in pre-industrial economies, reuse was not an accessory choice, but a structural condition imposed by resource scarcity and by the organisation of production systems themselves; today, it must be rethought through the possibilities offered by the contemporary technical context. The same infrastructures that contribute to the environmental crisis can be reoriented as tools to address its consequences. Computational Reuse should not nostalgically recover past production models but rather translate the ancient principle of "not wasting what still has value" into a contemporary operational paradigm oriented toward the preservation of material value, the reduction of waste, and the construction of more sustainable models for the future.

EDEK - University of Kassel. (2025). *Augmented Reuse*. Karamba3D Research.

El-ghazal, A., Basir, O., & Belkasim, S. (2009). Farthest point distance: A new shape signature for Fourier descriptors. *Signal Processing: Image Communication*, 24(7), 572-586.

Grangeot, M., Küpfer, C., & Fivet, C. (2025). *Concrete rubble reuse for load-bearing walls*. Structural Xploration Lab, EPFL.

ISPRA. (2025). *Rapporto Rifiuti Speciali - Edizione 2025*. Roma: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualising the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

Kycia, A., Hugo, J., & Rossi, A. (2022). Felt & Fold: Design and manufacturing of customised nonwovens through robotic needle felting. *eCAADe 40*.

Lau Hiu Hoong, J. D., Lux, J., Mahieux, P. Y., Turcry, P., & Aït-Mokhtar, A. (2020). Determination of the composition of recycled aggregates using a deep learning-based image analysis. *Automation in Construction*, 116, 103204. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103204

McNeel. (2024). *Grasshopper Scripting: Python*. Rhino Developer Documentation.

Nian, S., Pham, T., Haas, C., Ibrahim, N., Yoon, D., & Bregman, H. (2022). A functional demonstration of adaptive reuse of waste into modular assemblies for structural applications: The case of bicycle frames. *Journal of Cleaner Production*, 348, 131162. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131162

OpenCV. (2026). *Detection of ArUco markers*. OpenCV Documentation, version 4.x.

Sainsbury, V. A., & Liu, R. (2022). 'Nothing new under the sun': Rethinking recycling in the past - Editorial. *Archaeometry*, 64(S1), 1-7. https://doi.org/10.1111/arcm.12789

Sun, Q., Reisach, D., Langenberg, S., & Dillenburger, B. (2026). Computational design methods for geometry-driven upcycling of found objects in construction. *Automation in Construction*, 183, 106803.

Although the paper is the result of a joint effort, Chapter 1, part of Chapter 2, part of Chapter 3, and the figures are attributable to G. Buratti; part of Chapter 2 and part of Chapter 3 are attributable to Attilio Nebuloni; part of Chapter 3 and the code developed for shape acquisition are attributable to A. Rossi. The conclusions and final revision were developed jointly.

Autori

Matteo Bigongiari[1]
Andrea Lumini[1]
Andrea Taglianini[1]

[1] Università di Firenze (DIDA)

Email

matteo.bigongiari@unifi.it
andrea.lumini@unifi.it
andrea.taglianini@edu.unifi.it

Keywords

3D MODELLING
3D GAUSSIAN SPLATTING
IMMERSIVE STORYTELLING
INTEGRATED DIGITAL SURVEY
VR

Oltre il modello 3D. Un ecosistema digitale ibrido per la fruizione virtuale del complesso di San Lorenzo a Firenze

Beyond the 3D model. A hybrid digital ecosystem for the virtual fruition of the San Lorenzo complex in Florence

Abstract

Il contributo presenta un workflow sperimentale per la fruizione virtuale del complesso di San Lorenzo a Firenze. Integrando modelli 3D *reality-based* multi-scalari, foto panoramiche a 360° e *3D Gaussian Splatting*, viene proposto lo sviluppo di un ecosistema digitale ibrido finalizzato alla sua narrazione immersiva. L'infrastruttura *web-based*, articolata in un Virtual Tour interattivo, si configura come un gemello digitale idoneo sia per ricerca, la divulgazione e la valorizzazione di questo complesso.

The paper presents an experimental workflow for the virtual fruition of the San Lorenzo complex in Florence. By integrating multi-scalar reality-based 3D models, 360° panoramic photos, and 3D Gaussian Splatting, it proposes the development of a hybrid digital ecosystem aimed at its immersive narration. The web-based infrastructure, structured as an interactive Virtual Tour, acts as a digital twin suitable for the research, dissemination, and valorisation of this complex.

Introduzione

Il complesso di San Lorenzo a Firenze rappresenta uno dei palinsesti architettonici più complessi del Rinascimento, un organismo dove convivono la rigorosa sintassi spaziale di Brunelleschi, stratificazioni michelangiolesche e densi apparati decorativi. Nella trasformazione digitale dei Beni Culturali, la mera restituzione geometrica non è più sufficiente: emerge l'urgenza di sviluppare modelli capaci di restituire anche l'atmosfera e la qualità materica del monumento [Bianchini et al., 2019; Balzani et al., 2023].

Il contributo illustra i primi risultati del progetto "S.LOR3D - Il complesso di San Lorenzo: Architettura, Arte, Scienza. Contenuti virtuali per la divulgazione del patrimonio culturale rinascimentale" (co-finanziato dal 2025 dal Fondo Sviluppo e Coesione/GiovaniSì della Regione Toscana), finalizzato alla creazione di un "gemello virtuale ibrido" del complesso laurenziano [Bigongiari, 2025]. L'obiettivo metodologico principale è superare la dicotomia tra precisione metrica 3D e fedeltà visiva fotografica, proponendo un ambiente di esplorazione integrata strutturato su tre livelli: la scala architettonica del modello geometrico e mappato, l'accessibilità di un Virtual Tour 360° e la fruizione e fedeltà percettiva del *3D Gaussian Splatting* (Fig. 1).

La sperimentazione presentata all'interno di questo contributo si concentra specificamente sulla Basilica e sulla Sagrestia Vecchia, ambienti che per le loro caratteristiche architettoniche e materiche costituiscono il banco di prova ideale per questo approccio.

Il rilievo digitale integrato

La costruzione di questo ecosistema digitale ha preso avvio da un'articolata campagna di rilievo multi-strumentale, esplicitamente progettata per rispondere alla forte complessità morfologica, architettonica e materica del palinsesto laurenziano. L'approccio adottato si basa sull'integrazione sinergica di tecnologie di acquisizione *range-based* e *image-based*, operando a differenti scale di risoluzione e accuratezza [Carta et al., 2022; Bigongiari, Lumini, 2026].

Per quanto riguarda la componente *range-based* – riferimento metrico e morfologico dell'intero progetto S.LOR3D – è stato impiegato principalmente un sistema basato su laser-scanner terrestri (TLS), ed in particolare un Leica RTC360, un Faro Focus M70 e un Z+F Imager 5016. L'integrazione di queste strumentazioni ha così consentito l'acquisizione complessiva del palinsesto architettonico, generando una nuvola di punti altamente descrittiva di tutti i suoi spazi (Fig. 2A). Tuttavia, per le specifiche sperimentazioni di questo contributo e per le successive fasi di modellazione 3D geometrica, dal *dataset* globale del complesso, sono stati estratti ed elaborati esclusivamente i dati relativi agli interni della Basilica e della Sagrestia Vecchia.

Per gli spazi esterni del sagrato e della piazza antistante – anch'essi integrati nell'ecosistema digitale – è stato invece impiegato un laser-scanner mobile XGRIDS Lixel K1 basato su tecnologia SLAM, il quale è stato sfruttato esclusivamente per la generazione del modello *3D Gaussian Splatting* destinato alla fruizione degli esterni (Fig. 2B).

Per la digitalizzazione degli elementi di dettaglio e dei complessi apparati decorativi, la componente *range-based* è stata integrata da una rigorosa campagna fotogrammetrica *Structure from Motion* (SfM). Le acquisizioni a terra, condotte con una fotocamera mirrorless Sony α7 mark V, si sono focalizzate su elementi scultorei, opere pittoriche e sui pulpiti donatelliani (Fig. 2D). Al contempo, per catturare le porzioni sommitali del complesso, si è ricorsi ad un sistema UAV. Mediante un drone DJI Mavic 3E sono state rilevate interamente le coperture esterne e sono state eseguite sessioni di volo *indoor* finalizzate a mappare capitelli, cornici e coperture a cassettoni (Fig. 2C).

Infine, per supportare lo sviluppo del Virtual Tour 360° e garantire quindi un'accessibilità intuitiva dell'ecosistema digitale, l'acquisizione fotografica è stata completata con una camera sferica Insta360 Pro 2 (Fig. 2E). Grazie a sei obiettivi *fisheye* sincronizzati, lo strumento ha permesso di registrare, in punti nodali prestabiliti, una serie di panorami sferici ad una risoluzione nativa di 8K,

Introduction

The San Lorenzo complex in Florence represents one of the most complex architectural palimpsests of the Renaissance, an organism where Brunelleschi's rigorous spatial syntax, Michelangelesque stratifications, and dense decorative apparatuses coexist. In the digital transformation of Cultural Heritage, mere geometric restitution is no longer sufficient: there is an urgent need to develop models capable of rendering the atmosphere and material quality of the monument as well [Bianchini et al., 2019; Balzani et al., 2023].

This contribution illustrates the initial results of the project "S.LOR3D - The San Lorenzo complex: Architecture, Art, Science. Virtual content for the dissemination of Renaissance cultural heritage" (co-funded from 2025 by the Development and Cohesion Fund/GiovaniSì of the Tuscany Region), aimed at creating a "hybrid virtual twin" of the Laurentian complex [Bigongiari, 2025].

The main methodological objective is to overcome the dichotomy between 3D metric precision and photographic visual fidelity by proposing an integrated exploration environment structured on three levels: the architectural scale of the mapped geometric model, the accessibility of a 360° Virtual Tour, and the fruition and perceptual fidelity of 3D Gaussian Splatting (Fig. 1).

The experimentation presented within this contribution focuses specifically on the Basilica and the Old Sacristy, spaces that, due to their architectural and material characteristics, constitute the ideal test bed for this approach.

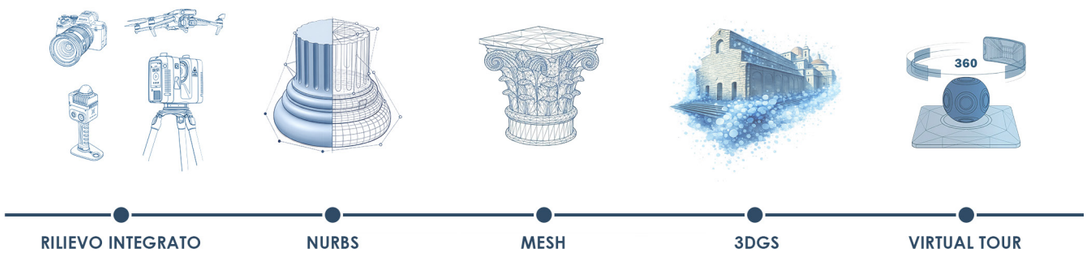


Fig. 1: Workflow metodologico per la creazione dell'ecosistema digitale ibrido.

Fig. 1: Methodological workflow for the creation of the hybrid digital ecosystem.

The integrated digital survey

The construction of this digital ecosystem began with a comprehensive multi-instrumental survey campaign, explicitly designed to respond to the high morphological, architectural, and material complexity of the Laurentian palimpsest. The adopted approach is based on the synergistic integration of range-based and image-based acquisition technologies, operating at different scales of resolution and accuracy [Carta et al., 2022; Bigongiari, Lumini, 2026].

Regarding the range-based component – the metric and morphological reference for the entire S.LOR3D project – a system based on terrestrial laser scanners (TLS) was primarily employed, specifically a Leica RTC360, a Faro Focus M70, and a Z+F Imager 5016. The integration of these instruments thus allowed for the comprehensive acquisition of the architectural palimpsest, generating a highly descriptive point cloud of all its spaces (Fig. 2A). However, for the specific experimentations of this contribution and the subsequent phases of geometric 3D modelling, only the data relating to the interiors of the Basilica and the Old Sacristy were extracted and processed from the global dataset of the complex.

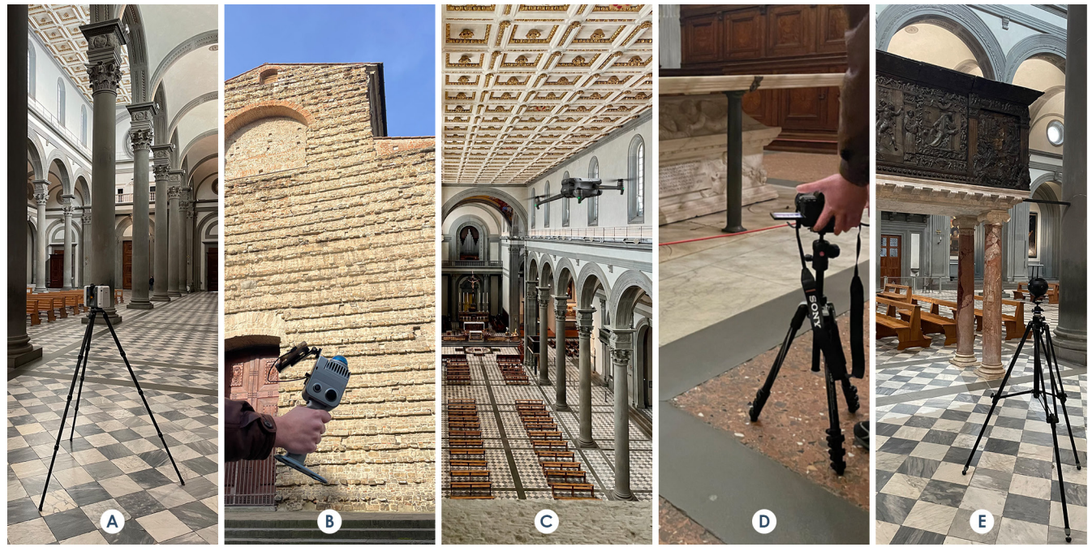


Fig. 2: Immagini della campagna di rilievo digitale integrato e multi-strumentale: TLS (A), SLAM (B), UAV (C), camera professionale close-range (D), camera sferica 360 (E).

Fig. 2: Images of the integrated and multi-instrumental digital survey campaign: TLS (A), SLAM (B), UAV (C), professional close-range camera (D), 360° spherical camera (E).

fornendo così i layer fotografici interattivi destinati a costituire l'infrastruttura della navigazione immersiva.

La modellazione 3D ibrida

La fase successiva all'acquisizione ha riguardato la traduzione dei dataset del rilievo (Fig. 3) all'interno di un workflow di modellazione 3D ibrido, concepito per gestire la duplice natura del complesso laurenziano: da un lato la rigorosa scomposizione geometrico-modulare dell'architettura brunelleschiana, dall'altro l'articolata complessità plastica degli apparati scultorei e decorativi. Per rispondere a tale eterogeneità, la ricerca ha ha adottato un approccio integrato che combina la modellazione NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Splines*) e quella poligonale *mesh* (Fig. 4).

Questa strategia ha permesso di ottimizzare il rapporto tra accuratezza geometrica, fedeltà cromatico-materica e sostenibilità computazionale del modello complessivo, ponendo le basi per la successiva implementazione all'interno degli ambienti virtuali interattivi [Parrinello et al., 2021; Apollonio, 2024].

La modellazione NURBS è stata adottata come metodologia principale per la ricostruzione dell'infrastruttura architettonica della Basilica e della Sacrestia Vecchia. La sintassi spaziale brunelleschiana, fondata su precisi rapporti proporzionali, moduli geometrici ripetuti e simmetrie rigorose, trova infatti nella continuità matematica delle superfici NURBS, gestite e generate all'interno del software *McNeel Rhinoceros*, il perfetto strumento di rappresentazione. Utilizzando sezioni, piante e prospetti estratti direttamente dalla nuvola di punti, sono stati così ricostruiti i profili 2D dei principali elementi costruttivi, con particolare attenzione alla rappresentazione dell'ordine architettonico.

Parallelamente, la modellazione poligonale *mesh* è stata applicata alla digitalizzazione degli apparati decorativi e scultorei, per i quali una razionalizzazione geometrica tramite NURBS avrebbe inevitabilmente comportato una perdita di informazioni formali. Componenti come i pulpiti di Donatello, i capitelli corinzi, gli altari, le opere pittoriche sono stati trattati mediante algoritmi di ricostruzione densa SfM all'interno del software *RealityScan*, a partire dai *dataset* fotografici terrestri ed aerei. Data l'elevata pesantezza computazionale di tali modelli *highpoly*, è stata eseguita un'ottimizzazione geometrica attraverso procedure di decimazione e *retopology*, volte a ridurre il numero di poligoni ma preservandone l'integrità morfologica indispensabile per la percezione materica.

L'integrazione di queste componenti in un unico ambiente digitale ha costituito il momento cruciale del *workflow* ibrido. Inizialmente, l'ambiente di *Rhinoceros* è stato utilizzato per l'integrazione preliminare, ancorando i modelli mesh delle sculture all'interno dello scheletro architettonico NURBS, attraverso le medesime coordinate spaziali derivate dal rilievo integrato. Successivamente, l'intero database tridimensionale è stato importato nella piattaforma di *game-engine D5*, dove sono state portate avanti l'integrazione finale dei dati, la texturizzazione e, più in generale, tutti i processi di *ArchViz* del modello complessivo.

In questo ambiente *real-time* sono stati configurati materiali avanzati PBR (*Physically Based Rendering*) per uniformare ed equilibrare la resa visiva dei diversi elementi: mentre le *mesh* di *RealityScan* incorporavano già l'alta definizione cromatica originaria (*UV mapping*), alle superfici NURBS sono state applicate mappe customizzate per restituire i canali di riflessione e rugosità propri della pietra serena e dell'intonaco bianco. La virtualizzazione dello spazio è stata infine completata tramite un accurato settaggio

For the external spaces of the parvis and the square in front – which are also integrated into the digital ecosystem – a mobile laser scanner XGRIDS Lixel K1 based on SLAM technology was used instead. This was exploited exclusively for the generation of the 3D Gaussian Splatting model intended for the fruition of the exteriors (Fig. 2B).

For the digitisation of detailed elements and complex decorative apparatuses, the range-based component was integrated with a rigorous Structure from Motion (SfM) photogrammetric campaign. Ground acquisitions, conducted with a Sony α7 mark V mirrorless camera, focused on sculptural elements, paintings, and Donatello's pulpits (Fig. 2D). At the same time, to capture the upper portions of the complex, a UAV system was used. By means of a DJI Mavic 3E drone, the external roofs were entirely surveyed, and indoor flight sessions were carried out aimed at mapping capitals, cornices, and coffered ceilings (Fig. 2C).

Finally, to support the development of the 360° Virtual Tour and thereby guarantee intuitive accessibility to the digital ecosystem, the photographic acquisition was completed with an Insta360 Pro 2 spherical camera (Fig. 2E). Thanks to six synchronised fisheye lenses, the instrument allowed recording, at pre-established nodal points, a series of spherical panoramas at a native resolution of 8K, thus providing the interactive photographic layers intended to form the infrastructure of the immersive navigation.

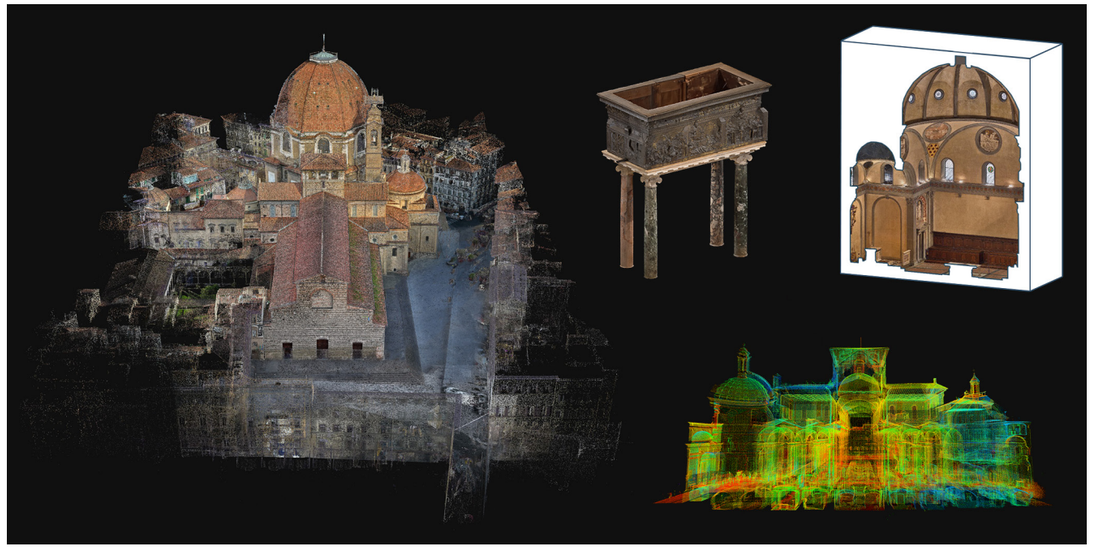


Fig. 3: Output metrico-morfologici del rilievo digitale integrato. Da sinistra: nuvola di punti aerofotogrammetrica; modelli mesh fotogrammetrici di un pulpito donatelliano e della Sagrestia Vecchia; nuvola di punti laser-scanner TLS.

Fig. 3: Metric-morphological outputs of the integrated digital survey. From the left: aerial photogrammetric point cloud; photogrammetric mesh models of a pulpit by Donatello and the Old Sacristy; TLS laser scanner point cloud.

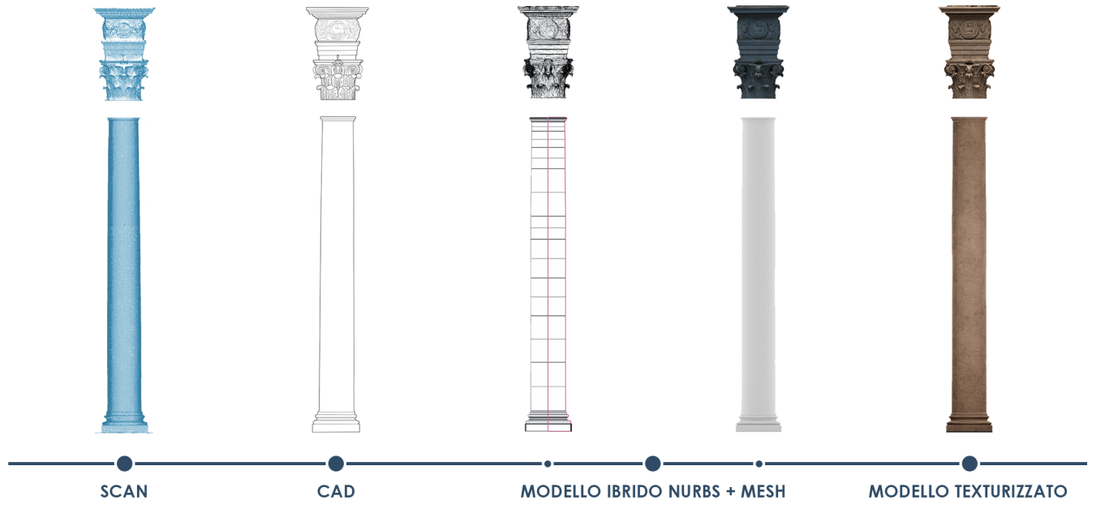


Fig. 4: Workflow metodologico per la modellazione 3D ibrida di elementi architettonici complessi.

Fig. 4: Methodological workflow for the hybrid 3D modelling of complex architectural elements.

The hybrid 3D modelling

The phase following the acquisition involved translating the survey datasets (Fig. 3) into a hybrid 3D modelling workflow, designed to manage the dual nature of the Laurentian complex: on the one hand, the rigorous geometric-modular decomposition of Brunelleschian architecture, and on the other, the intricate plastic complexity of the sculptural and decorative apparatuses. To respond to this heterogeneity, the research adopted an integrated approach that combines NURBS (Non-Uniform Rational Basis Splines) and polygonal mesh modelling (Fig. 4).

This strategy allowed for the optimisation of the relationship between geometric accuracy, chromatic-material fidelity, and the computational sustainability of the overall model, laying the foundations for its subsequent implementation within interactive virtual environments [Parrinello et al., 2021; Apollonio, 2024].

NURBS modelling was adopted as the primary methodology for the architectural

dell'illuminazione, ottenendo un ambiente semanticamente organizzato, in cui l'astrazione geometrico-architettonica e il realismo scultoreo coesistono in perfetto equilibrio metrico, visivo e fedele al monumento reale (Fig. 5).

Oltre la modellazione: sperimentazioni di 3D Gaussian Splatting

La digitalizzazione degli spazi aperti e del tessuto urbano circostante ha visto l'applicazione sperimentale del *3D Gaussian Splatting* (3DGS), una metodologia di *neural rendering* che si distanzia dalle tradizionali procedure estrattive della fotogrammetria poligonale per offrire un modello puramente visivo e ad altissimo realismo [Brennan, 2025].

In questa tecnologia, l'ambiente non viene tradotto in *mesh* rigide, bensì rappresentato attraverso milioni di primitive gaussiane, ovvero ellissoidi tridimensionali caratterizzati da parametri spaziali di posizione, scala, orientamento e opacità, le cui proprietà cromatiche dipendenti dall'angolo di osservazione sono codificate mediante armoniche sferiche (*Spherical Harmonics*). La forma architettonica emerge così in modo continuo dalla sovrapposizione e dall'ottimizzazione iterativa di questi volumi di influenza, rappresentando fedelmente i gradienti chiaroscurali, i riflessi della luce naturale e la matericità catturata in fase di acquisizione fotografica [Perticarini et al., 2025].

Con l'obiettivo di individuare la strategia più efficiente per la restituzione visiva del contesto e dei fronti esterni della Basilica, la ricerca ha strutturato una campagna sperimentale comparativa basata su differenti protocolli di acquisizione. Una prima linea ha previsto un approccio *image-based*, avvalendosi di un dataset misto composto da fotogrammi aerei zenitali e obliqui acquisiti tramite il drone e immagini terrestri catturate da fotocamera professionale.

Questi dati, pre-allineati in *RealityScan*, sono stati successivamente elaborati nel software *PostShot* per l'addestramento dell'algoritmo di *splatting*. Sebbene questo test abbia beneficiato della luce naturale diffusa, ha evidenziato limiti strutturali significativi: poiché le riprese erano state originariamente impostate secondo le modalità della fotogrammetria classica, la configurazione dei punti di vista non è risultata pienamente ottimale per il 3DGS, provocando vuoti informatici e artefatti visivi in corrispondenza delle zone geometricamente più complesse o meno esposte (Fig. 6).

Per superare tali criticità, la sperimentazione ha trovato la sua soluzione più performante nell'adozione del sistema *SLAM XGRIDS Lixel K1*. L'impiego di questo laser-scanner mobile dotato di una *spatial-camera* integrata ha permesso una registrazione dei dati spaziali e visuali in modo speditivo, fluido e continuo semplicemente camminando intorno alla Basilica. La fase di post-produzione ha subito un'analoga e drastica ottimizzazione computazionale, poiché l'elaborazione delle primitive gaussiane sono state condotte direttamente nel software proprietario *LCC Studio*, abbreviando i tempi di addestramento.



Fig. 5: Modello 3D ibrido degli ambienti interni della Basilica di San Lorenzo. A sinistra visualizzazione texturizzata; a destra, in bianco le superfici modellate mediante NURBS e in azzurro mediante mesh.

Fig. 5: Hybrid 3D model of the interior spaces of the Basilica of San Lorenzo. On the left, the textured visualisation; on the right, in white the surfaces modelled using NURBS and in light blue those modelled using meshes.

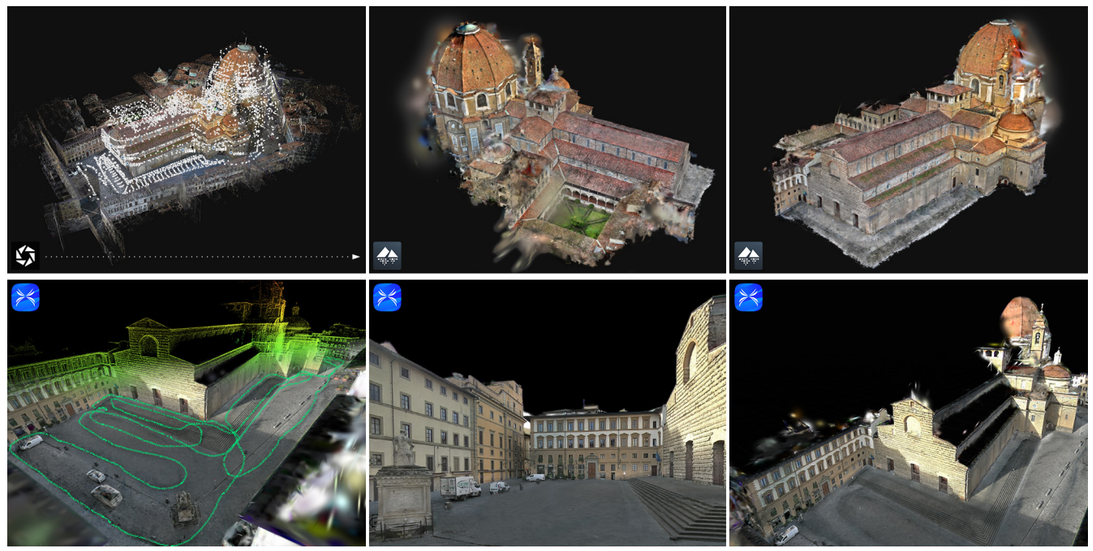


Fig. 6: Sperimentazioni sulla più ottimale modalità di elaborazione di modelli *3D Gaussian Splatting*. In alto, acquisizioni fotogrammetriche SfM e addestramento algoritmo di splatting; in basso, approccio mediante *spatial-camera* ed elaborazione in software proprietario.

Fig. 6: Experimentations on the most effective processing methodology for 3D Gaussian Splatting models. Above, SfM photogrammetric acquisitions and splatting algorithm training; below, a spatial-camera approach and processing within proprietary software.

reconstruction of the Basilica and the Old Sacristy. Brunelleschi's spatial syntax – founded on precise proportional ratios, repeated geometric modules and rigorous symmetries – finds in the mathematical continuity of NURBS surfaces, managed and generated within McNeel Rhinoceros, the ideal instrument of representation. Using sections, plans and elevations extracted directly from the point cloud, the 2D profiles of the principal constructive elements were reconstructed, with particular attention to the representation of the architectural order.

In parallel, polygonal mesh modelling was applied to the digitalisation of the decorative and sculptural apparatus, for which a geometric rationalisation via NURBS would inevitably have entailed a loss of formal information. Components such as Donatello's pulpits, the Corinthian capitals, the altars and the pictorial works were processed through dense SfM reconstruction algorithms within RealityScan, drawing on terrestrial and aerial photographic datasets. Given the considerable computational weight of these high-poly models, geometric optimisation was carried out through decimation and retopology procedures, aimed at reducing the polygon count whilst preserving the morphological integrity essential for material perception.

The integration of these components into a single digital environment constituted the pivotal stage of the hybrid workflow. Initially, the Rhinoceros environment was employed for preliminary integration, anchoring the sculptural mesh models within the NURBS architectural skeleton through the same spatial coordinates derived from the integrated survey. Subsequently, the entire three-dimensional database was imported into the D5 game-engine platform, where the final data integration, texturing and, more broadly, all ArchViz processes for the overall model were carried out.

Within this real-time environment, advanced PBR (Physically Based Rendering) materials were configured to unify and balance the visual output of the different elements: whilst the RealityScan meshes already incorporated their original high chromatic definition (UV mapping), customised maps were applied to the NURBS surfaces to render the reflectance and roughness channels characteristic of pietra serena and white plaster. The virtualisation of the space was finally completed through careful lighting

Nonostante i limiti di ripresa di una scansione condotta esclusivamente a livello stradale (Fig. 6) – che ha comportato una parziale assenza di dati relativi alle coperture sommitali e la necessità di circoscrivere la durata della ripresa dinamica per contenere il peso computazionale dei file – l'elevata fedeltà percettiva, congiuntamente alla fluidità di navigazione in tempo reale, ha confermato la validità di questo output neurale quale layer visivo ideale per la rappresentazione immersiva del contesto urbano dell'ecosistema digitale ibrido (Fig. 7).

Un ecosistema digitale ibrido per la fruizione interattiva

La sintesi operativa e concettuale dell'intero processo di digitalizzazione si è concretizzata nello sviluppo di un ecosistema digitale ibrido, implementato e gestito attraverso la piattaforma web *Panoee*, esplicitamente progettato per garantire una fruizione interattiva, multiscalare e accessibile del complesso laurenziano attraverso un *Virtual Tour* a navigazione ibrida (Bertocci et al., 2024).



Fig. 7: Navigazione del contesto fotorealistico generato mediante la seconda modalità di ricostruzione *3D Gaussian Splatting*.
Fig. 7: Navigation of the photorealistic context generated through the second 3D Gaussian Splatting reconstruction method.

Questa infrastruttura, integrando dati eterogenei in un unico ambiente interconnesso, permette di alternare la visita dell'utente tra fotografie sferiche a 360° dello stato di fatto a render sferici estratti direttamente dal modello 3D ibrido, consentendo un confronto immediato e scientifico tra la realtà monumentale e la sua ricostruzione digitale geometrica.

Il percorso esplorativo prende avvio dall'interno della Basilica, ponendo fin da subito l'osservatore al centro del rigore prospettico dell'aula brunelleschiana, per poi snodarsi in modo fluido attraverso i vari ambienti e l'esterno del complesso.

All'interno di questo spazio navigabile, la consultazione è guidata da quattro specifiche tipologie di hotspot interattivi: gli "hotspot 360" consentono il semplice spostamento tra le diverse foto panoramiche del tour; gli "hotspot informativi" mediano l'accesso ai contenuti testuali e storici di approfondimento; gli "*hotspot* video", inseriti all'interno dei render sferici, avviano sequenze video estratte dal modello 3D che offrono una narrazione dinamica dello spazio, evidenziando caratteristiche volumetriche o funzionali non immediatamente percepibili nelle immagini statiche; infine, gli "*hotspot* 3DGS" consentono di superare la staticità dei punti di vista panoramici tradizionali collegando direttamente l'utente al modello *3D Gaussian Splatting* (3DGS).

Questo comando attiva il passaggio alla navigazione libera del modello neurale, trasferendo l'utente nello spazio tridimensionale della piazza e del sagrato con la possibilità di muoversi – sia in modalità POV che tramite avatar – e orbitare liberamente nell'ambiente fotorealistico generato in 3DGS, e garantendo un livello di immersività sensoriale di tipo videoludico (Fig. 8).

L'integrazione di questi formati eterogenei in un'unica interfaccia trasforma la mole di dati del rilievo in uno strumento di conoscenza condivisa, delineando un gemello digitale ibrido capace di supportare simultaneamente le esigenze della ricerca scientifica, le necessità conservative e la valorizzazione culturale rivolta a un pubblico eterogeneo [Pancani, Carissimo, 2026].

Conclusioni

L'approccio ibrido presentato in questa ricerca ha efficacemente fornito una risposta metodologica scalabile e sostenibile alle sfide poste dalla trasformazione digitale dei Beni Culturali [Parrinello et al., 2021; Cerbai et al., 2026].

Il complesso di San Lorenzo a Firenze è risultato un banco di prova ideale per sperimentare il superamento della dicotomia tra accuratezza metrica e fedeltà visivo-percettiva, grazie alla coesistenza sinergica di modelli NURBS, superfici *mesh* e primitive da *3D Gaussian Splatting*, integrati in un'unica infrastruttura web interattiva.

Coniugando il rigore geometrico con il rendering neurale e la fotografia sferica, questi primi risultati del progetto S.LOR3D hanno evidenziato come il digitale possa farsi carico della complessità del reale senza doverla necessariamente semplificare.

L'ecosistema si è così configurato come un gemello digitale ibrido: un archivio scientifico per la ricerca e, al contempo, una piattaforma immersiva di forte impatto divulgativo. In ottica futura, le prospettive prevedono l'estensione di questo setup, yielding a semantically organised environment in which geometric-architectural abstraction and sculptural realism coexist in precise metric and visual equilibrium, faithful to the actual monument (Fig. 5).

Beyond modelling: experimentations in 3D Gaussian Splatting

The digitalisation of the open spaces and surrounding urban fabric involved the experimental application of 3D Gaussian Splatting (3DGS), a neural rendering methodology that departs from the traditional extractive procedures of polygonal photogrammetry to offer a purely visual model of exceptionally high realism [Brennan, 2025]. In this technology, the environment is not translated into rigid meshes, but rather represented through millions of Gaussian primitives — that is, three-dimensional ellipsoids characterised by spatial parameters of position, scale, orientation and opacity, whose view-dependent chromatic properties are encoded by means of Spherical Harmonics.

The architectural form thus emerges continuously from the superimposition and iterative optimisation of these volumes of influence, faithfully reproducing the chiaroscuro gradients, the reflections of natural light and the material qualities captured during the photographic acquisition phase [Perticarini et al., 2025].

With the aim of identifying the most efficient strategy for the visual representation of the context and external façades of the Basilica, the research structured a comparative experimental campaign based on differing acquisition protocols. A first approach involved an image-based method, drawing on a mixed dataset comprising zenithal and oblique aerial frames acquired by drone alongside terrestrial images captured with a professional camera.

These data, pre-aligned in RealityScan, were subsequently processed in PostShot software for the training of the splatting algorithm. Although this test benefited from diffuse natural light, it revealed significant structural limitations: since the footage had originally been configured according to the conventions of classical photogrammetry, the viewpoint arrangement proved not fully optimal for 3DGS, giving rise to data gaps and visual artefacts in the geometrically more complex or less exposed areas (Fig. 6).

To overcome these shortcomings, the most effective solution was found in the adoption of the XGRIDS Lixel K1 SLAM system. The use of this mobile laser scanner equipped with an integrated spatial camera allowed the spatial and visual data to be recorded in a swift, fluid and continuous manner, simply by walking around the Basilica.

The post-production phase underwent an equally significant computational optimisation, as the processing of the Gaussian primitives was carried out directly within the proprietary LCC Studio software, considerably reducing training times.

Despite the inherent limitations of a survey conducted exclusively at street level (Fig. 6) – which resulted in a partial

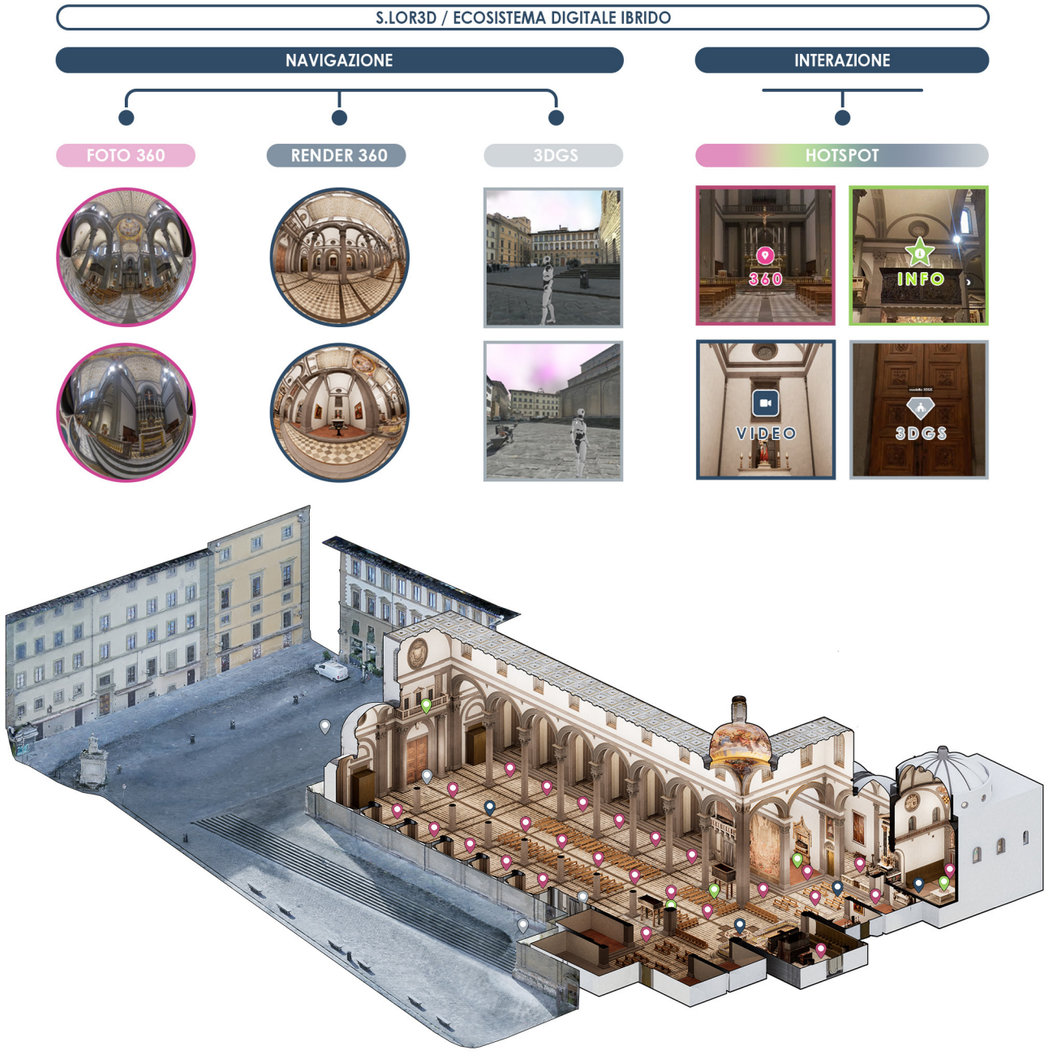


Fig. 8: Struttura ed elementi che compongono l'ecosistema digitale ibrido del complesso laurenziano.

Fig. 8: Structure and components of the hybrid digital ecosystem of the Laurentian complex.

protocollo metodologico alle restanti porzioni del complesso non ancora digitalizzate, al fine di ampliare la strutturazione dell'ecosistema digitale.

Crediti

La presente ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto di Alta Formazione "S.LOR3D - Il complesso di San Lorenzo: Architettura, Arte, Scienza. Contenuti virtuali per la divulgazione del patrimonio culturale rinascimentale" co-finanziato dal Fondo per lo Sviluppo e la Coesione / GiovaniSì della Regione Toscana e dall'Opera Mediceo Laurenziana, di cui gli scriventi sono rispettivamente P.I. e assegnista di ricerca preposto.

Alcune delle elaborazioni grafiche e delle sperimentazioni presentate sono state sviluppate nell'ambito di una tesi di laurea triennale in Scienze dell'Architettura, svolta presso il Dipartimento di Architettura (DIDA) dell'Università degli Studi di Firenze, intitolata: "Oltre il 3D. Ecosistemi digitali ibridi per la fruizione virtuale della Basilica di San Lorenzo a Firenze", con relatore S. Bertocci e correlatori M. Bigongiari e A. Lumini, discussa nell'aprile 2026 dal laureando A. Taglianini.

Bibliografia

Apollonio, F. I. (2024). The three-dimensional model as a "scientific fact": the scientific methodology in hypothetical reconstruction. In *Heritage*, *7*(10), pp. 5413–5427.

Balzani M., Maietti F., Raco F., Rizzi D., Rossato L. (2023) Ipirangadigital: 3D documentation activities for conservation and awareness increasing of Cultural Heritage in Brazil. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 48*(2), pp. 163-169.

Bertocci S., Lumini A., Cottini A. (2024). Virtual Tour and 3D digitisation as tools for Cultural Heritage fruition. The robbiane at the Sanctuary of La Verna. In S. Bertocci, G. Verdiani, F. Cioli, A. Cottini (Eds.), *Proceedings of KUI24 - 21th International Conference on Culture and Computer Science: from Humanism to Digital Humanities* – Florence (Italy), October 2024. New York (NY, USA): ACM.

Bianchini C., Casale A., Empler T., Esposito D., Inglese C., Ippoliti E., Ippolito A., Ribichini L., Valenti G., Viscogliosi A. (2019). Ecosistemi digitali e risorse culturali. In *Paesaggio Urbano*, 1, pp. 41-51.

Bigongiari M. (2025). Oltre il modulo: misurare l'adattamento nel Palinsesto Laurenziano. In *TRIBELON*, *2*(4), pp. 66-75.

Bigongiari M., Lumini A. (2026). Scan-to-BIM-to-VR processes for the documentation and valorization of the defensive fortifications in Piombino. In A. Giordano, M. Russo, R. Spallone (Eds.), *Representation Across Boundaries. Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction*, pp. 867-885. Cham: Springer.

Brennan J. A. O. (2025). Immersive heritage through Gaussian splatting: A new visual aesthetic for reality capture. In *Frontiers in Computer Science*, 7, pp. 1-15

Carta M., Cera V., De Luca L. (2022). From survey to knowledge: the interpretative role of 3D digital models in Architectural Heritage. In *Heritage*, *5*, pp. 2302-2321.

Cerbai C., Bianconi F., Filippucci M., Cavalagli N. (2026). Digital ecosystems for conservation: an integrated workflow for Heritage management. In: V. Gusella, M. Gioffrè, F. Cluni, N. Cavalagli, G. Milani (Eds.), *Architecture, Engineering and Design for Monuments*

A hybrid digital ecosystem for interactive fruition

The operative and conceptual synthesis of the entire digitalisation process took shape in the development of a hybrid digital ecosystem, implemented and managed through the Panoee web platform, explicitly designed to ensure interactive, multi-scalar and accessible engagement with the Laurentian complex through a Virtual Tour with hybrid navigation [Bertocci et al., 2024].

This infrastructure, integrating heterogeneous data within a single interconnected environment, allows the user's visit to alternate between 360° spherical photographs of the current state and spherical renders extracted directly from the hybrid 3D model, enabling an immediate and scholarly comparison between the monumental reality and its geometric digital reconstruction.

The exploratory itinerary begins inside the Basilica, placing the observer from the outset at the centre of the perspectival rigour of the Brunelleschian nave, before unfolding fluidly through the various spaces and the exterior of the complex.

Within this navigable environment, exploration is guided by four specific types of interactive hotspot: "360 hotspots" allow simple movement between the different panoramic images of the tour; "informational hotspots" mediate access to in-depth textual and historical content; "video hotspots", embedded within the spherical renders, launch video sequences extracted from the 3D model that offer a dynamic narration of the space, highlighting volumetric or functional characteristics not immediately perceptible in static images; finally, "3DGS hotspots" allow the user to transcend the static viewpoints of traditional panoramic photography by connecting directly to the 3D Gaussian Splatting (3DGS) model.

This command activates the transition to free navigation of the neural model, transferring the user into the three-dimensional space of the piazza and the forecourt, with the possibility of moving – both in POV mode and via avatar – and orbiting freely within the photorealistic environment generated in 3DGS, thus delivering a level of sensory immersivity akin to that of a video game (Fig. 8).

The integration of these heterogeneous formats within a single interface transforms the survey data into an instrument of shared absence of data regarding the upper roof structures and necessitated restricting the duration of the dynamic acquisition to contain the computational weight of the files – the high perceptual fidelity, combined with the fluidity of real-time navigation, confirmed the validity of this neural output as the ideal visual layer for the immersive representation of the urban context within the hybrid digital ecosystem (Fig. 7).

Safeguarding. AID Monuments 2025. Lecture Notes in Civil Engineering, 806, pp.923-935. Cham: Springer.

Pancani G., Carissimo M. (2026). Scan-to-HBIM approach for digital management and virtual fruition. In *Heritage*, *9*(4): 151.

Parrinello S., Miceli A., Galasso F. (2021). From digital survey to serious game. A process of knowledge for the Ark of Mastino II. In *Disegnarecon, 14*(27), pp. 17.1-17.22.

Parrinello S., Sanseverino A., Fu H. (2023). HBIM modelling for the architectural valorisation via a maintenance digital eco-system. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *48*(2), pp. 1157–1164.

Perticarini M., Condorelli F., Giordano A. (2025). Il rilievo di ambienti complessi per progetti in realtà immersiva mediante gaussian splatting: La sala terrena della Scuola Grande Di San Marco. In J. Ros-Torres, G. Vázquez (Eds.), *Proceedings of APEGA 2025 - XVII International Conference on Graphic Expression Applied to Building. Graphic Thinking* (pp. 385-393). Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

knowledge, delineating a hybrid digital twin capable of simultaneously supporting the demands of scientific research, conservation requirements and cultural dissemination aimed at a wide and varied audience [Pancani, Carissimo, 2026].

Conclusions

The hybrid approach presented in this research has effectively provided a scalable and sustainable methodological response to the challenges posed by the digital transformation of Cultural Heritage [Parrinello et al., 2021; Cerbai et al., 2026]. The complex of San Lorenzo in Florence proved an ideal testing ground for experimenting with the transcendence of the dichotomy between metric accuracy and visual-perceptual fidelity, thanks to the synergistic coexistence of NURBS models, mesh surfaces and 3D Gaussian Splatting primitives, integrated within a single interactive web infrastructure.

By combining geometric rigour with neural rendering and spherical photography, these initial results of the S.LOR3D project have demonstrated how the digital medium can accommodate the complexity of reality without necessarily having to simplify it. The ecosystem has thus taken shape as a hybrid digital twin: a scientific archive for research and, at the same time, an immersive platform of considerable communicative impact. Looking ahead, future prospectives include the extension of this methodological protocol to the remaining portions of the complex not yet digitalised, with the aim of broadening the structure of the digital ecosystem.

Credits

This research was conducted within the framework of the Advanced Training project “S.LOR3D - The San Lorenzo complex: Architecture, Art, Science. Virtual contents for the dissemination of Renaissance cultural heritage”, co-funded by the Development and Cohesion Fund / GiovaniSì of the Tuscany Region and by the Opera Mediceo Laurenziana, of which the authors are respectively Principal Investigator and appointed research fellow.

Some of the graphic elaborations and experiments presented were developed as part of a Bachelor’s dissertation in Architectural Sciences, carried out at the Department of Architecture (DIDA) of the University of Florence, entitled: “Beyond 3D. Hybrid Digital Ecosystems for the Virtual Engagement with the Basilica of San Lorenzo in Florence”, supervised by S. Bertocci with co-supervisors M. Bigongiari and A. Lumini, and defended in April 2026 by the graduating student A. Taglianini.

Autori

Maurizio Marco Bocconcino[1]
Mariapaola Vozzola[1]
Larisa Semis[1]

Email

maurizio.bocconcino@polito.it
mariapaola.vozzola@polito.it
larisa.semis@polito.it

[1] Politecnico di Torino – Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

Keywords

HERITAGE INFORMATION 3D MODELLING
MIXED REALITY
INCLUSIVE ACCESSIBILITY
NATURAL INTERACTION (NI)
MIDAIR GESTURES

Segno, gesto, conoscenza: interazione naturale per la divulgazione di collezioni storiche di modelli lignei per l'ingegneria delle costruzioni

Sign, gesture, knowledge: natural interaction for the dissemination of historical collections of wooden models for structural engineering

Abstract

Il contributo propone un processo integrato per digitalizzare e gestire il patrimonio culturale e accademico del Politecnico di Torino. La *Mixed Reality*, le interazioni gestuali e le visualizzazioni olografiche permettono all'utente di usufruire di un'esperienza immersiva, inclusiva e *contactless*.

This paper proposes an integrated process for digitization and management of the cultural and academic heritage of the Politecnico di Torino. Mixed reality technologies, gesture-based interactions paradigms and holographic visualizations systems enable users to enjoy an immersive, inclusive and contactless experience.

Introduzione

Il contributo propone un processo integrato per la digitalizzazione e la gestione del patrimonio culturale e accademico conservato presso il Politecnico di Torino, con particolare riferimento alle collezioni storiche legate allo sviluppo della scienza e della tecnica delle costruzioni del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica. Tali collezioni comprendono un significativo numero di modelli lignei Ottocenteschi che, attraverso una serie di azioni di valorizzazione e riuso, stanno progressivamente riacquistando un ruolo centrale sia in ambito didattico e di ricerca, sia nelle attività di coinvolgimento di pubblici più ampi, configurandosi come risorse strategiche nell'ambito della terza missione [Bocconcino, Vozzola, et al. 2023a, 2023b, 2023c].

In questo contesto, la crescente diffusione, negli ultimi anni, di strumenti e tecnologie per l'acquisizione e la modellazione tridimensionale di oggetti storici di valore scientifico-didattico ha determinato un profondo cambiamento nei processi di documentazione e analisi del patrimonio culturale storico-artistico. Tuttavia, la produzione di un modello tridimensionale geometricamente accurato costituisce una rappresentazione intrinsecamente statica che, in assenza di un'integrazione strutturata di metadati e informazioni storiche, non è in grado di supportare efficacemente strategie di conservazione predittiva, manutenzione a lungo termine e valorizzazione [Bocconcino, Vozzola, et al. 2023c]. La gestione efficiente del bene risulta inoltre ostacolata dalla difficoltà di applicare standard universali per la modellazione informativa degli elementi storici spesso caratterizzati da unicità, complessità materica e stratificazione temporale [Bocconcino, Vozzola, et al., 2023b]. Ne deriva la necessità di definire protocolli operativi puntuali, capaci di garantire interoperabilità e riuso dei dati in contesti differenti e per finalità diversificate. Un'ulteriore criticità, rilevante per la sostenibilità nel tempo dei processi di digitalizzazione, riguarda la complessità delle tecnologie attualmente proposte in letteratura, che richiedono competenze informatiche avanzate non sempre possedute dai professionisti dell'ambito storico-architettonico. Ne consegue l'esigenza di sviluppare metodologie accessibili, scalabili e replicabili, in grado di coniugare rigore scientifico, semplicità operativa e sostenibilità gestionale.

La ricerca si sviluppa sulla volontà di superare la concezione del modello 3D quale prodotto finale del processo di digitalizzazione e divulgazione/condivisione, riconfigurandolo come componente di un ecosistema informativo dinamico, orientato alla conservazione preventiva, alla gestione evolutiva del bene e alla fruizione pubblica. In questa prospettiva, l'impiego di strumenti di *Mixed Reality* (MR), basati su tecnologie olografiche e immersive, consente di sviluppare modalità innovative di interrogazione e consultazione dei contenuti digitali, sia da parte dei professionisti del settore sia nell'ottica di inclusione e della divulgazione verso pubblici eterogenei. In questo ambito, gli apparati conoscitivi della disciplina del disegno supportano la predisposizione di ambienti di consultazione e interrogazione efficienti in termini di comunicazione a pubblici vasti e did efficaci quando si rivolgono a studiosi specializzati,

Per consentire una transizione fluida tra il mondo fisico e quello digitale, il settore della *Human-Machine Interaction* (HMI) [Gagliarelli, et al. 2025] ha progressivamente sviluppato il paradigma dell'interazione tangibile finalizzato ad arricchire il mondo reale con funzionalità digitali [Hewett, et al. 1992]. Questo approccio si basa sulla manipolazione di oggetti fisici specifici oppure sull'utilizzo di gesti liberi contribuendo a rendere l'esperienza dell'utente più coinvolgente e immersiva. All'interno di questo ambito, il tracciamento dei movimenti delle mani rappresenta una tecnica di interazione adottata per la manipolazione di oggetti virtuali, configurandosi come un'alternativa ai tradizionali dispositivi di controllo.

Negli ultimi anni, nell'ambito della comunicazione e della divulgazione digitale, si è affermato un nuovo paradigma di interazione uomo-macchina basato sulla *Natural Interaction* (NI) [Pietroni, et al. 2014]. Tale approccio si basa sull'utilizzo di "gesti in aria" (*midair gestures*), che consentono agli utenti di esplorare ambienti ed elementi tridimensionali senza l'utilizzo di dispositivi fisici di input. A differenza della *Virtual Reality* (VR), che può creare una condizione di isolamento percettivo tra l'utente e il contesto reale, l'integrazione di sensori di profondità e di movimento consente al fruitore di interagire con lo spazio digitale attraverso movimenti naturali del corpo, evitando l'uso di dispositivi e favorendo l'*embodiment,* come percezione di essere fisicamente e spazialmente integrato all'interno del sistema digitale [Kilteni, et al. 2012]. I sensori operano come interfaccia utente non a contatto, permettendo ai visitatori di manipolare i contenuti senza toccare schermi o dispositivi fisici. Si configura così uno spazio condiviso, interattivo e immersivo, dedicato alla fruizione dei modelli informativi digitali, in cui vengono progressivamente ridotte non solo le barriere fisiche, ma anche quelle tecnologiche. In particolare, vengono superati i limiti dei dispositivi di input tradizionali, che richiedono competenze specifiche e tempi di apprendimento, ostacolando un'interazione fluida e immediata tra utenti, ambiente digitale e infrastruttura tecnologica. Di conseguenza, l'attenzione si concentra sempre più su aspetti quali l'inclusività, con l'obiettivo di rendere l'utente parte integrante del contesto informativo e immerso nei contenuti che esso offre, e quali l'interattività, intesa come possibilità di sviluppare un rapporto personale con la conoscenza attraverso l'esplorazione attiva del mondo digitale e la libera scelta di contenuti e percorsi di fruizione.

Workflow integrato per la digitalizzazione e la fruizione immersiva

Il processo di digitalizzazione della Collezione Curioni è stato sviluppato tramite un processo finalizzato alla documentazione, alla conservazione e alla valorizzazione del patrimonio tecnico-scientifico del Politecnico di Torino con l'obiettivo di creare un ecosistema informativo capace di connettere modello fisico, rappresentazione digitale e contenuti informativi all'interno di una piattaforma interoperabile e accessibile.

La fase di acquisizione è stata condotta tramite tecniche di fotogrammetria basate su dispositivi mobili dotati di sensori LiDAR e utilizzando l'applicazione Polycam Pro. I modelli ottenuti sono stati sottoposti a operazioni di pulizia e ottimizzazione geometrica e infine esportati nei formati interoperabili ".obj" e ".fbx", idonei per applicazioni di visualizzazione, modellazione informativa e fruizione immersiva, nonchè di stampa tridimensionale.

Introduction

This paper proposes an integrated process for the digitization and management of the cultural and academic heritage preserved at the Politecnico di Torino, with particular focus on the historical collections documenting the development of construction science and technology within the Department of Structural, Civil and Geotechnical Engineering. These collections include a significant number of 19th-century wooden models which, through a series of valorization and reuse initiatives, are progressively regaining a central role in both teaching and research activities, as well public engagement initiatives. In this context, they are increasingly emerging as strategic resources within the framework of the university's third mission activities [Bocconcino, Vozzola, et al. 2023a, 2023b, 2023c].

Recent advances in technologies and tools for the three-dimensional acquisition and modelling of historical objects of scientific and educational value have profoundly transformed the processes of documentation and analysis of historical and artistic cultural heritage. Nevertheless, the generation of a geometrically accurate three-dimensional model constitutes an intrinsically static form of representation which, without the structured integration of metadata and historical information, is unable to effectively support strategies for predictive conservation, long-term maintenance and heritage valorization processes [Bocconcino, Vozzola, et al. 2023c]. Furthermore, the efficient management of cultural heritage assets is hindered by the difficulty of applying universal standards to the information modelling of historical artefacts, which are frequently characterized by uniqueness, material complexity and temporal stratification [Bocconcino, Vozzola, et al., 2023b]. The efficient management of heritage is also hampered by the difficulty of applying universal standards to the digital modelling of historical elements, which are often characterized by their uniqueness, material complexity and historical stratification [Bocconcino, Vozzola, et al., 2023b]. This highlights the need to define dedicated operational protocols capable of ensuring interoperability and facilitating the reuse of data across different contexts and application purposes. An additional critical issue, closely related to the long-term sustainability of digitization processes, concerns the complexity of the technologies currently proposed in the literature, which require advanced IT skills not always possessed by professionals operating in the historical-architectural field. Consequently, there is a growing to develop accessible, scalable and replicable methodologies capable of combining scientific rigour with operational simplicity and sustainable management practices.

This research is grounded in the intention to overcome the conception of the 3D model as the final output of the digitization and dissemination/sharing processes, instead reconceptualizing it as an integral component of a dynamic information ecosystem oriented towards preventive conservation, adaptive heritage management, and public accessibility. From this perspective, the adoption of Mixed Reality (MR) technologies, based on holographic and immersive environments, enables the development of innovative methods for querying and consulting digital content, both for heritage professionals and in support of inclusive dissemination strategies aimed at broader and more diverse audiences. Within this framework, the cognitive and representational tools of the discipline of drawing support the creation of consultation and interrogation environments that are simultaneously efficient in terms of communication to wide audiences and effective when addressing specialist scholars.

In order to facilitate a seamless transition between physical and digital environments, the field of Human-Machine Interaction (HMI) [Gagliarelli, et al. 2025] has progressively developed the paradigm of tangible interaction, aimed at enriching the real world through the integration of digital functionality [Hewett, et al. 1992]. This approach is based on the manipulation of specific physical objects or the use of free-hand gestures, helping to make the user experience more engaging and immersive. Within this domain, hand tracking has emerged as a significant interaction technique for the manipulation of virtual objects, offering an effective alternative to traditional control devices.

In recent years, the field of digital communication and cultural dissemination has witnessed the emergence of a new paradigm of human-computer interaction based on Natural Interaction (NI) [Pietroni et al. 2014]. This approach relies on the use of 'mid-air gestures', enabling users to navigate and explore three-dimensional environments and

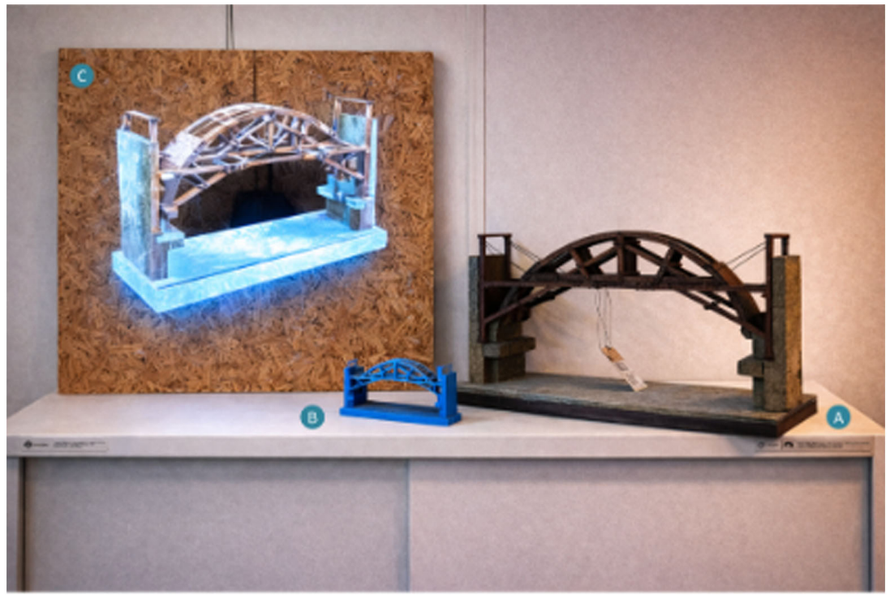


Fig. 1: Esempio di un modello di una armatura completa, detta sospesa con ferramenta in legno, 40x76x20 cm, Inv. 47 (1865-1887, DISEG); A – modello originale in legno; B - modello stampato 3D; C – ologramma.

Fig. 1: Example of a model of a full suit of armour, known as a 'suspended' suit with wooden fittings, 40x76x20 cm, Inv. 47 (1865–1887, DISEG); A – original wooden model; B – 3D-printed model; C – hologram.

La stampa 3D, infatti, conferma la continuità tra elaborazione grafica e conoscenza, riportando la rappresentazione digitale nella dimensione materiale e riattivando la funzione pedagogica originaria dei modelli storici (Fig. 1). Parallelamente alla costruzione geometrica, il processo ha previsto una strutturazione informativa dei dati secondo principi FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) con l'obiettivo di garantire tracciabilità, accessibilità e conservazione a lungo termite dei contenuti digitali [Wilkinson, et al. 2016]. Ogni modello è stato associato a metadati descrittivi, documentazione fotografica, riferimenti archivistici e collegamenti diretti alle collezioni storiche del Politecnico di Torino; come piattaforma digitale per la loro divulgazione è stata scelta Sketchfab (Fig. 2) poiché permette di visualizzare i modelli tridimensionali direttamente da comuni browser, mantenendo le *texture* e le informazioni geometriche, così come il corredo di informazioni di natura fotografica e testuale. Gli stessi modelli sono stati impiegati per la sperimentazione di contenuti olografici [Tang, et al. 2023] attraverso strumenti di proiezione basati su sistemi LED rotativi, capaci di generare immagini tridimensionali "sospese" nello spazio. Tale approccio mira a trasformare il modello digitale in una presenza volumetrica percepibile nello spazio reale, favorendo un'esperienza immersiva e coinvolgente [Xu, et al. 2025]. In questo contesto, la visualizzazione olografica costituisce una componente del workflow integrato, in quanto consente di superare la bidimensionalità delle tradizionali modalità espositive, restituendo movimento, profondità e percezione spaziale agli artefatti storici.

A questo sistema - fondato sulla memoria retinica e quindi sulla persistenza della visione - potranno essere in futuro affiancati prototipi per la generazione di ologrammi fondati sull'interferenza di fasci di luce (schermo proiettivo e piramide riflettente) (Fig. 3).

La strutturazione digitale dei modelli tridimensionali costituisce il presupposto operativo per lo sviluppo di modalità avanzate di fruizione del patrimonio culturale, basate su ambienti immersivi e sistemi di interazione naturale. In questa prospettiva, il modello informativo non rappresenta più un semplice archivio digitale consultabile passivamente, ma diventa un elemento dinamico capace di attivare esperienze interattive e accessibili a differenti categorie di utenti. Nel contesto del tracciamento delle mani, un significativo avanzamento tecnologico è rappresentato dal Leap Motion Controller, dispositivo progettato per consentire l'interazione con il computer attraverso gesti eseguiti nello spazio. Il sistema, basato su sensori ottici e infrarossi, permette di rilevare e tracciare i movimenti tridimensionali delle mani e delle singole dita, traducendoli in input digitali utilizzabili per il controllo di oggetti virtuali senza contatto fisico con dispositivi hardware.

Questo approccio risulta particolarmente significativo in ambito espositivo, poiché l'interazione gestuale contribuisce a ridurre le barriere tecnologiche e, al tempo stesso, ad aumentare il coinvolgimento percettivo e cognitivo del pubblico. A partire a tali presup-

elements without the use of physical input devices. Unlike Virtual Reality (VR), which may generate a condition of perceptual isolation between the user and the real-world context, the integration of depth and motion sensors allows interaction with digital environments through natural body movements. In doing so, it eliminates the need for conventional devices while fostering a sense of embodiment, understood as the perception of being physically and spatially integrated within the digital system [Kilteni, et al. 2012].

Withing this framework, the sensors act as contactless user interface, allowing visitors to interact with the digital content without physically touching screens or control devices. This configuration creates a shared, interactive and immersive environment dedicated to the consultation and exploration of digital information models, in which both physical and technological barriers are progressively reduced. In particular, the limitations associated with traditional input devices – often characterized by steep learning curves and the requirement for specific technical skills – are overcome, thereby facilitating more immediate and intuitive interaction between users, digital environments and technological infrastructures. Consequently, attention is increasingly focused on aspects such as inclusivity, with the aim of positioning users as active and integral part of the information context, fully immersed in the content provided. At the same time, emphasis is placed on interactivity, understood as the possibility of developing a personal and dynamic relationship with knowledge through the active exploration of the digital world and the autonomous selection of content and modes of engagement.

Integrated workflow for digitization and immersive visualization

The digitization of the Curioni Collection was undertaken within a broader process aimed at documenting, preserving and promoting the technical and scientific heritage

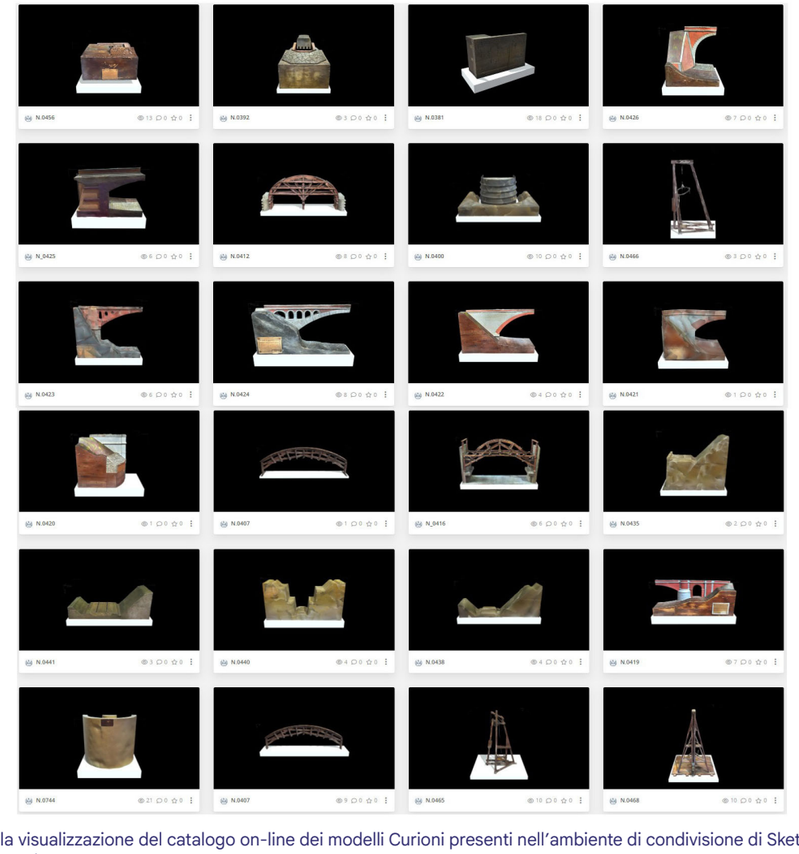


Fig. 2: Estratto della visualizzazione del catalogo on-line dei modelli Curioni presenti nell'ambiente di condivisione di Sketchfab (https://sketchfab.com).

Fig. 2: Extract from the online catalogue of Curioni models available on the Sketchfab sharing platform (https://sketchfab.com).

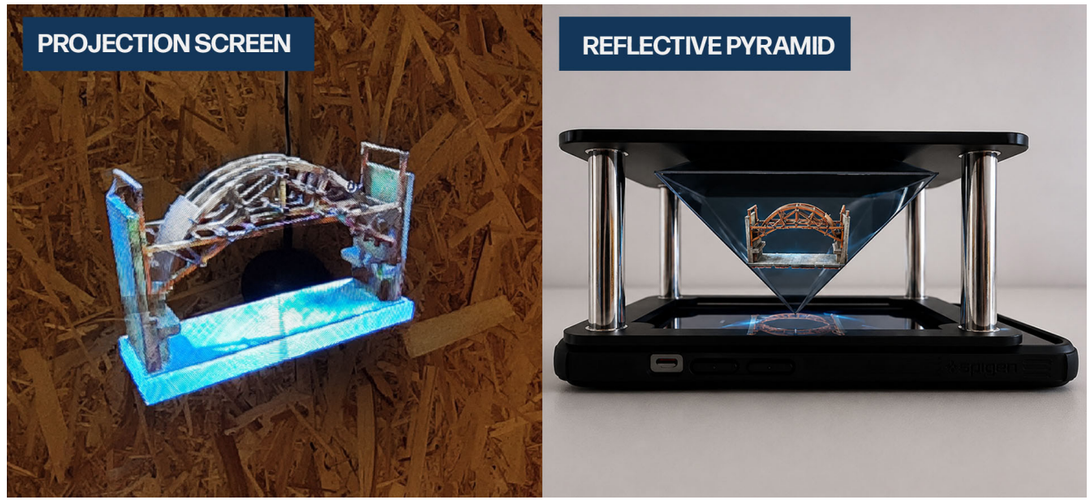


Fig. 3: Sistemi di generazione olografica tramite schermo proiettivo (sinistra) e piramide riflettente (destra).

Fig. 3: Holographic generation systems using a projection screen (left) and a reflective pyramid (right).

posti teorici, è stato sviluppato un prototipo sperimentale finalizzato alla verifica delle potenzialità della *Natural Interaction* applicata alla divulgazione delle collezioni storiche della Collezione Curioni. La sperimentazione è stata realizzata attraverso il software TouchDesigner, ambiente di programmazione visuale impiegato per applicazioni interattive, installazioni immersive e sistemi multimediali in tempo reale (Fig. 4). Il caso studio ha previsto l'importazione, all'interno dell'ambiente interattivo, di una serie di modelli tridimensionali, derivati dalla digitalizzazione dei modelli lignei storici della collezione. Il sistema è stato collegato al sensore di tracciamento delle mani, quale il Leap Motion Controller, consentendo l'acquisire i movimenti dell'utente nello spazio e di tradurli in operazioni di manipolazione digitale del modello.I gesti rilevati dal sensore sono stati associati a specifiche trasformazioni geometriche e funzionali, permettendo la navigazione nell'ambiente digitale direttamente sullo schermo attraverso movimenti naturali delle mani. In questo modo, il modello digitale non è più inteso come una rappresentazione statica, ma assume il ruolo di interfaccia cognitiva e comunicativa, trasformando l'utente da semplice osservatore a soggetto attivo nell'esplorazione del contenuto [Pietroni, et al. 2014].Pur configurandosi come *proof of concept* preliminare, la sperimentazione evidenzia come l'integrazione tra modellazione tridimensionale, sistemi di tracking gestuale e ambienti di Mixed Reality possa contribuire allo sviluppo di nuove modalità di accesso, fruizione e divulgazione del patrimonio tecnico-scientifico. L'interazione *mid-air* favorisce infatti forme di apprendimento esperienziale e immersive, difficilmente ottenibili attraverso le tradizionali modalità espositive.

Dal modello digitale all'oggetto fisico

Il processo di digitalizzazione non si conclude con la produzione del modello virtuale, ma può ritornare alla materia attraverso la fab-

of the Politecnico di Torino. The initiative sought to establish an information ecosystem capable of connecting physical artefacts, digital representations and associated informational content within an interoperable and accessible platform. The acquisition phase conducted through photogrammetry techniques based on mobile devices equipped with LiDAR sensors and using the Polycam Pro application. The resulting 3D models subsequently underwent cleaning and geometric optimization and were finally exported in the interoperable '.obj' and '.fbx' formats, suitable for visualization, information modelling and immersive experiences, as well as 3D printing. Additive manufacturing processes, in fact, reinforce the continuity between graphical representation and knowledge, reintroducing the digital model into the material dimension and reactivating the original educational function of historical artefacts.

Alongside the geometric modelling process, the workflow included the structuring of data in accordance with FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) with the aim of ensuring the traceability, accessibility and long-term preservation of digital content [Wilkinson et al. 2016]. Each model was enriched with descriptive metadata, photographic documentation, archival references and direct links to the historical collections of the Politecnico di Torino. For dissemination purposes, the platform Sketchfab (Fig. 2) was selected as it allows the direct

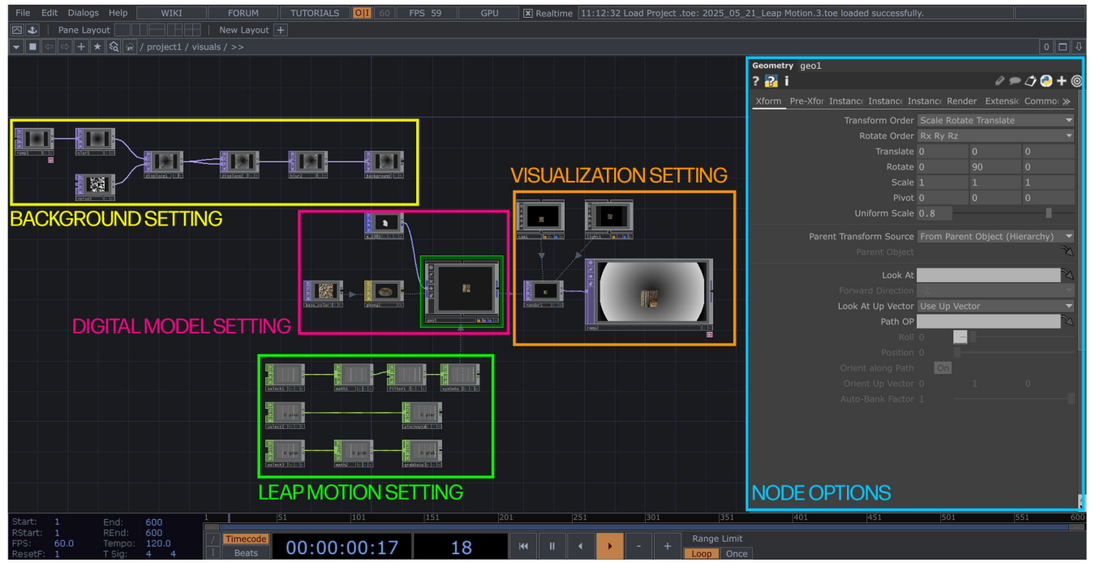


Fig. 4: Architettura logica e flusso di dati nell'ambiente TouchDesigner per la ricezione dei segnali di input, l'elaborazione dei contenuti grafici e la generazione della visualizzazione finale.

Fig. 4: Logical architecture and data flow within the TouchDesigner environment for receiving input signals, processing graphical content and generating the final visualization.

bricazione additiva. In questa prospettiva, la stampa 3D rappresenta un ulteriore strumento per potenziare l'accessibilità del patrimonio culturale, in particolare per utenti con esigenze specifiche che non possono essere pienamente soddisfatte dalle sole esperienze digitali e immersive. Tale tecnologia consente di ricondurre la conoscenza elaborata in ambiente digitale alla dimensione materiale, ristabilendo una continuità tra modello virtuale e oggetto fisico e rafforzando il rapporto tra innovazione tecnologica e inclusione sensoriale. Attraverso la prototipazione additiva, i modelli informativi tridimensionali possono essere tradotti in repliche tattili, manipolabili e scalabili, capaci di supportare processi di apprendimento multisensoriale e di ampliare le possibilità di fruizione per pubblici con differenti abilità percettive e cognitive. In questo senso, la stampa 3D non si configura come semplice dispositivo di output, ma come una componente integrata dell'ecosistema informativo, in grado di attivare nuove modalità di interazione tra patrimonio, ricerca e società. Dal punto di vista metodologico, essa costituisce uno strumento di verifica e validazione del modello digitale: la necessità di produrre geometrie chiuse, coerenti e stampabili richiede infatti operazioni di ottimizzazione che contribuiscono alla definizione di modelli geometricamente consistenti e predisposti alla conservazione digitale.

Nel caso della Collezione Curioni, la fabbricazione additiva assume anche un valore simbolico e culturale. I modelli storici, originariamente concepiti come strumenti pedagogici per la divulgazione della scienza e della tecnica delle costruzioni, vengono reinterpretati attraverso tecnologie contemporanee che ne riattivano la funzione educativa. La replica tridimensionale diventa quindi parte integrante dell'ecosistema informativo dinamico, in cui il patrimo-

visualization of three-dimensional models within standard web browsers while preserving textures, geometric information, and the associated photographic and textual data.

The same models were subsequently used to experiment with holographic visualization techniques [Tang et al. 2023] through the use of projection tools based on rotating LED devices, capable of generating three-dimensional images that appear to 'float' in space. This approach aims to transform the digital model into a volumetric presence that can be directly perceived in real environment, thereby fostering a more immersive and engaging user experience [Xu, et al. 2025]. In this context, holographic visualization represents an integral component of the proposed integrated workflow, as it allows the overcoming of the inherent two-dimensionality of traditional exhibition methods, restoring movement, depth and spatial perception to historical artefacts.

The current system – based on retinal memory and the phenomenon of persistence of vision – may, in future developments, be complemented by experimental prototypes for generating holograms based on the interference of light beams (projection screen and reflective pyramid).

nio materiale, la rappresentazione digitale e l'esperienza interattiva concorrono alla costruzione di nuove forme di conoscenza condivisa. L'accessibilità viene dunque intesa non come mero obiettivo tecnico da raggiungere, ma come strategia di inclusione sociale e culturale. In tale quadro, la rappresentazione grafica, analogica e digitale, si conferma quale medium privilegiato per l'interscambio informativo, la trasmissione della conoscenza e la costruzione di significati condivisi.

Conclusioni

La rappresentazione grafica costituisce il dispositivo attraverso cui il modello fisico viene tradotto in modello digitale, senza perdere il legame con la sua origine materiale, tecnica e didattica. Il Disegno consente di rendere leggibili le forme, esplicite le connessioni e accessibili le informazioni, trasformando la visualizzazione in uno strumento critico di conoscenza, in una interfaccia osmotica tra ricerca specialistica e divulgazione pubblica. Essa permette di costruire percorsi di fruizione differenziati, nei quali l'utente può osservare, interrogare, manipolare e comprendere il bene secondo modalità attive e inclusive. Il workflow proposto dimostra la possibilità di attivare una continuità operativa tra acquisizione digitale, strutturazione informativa, visualizzazione online, sperimentazione olografica, interazione gestuale e fabbricazione additiva. In tale prospettiva, il modello digitale assume il ruolo di elemento centrale di un ecosistema informativo dinamico, nel quale la rappresentazione non è più soltanto strumento descrittivo, ma diventa interfaccia cognitiva, mezzo di interazione e supporto alla costruzione condivisa della conoscenza.

Pur configurandosi come una sperimentazione preliminare, il caso studio mostra il potenziale di metodologie accessibili e replicabili per la valorizzazione di collezioni storiche complesse, spesso caratterizzate da unicità materiale, fragilità conservativa e forte valore didattico (Fig. 5). Gli sviluppi futuri della ricerca riguarderanno, in primo luogo, la definizione dei metadati e dei livelli informativi associati ai modelli, anche attraverso l'adozione di vocabolari controllati, ontologie e protocolli interoperabili in grado di favorire il dialogo tra archivi, piattaforme digitali e sistemi di gestione del patrimonio. Ulteriori sviluppi potranno riguardare il perfezionamento delle interfacce immersive e gestuali, mediante test con differenti categorie di utenti, così da valutare l'efficacia delle modalità di interazione proposte in termini di accessibilità, usabilità, apprendimento e coinvolgimento. Linguaggio di mediazione tra memoria, tecnologia e accessibilità, il Disegno sostiene il patrimonio tecnico-scientifico: non solo conservazione e documentazione, ma nuova interpretazione, condivisione e fruizione didattica e divulgativa.

Crediti

Sebbene il contributo sia il prodotto di una ricerca condivisa, Marco Maurizio Bocconcino e Mariapaola Vozzola hanno curato i paragrafi *Introduzione* e *Conclusioni*; Mariapaola Vozzola e Larisa Semis hanno curato paragrafi *Workflow integrato per la digitalizzazione e la fruizione immersiva* e *Dal modello digitale all'oggetto fisico*. Nel gruppo di ricerca confluiscono competenze e discipline specifiche; per l'area di Disegno responsabilità scientifica di Maurizio Marco Bocconcino e Mariapaola Vozzola, con il coordinamento operativo di Mariapaola Vozzola e Martino Pavignano; nell'ambito della scienza delle costruzioni il professor Mauro Borri Brunetto; per la responsabilità del patrimonio culturale e scientifico dell'Ateneo l'architetta Margherita Bongiovanni; per la tecnica delle costruzioni il professore Paolo Castaldo; sulle competenze geomatiche e della misura i professori Marco Piras e Paolo Dabove; come supporto alle acquisizioni e alle elaborazioni il tecnico DISEG Pierluigi Guarrera, l'ingegnere civile junior Luca Gioberti, l'ingegner Larisa Semis, l'ingegnere Emanuele Ricchiello e gli allievi borsisti Daniele Becchero e Gioele Patti.

Bibliografia

Bocconcino, M. M., Piras, M., Vozzola, M., Pavignano, M., Gioberti, L. (2023b). Giovanni Curioni's Digital Museum (1/2): Comparative Survey Techniques for the Definition of a 3D Data Collection Procedure with Low-Cost Systems. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-M-2-2023, pp. 235-242. 29th CIPA Symposium "Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage: Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future". Firenze, 25-30 giugno 2023. Göttingen: Copernicus Publications. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-235-2023.

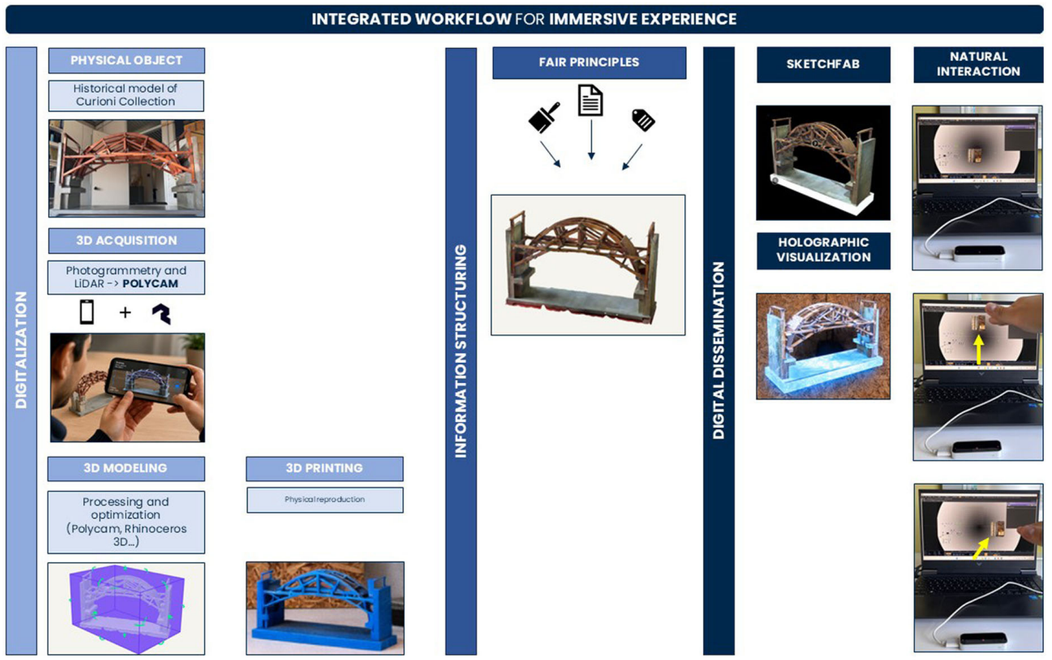


Fig. 5: Schema metodologico del workflow di digitalizzazione e divulgazione dei modelli della Collezione Curioni.

Fig. 5: Methodological outline of the workflow for the digitization and dissemination of the models in the Curioni Collection.

The digital modelling of three-dimensional artefacts provides the operational foundation for the development of advanced modes of interaction with cultural heritage, based on immersive environments and natural interaction systems. From this perspective, the digital model can no longer be regarded merely as a static archive for passive consultation; rather, it becomes a dynamic element capable of facilitating interactive experiences accessible to different categories of users.

In the context of hand tracking technologies, a significant advancement is represented by the Leap Motion Controller, a device specifically designed to support computer interaction through gestures performed in physical space. The system, based on optical and infrared sensors, allows the detection and tracking of the three-dimensional movements of the hands and individual fingers, translating them into digital inputs for the manipulation of virtual objects without the need of physical contact with hardware devices. This approach is particularly significant in the exhibition and dissemination context, as gestural interaction contributes both to reduce technological barriers and to increase the audience's perceptual and cognitive engagement.

Building on these theoretical premises, an experimental prototype was developed to investigate the potential of Natural Interaction when applied to the presentation and exploration of the historical collections of the Curioni Collection. The experiment was implemented through TouchDesigner software, a visual programming environment used for interactive applications, immersive installations and real-time multimedia systems (Fig. 4).

The case study involved the integration into the interactive environment of a series of three-dimensional models generated through the digitization of the collection's historical wooden artefacts. The system was connected to a hand-tracking sensor, such as the Leap Motion Controller, enabling the acquisition of the user's movements in space and their translation into digital manipulation of the model.

The gestures detected by the sensor were associated with predefined geometric and functional transformations, allowing navigation within the digital environment directly on the screen through natural hand movements. In this way, the digital model is no longer seen as a static representation, but takes on the role of a cognitive and communicative interface, transforming the user from a mere observer into an active participant in the exploration of the content [Pietroni, et al. 2014].

Although still at the stage of a preliminary proof of concept, the experimentation demonstrates how the integration of 3D modelling, gesture-tracking systems and mixed reality environments can contribute to the development of innovative mode of accessing, engaging with and disseminating technical and scientific heritage. In particular, mid-air interaction enables experiential and immersive forms of learning that are difficult to achieve through traditional exhibition and communication methods.

From digital model to physical object

The digitization process does not conclude with the creation of a virtual model; rather, it may be translated back into the physical dimension through additive manu-

Bocconcino, M. M., Vozzola, M., Pavignano, M. (2023a). Il Disegno nelle strategie per la valorizzazione e l'accessibilità del patrimonio museale universitario: la collezione Curioni del Politecnico di Torino. In A. Sdegno, V. Riavis (a cura di). *Il Disegno per l'Accessibilità e l'Inclusione. Atti del II Convegno DAI*. Udine, 1-2 dicembre 2023, pp. 200-212. Alghero: PUBLICA.

Bocconcino, M. M., Vozzola, M., Pavignano, M., Gioberti, L. (2023c). Giovanni Curioni's Digital Museum (2/2): Possible Strategies for a Data Management Plan. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-M-2-2023, pp. 243-250. 29th CIPA Symposium "Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage: Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future". Firenze, 25-30 giugno 2023. Göttingen: Copernicus Publications. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-243-2023.

Gigliarelli, E., Calcerano, F., Martinelli, L., Verticchio, E., Cessari, L., Kouri, C., Vecchiotti, A., Pola, A. P., Cursi, S. (2026). Futuri del Patrimonio: Ecosistemi Digitali e Paradigmi Interdisciplinari per la Ricerca del Domani. In *Immaginare e costruire futuri sostenibili. Conferenza annuale del Dipartimento di Scienze Umane e Sociali, Patrimonio Culturale del CNR*. Roma, 21 gennaio 2026. Roma: Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Hewett, T. T., Baecker, R. M., Card, S. K., Carey, T., Gasen, J. B., Mantei, M. M., Perlman, G., Strong, G. W., Verplank, W. (1992). *ACM SIGCHI Curricula for Human-Computer Interaction*. New York: Association for Computing Machinery.

Kilteni, K., Groten, R., Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 21, n. 4, pp. 373-387. Cambridge, MA: MIT Press. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124.

Pietroni, E., Adami, A. (2014). Interacting with Virtual Reconstructions in Museums: The Etruscanning Project. In *Journal on Computing and Cultural Heritage*, vol. 7, n. 2, pp. 1-29. New York: Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/2611375.

Tang, T., Zhang, H. (2023). An Interactive Holographic Multimedia Technology and Its Application in the Preservation and Dissemination of Intangible Cultural Heritage. In *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, vol. 2023, pp. 1-13. https://doi.org/10.1155/2023/6527345.

Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., et al. (2016). The FAIR Guiding Principles for Scientific Data Management and Stewardship. In *Scientific Data*, vol. 3, art. 160018. London: Nature Publishing Group. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18.

Xu, Z., Sun, D., Xia, G., Wang, S. (2025). Exploring Emotional and Cognitive Engagement with Holographic Displays in Museums. In *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, vol. 18, n. 3, art. 39, pp. 1-24. New York: Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3736772.

facturing technologies. From this perspective, 3D printing represents an additional tool for enhancing the accessibility of cultural heritage, particularly for users with specific needs that cannot be fully met by digital and immersive experiences alone. This technology enables knowledge produced within digital environments to be reintroduced into the material realm, thereby re-establishing continuity between the virtual model and the physical object while strengthening the relationship between technological innovation and sensory inclusion.

Through additive prototyping, three-dimensional digital models can be transformed into tactile, manipulable and scalable replicas, capable of supporting multisensory learning processes and broadening opportunities for engagement among audiences with different perceptual and cognitive abilities. In this sense, 3D printing is not merely an output device, but an integrated component of the information ecosystem, capable of enabling new modes of interaction between heritage, research and society. From a methodological perspective, it serves as a tool for verifying and validating the digital model: the necessity of generating closed, coherent and printable geometries requires optimization procedures that contribute to the production of geometrically consistent models suitable for long term digital preservation.

In the specific case of the Curioni Collection, additive manufacturing also takes on symbolic and cultural value. The historical models, originally conceived as educational instruments for the dissemination of science and construction techniques, are reinterpreted through contemporary technologies that reactivate and renew their educational function. The three-dimensional replica thus becomes an integral part of the dynamic information ecosystem, in which the physical heritage, the digital representation and the interactive experience collectively contribute to the construction of new forms of shared knowledge.

Accessibility is therefore understood not merely as a technical objective to be achieved, but as a broader strategy for social and cultural inclusion. Within this framework, graphic representation—both analogue and digital—continues to constitute a privileged medium for the exchange of information, the transmission of knowledge and the construction of shared meanings.

Conclusions

Graphic representation constitutes the medium through which the physical artefacts is translated into a digital model, while preserving its material, technical and educational origins. Through drawing, forms become legible, connections are made explicit and information is rendered accessible, transforming visualization into a critical tool for knowledge production and into an interface capable of connecting specialist research with public dissemination. In this sense, representation enables the creation of varied visitor experiences, in which users are encouraged not only to observe but also to explore, interact with, and interpret the artefact through active and inclusive experiences.

The proposed workflow demonstrates the possibility of activating operational continuity between digital acquisition, information structuring, online visualization, holographic experimentation, gestural interaction, and additive manufacturing. From this perspective, the digital model assumes the role of a central element within a dynamic information ecosystem, in which representation is no longer limited to a descriptive function, but instead becomes a cognitive interface, a means of interaction and support for the shared construction of knowledge. Although still configured as a preliminary experiment, the case study highlights the potential of accessible and replicable methodologies for the valorization of complex historical collections, often characterized by material uniqueness, conservation fragility, and strong educational value. Future developments of the research will primarily focus on the definition of metadata structures and information layers associated with the digital models, including through the adoption of controlled vocabularies, ontologies, and interoperable protocols capable of fostering dialogue between archives, digital platforms, and heritage management systems. Further research direction may also concern the refinement of immersive and gesture-based interfaces through testing with different user categories, thus evaluating the effectiveness of the proposed interaction methods in terms of accessibility, usability, learning, and engagement. Acting as a language capable of mediating between memory, technology, and accessibility, the discipline of Drawing supports the enhancement of technical-scientific heritage: not only conservation and documentation, but also new interpretation, sharing, and educational and public engagement.

Credits

Although the contribution is the product of shared research, Marco Maurizio Bocconcino and Mariapaola Vozzola edited the *Introduction* and *Conclusions* sections; Mariapaola Vozzola and Larisa Semis edited the *Integrated workflow for digitization and immersive visualization* and *From digital model to physical object*.

The research group brings together specific expertise and disciplines; for the Drawing area, scientific responsibility is provided by Maurizio Marco Bocconcino and Mariapaola Vozzola, with operational coordination by Mariapaola Vozzola and Martino Pavignano; in the field of construction science, Professor Mauro Borri Brunetto; for responsibility for the University's cultural and scientific heritage, architect Margherita Bongiovanni; for construction technology, Professor Paolo Castaldo; Professors Marco Piras and Paolo Dabove on geomatic and measurement skills; in support of acquisitions and processing, DISEG technician Pierluigi Guarrera, junior civil engineer Luca Gioberti, engineer Larisa Semis, engineer Emanuele Ricchiello, and student fellows Daniele Becchero and Gioele Patti.

Autori

Ida Zingariello[1]
Romano Fistola[2]
Rosa Anna La Rocca[3]
Filippo Fabbri[4]

Email

ida.zingariello@unina.it
romano.fistola@unina.it
larocca@unina.it
filippo.fabbri@universite-paris-saclay.fr

[1] Università degli Studi di Napoli Federico II, DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
[2] Università degli Studi di Napoli Federico II, DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
[3] Università degli Studi di Napoli Federico II, DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
[4] Université Paris-Saclay, Paris, France

Augmented Soundscape: nuove tecnologie per il *Cultural Heritage*

Augmented Soundscape: New Technologies for Cultural Heritage

Keywords

AUGMENTED REALITY
SOUNDSCAPE
CULTURAL HERITAGE
SOFT REGENERATION
PLACEMAKING

Abstract

Il contributo indaga il soundscape in realtà aumentata quale approccio innovativo per la riqualificazione soft e sostenibile del *Cultural Heritage* nonché strumento di *placemaking* in chiave digitale. Attraverso i casi ARS e RESONANCE il paper intende sistematizzare le sperimentazioni condotte e definire una buona prassi progettuale replicabile, fondata sull'uso di applicazioni audio AR a elevata immersività e bassa invasività fisica.

This paper explores the augmented reality soundscape as an innovative approach to the soft and sustainable regeneration of Cultural Heritage, as well as a tool for digital placemaking. Through the ARS and RESONANCE case studies, the paper aims to systematize the experiments carried out and define replicable best practice in design, based on the use of highly immersive AR audio applications that are minimally physically invasive.

Introduzione: l'uso delle tecnologie AR nel Cultural Heritage

Negli ultimi anni le tecnologie di *Augmented Reality* (AR), e più in generale di *eXtended Reality* (XR), hanno assunto un ruolo sempre più rilevante nell'ambito del *Cultural Heritage*, aprendo nuove prospettive per la valorizzazione e la fruizione del patrimonio culturale.

Tale evoluzione si inserisce all'interno di un più ampio cambiamento di paradigma negli *Heritage Studies*, che negli ultimi decenni hanno progressivamente ampliato il concetto di patrimonio culturale oltre la sua dimensione materiale, portando alla definizione dell'*Intangible Cultural Heritage*[1] (ICH), concetto formalizzato a livello internazionale dalla "Convenzione UNESCO per la Salvaguardia del Patrimonio Culturale Immateriale" del 2003. In questa prospettiva, il patrimonio non viene più interpretato esclusivamente come elemento fisico da conservare, ma come un sistema dinamico di processi culturali in continua trasformazione.

In questo scenario, le tecnologie AR si sono consolidate come dispositivi strategici per l'interpretazione e la valorizzazione delle componenti tangibili e intangibili del patrimonio culturale. Attraverso la sovrapposizione di contenuti digitali al contesto fisico, tali tecnologie consentono di rendere accessibili informazioni, narrazioni e ricostruzioni altrimenti non percepibili.

Recenti studi [Partarakis, 2026] evidenziano come le applicazioni immersive siano in grado di incrementare il livello di *visitor engagement*, promuovendo forme di conoscenza attiva da parte dei fruitori. L'interazione diretta con contenuti digitali contestualizzati consente infatti ai visitatori di assumere un ruolo maggiormente proattivo nel processo di costruzione della conoscenza, trasformando l'esperienza di fruizione da attività prevalentemente passiva a pratica interpretativa e partecipativa.

Un ulteriore elemento di interesse riguarda il contributo dall'AR alle strategie di valorizzazione sostenibile del patrimonio culturale. A differenza di interventi fisici permanenti, le tecnologie immersive consentono di attivare processi di valorizzazione e riqualificazione "soft", che si attuano senza modificare materialmente il contesto esistente. Le ricostruzioni digitali e i contenuti aumentati rappresentano infatti soluzioni poco invasive e replicabili, in grado di coniugare accessibilità e valorizzazione, contribuendo a una gestione più sostenibile del patrimonio culturale.

La convergenza tra *engagement* e sostenibilità si riflette nel concetto di *Augmented Soundscape*; attraverso la restituzione di memorie sonore e audio esperienziali altrimenti non percepibili, il paesaggio sonoro in realtà aumentata diventa dispositivo spaziale in grado di recuperare e reinterpretare la dimensione immateriale dei luoghi e dare nuovo significato al patrimonio culturale.

L' Augmented Soundscape come dispositivo per uno spazio aumentato

L'assunto teorico che orienta la ricerca riconosce al paesaggio sonoro un ruolo centrale nella costruzione della percezione dello spazio urbano e architettonico. Il *soundscape*, inteso come ambiente acustico percepito e interpretato dagli utenti in un determinato contesto, può divenire dispositivo capace di incidere sulla riconoscibilità di uno spazio e sulla sua capacità attrattiva.

Il concetto di *soundscape* considera il paesaggio sonoro come componente fondamentale dell'identità dei luoghi e dell'esperienza spaziale; suoni, voci, attività quotidiane e segnali acustici costituiscono infatti, una dimensione spesso trascurata del patrimonio culturale, ma essenziale per la costruzione della memoria collettiva e del senso di appartenenza, oltre che per la conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale immateriale.

In questo senso, la progettazione di uno specifico *soundscape*, all'interno di un contesto di riferimento, consente di attribuire allo spazio una nuova connotazione morfologica senza operare materialmente su di esso.

L'integrazione tra realtà aumentata e audio spazializzato interviene su tale potenzialità: attraverso la sovrapposizione al contesto reale di contenuti sonori è possibile impiegare i suoni per "aumentare" la percezione dello spazio fisico. Le tecnologie sonore immersive si configurano così come strumenti di mediazione tra reale e digitale in grado di restituire uno spazio aumentato inteso come ambiente ibrido in cui la dimensione fisica e quella digitale coesistono e si influenzano reciprocamente [Fistola et al., 2024].

Tale prospettiva si inserisce nel quadro del *placemaking*, inteso come processo [Ellery, 2021] mediante il quale uno spazio fisico acquisisce la dimensione di luogo nel momento in cui viene caricato di significati sociali e culturali condivisi dalla comunità. In questa chiave, l'*Augmented Soundscape* può essere interpretato come uno strumento di *placemaking* digitale [Basaraba, 2023] in grado, attraverso tecnologie immersive e audio contestualizzati, di attivare processi di ri-significazione dei luoghi, evocare memorie collettive, rafforzare il legame tra utenti e contesto spaziale e contribuire alla riscoperta e valorizzazione dell'identità locale dei luoghi.

L'esperienza sonora immersiva contribuisce ad attivare quel coinvolgimento emotivo necessario a percepire uno spazio come luogo significativo e definisce nuove forme di *storytelling* territoriale, attraverso le quali il patrimonio tangibile e intangibile viene reso accessibile mediante esperienze narrative contestualizzate.

Questo processo rigenerativo, attivato attraverso un'azione progettuale fondata su strumenti immateriali in grado di generare esperienze immersive, inclusive e non invasive, si inserisce in continuità con precedenti percorsi di ricerca sviluppati nell'ambito disciplinare di riferimento [La Rocca et al., 2025]. Tale approccio è stato oggetto di sperimentazione e successiva sistematizzazione metodologica a seguito di due *workshop* sviluppati nel contesto delle attività di ricerca del PRIN 2022 INSITE[2], in collaborazione con l'Université Paris-Saclay e con il coinvolgimento degli studenti dell'Institut Universitaire de Technologie de Cachan. Le attività svolte, i risultati ottenuti e il *workflow* metodologico che è stato formalizzato sono illustrati nel paragrafo successivo.

Il workflow metodologico: i workshop ARS e RESONANCE

La prima sperimentazione, condotta attraverso il *workshop* ARS (*Augmented Reality Soundscape*), è stata realizzata a Cachan

Introduction: The Use of AR Technologies in Cultural Heritage

In recent years, Augmented Reality (AR) technologies – and, more generally, eXtended Reality (XR) – have taken on an increasingly significant role in the field of Cultural Heritage, opening up new perspectives for the promotion and enjoyment.

This development is part of a broader paradigm shift in Heritage Studies, which over recent decades have progressively expanded the concept of Cultural Heritage beyond its material dimension, leading to the definition of Intangible Cultural Heritage[1] (ICH) – a concept formalised at international level by the 2003 'UNESCO Convention for the Safeguarding of the Intangible Cultural Heritage' . From this perspective, heritage is no longer interpreted exclusively as a physical element to be preserved, but as a dynamic system of cultural processes undergoing constant transformation.

In this context, AR technologies have established themselves as strategic tools for the interpretation and enhancement of the tangible and intangible components of Cultural Heritage. By overlaying digital content onto the physical environment, these technologies make it possible to provide access to information, narratives and reconstructions that would otherwise be imperceptible.

Recent studies [Partarakis, 2026] highlight how immersive applications are capable of increasing visitor engagement, promoting forms of active learning by users. Direct interaction with contextualised digital content enables visitors to take a more proactive role in the process of knowledge construction, transforming the visitor experience from a predominantly passive activity into an interpretative and participatory practice. A further point of interest concerns the contribution of AR to strategies for the sustainable enhancement of Cultural Heritage. Unlike permanent physical interventions, immersive technologies enable 'soft' enhancement and regeneration processes to be implemented without physically altering the existing context. Digital reconstructions and augmented content are, in fact, minimally invasive and replicable solutions capable of combining accessibility with enhancement, thereby contributing to a more sustainable management of Cultural Heritage.

The convergence between engagement and sustainability is reflected in the concept of the Augmented Soundscape; by recreating sound memories and experiential audio that would otherwise be imperceptible, the augmented reality soundscape becomes a spatial tool capable of recovering and reinterpreting the intangible dimension of places and giving new meaning to Cultural Heritage.

The Augmented Soundscape as a tool for an augmented space

The theoretical assumption that guides the research recognizes that the soundscape plays a central role in the construction of the perception of urban and architectural space. The soundscape, understood as the acoustic environment perceived and interpreted by users within a specific context, can become a tool capable of influencing the recognizability of a space and its appeal.

The soundscape is a fundamental component of a place's identity and of the spatial experience, sounds, voices, everyday activities and acoustic signals constitute, in fact, an often-overlooked dimension of Cultural Heritage, yet one that is essential for the construction of collective memory and a sense of belonging, as well as for the preservation and promotion of intangible Cultural Heritage.

In this sense, the design of a specific soundscape, within a given context, makes it possible to give the space a new morphological character without physically altering it.

The integration of augmented reality and spatialized audio taps into this potential: by superimposing sound content onto the real context, it is possible to use sounds to 'augment' the perception of physical space. Immersive sound technologies thus function as mediating tools between the real and the digital, capable of creating an 'augmented' space understood as a hybrid digital space in which the physical and digital dimensions coexist and influence one another [Fistola et al., 2024].

This perspective forms part of the concept of placemaking, understood as a process [Ellery, 2021] through which a physical space acquires the quality of a 'place' when it is filled with social and cultural meanings shared by the community. In this sense, the Augmented Soundscape can be interpreted

lungo la *promenade* del fiume Bièvre. L'obiettivo è stato verificare come un'applicazione audio AR potesse contribuire alla riqualificazione percettiva di uno spazio pubblico oggetto di recenti interventi fisici, rafforzandone l'identità attraverso la ricostruzione sonora delle attività storiche connesse al fiume.

Dopo una prima fase di lettura del contesto urbano, il *workshop* ha previsto la progettazione di un'applicazione audio in AR di tipo *marker-based*, sviluppata in ambiente Unity con AR Foundation, compatibile con dispositivi Android dotati di ARCore: l'inquadramento di un'immagine appositamente progettata come *marker* attiva contenuti audio spazializzati associati a specifici elementi urbani. L'utente, muovendosi liberamente nello spazio, sperimenta una variazione dinamica dell'intensità sonora: avvicinandosi all'elemento selezionato, il suono impostato in *loop* (voci narranti, suoni ambientali, tracce musicali) aumenta progressivamente, allontanandosi, si attenua fino a scomparire. Tale meccanismo rafforza la percezione tridimensionale e restituisce al fruitore un ruolo attivo nell'esplorazione. L'app non si limita a descrivere lo spazio, ma lo rende narrativamente attraversabile trasformando la fruizione in un'esperienza immersiva e dinamica (Fig. 1).



Fig. 1: Contenuti audio associati alla promenade del fiume Bièvre.

Fig. 1: Audio contents associated with the Bièvre river promenade.

Un'ulteriore sperimentazione è stata condotta attraverso il progetto RESONANCE per la Chapelle Saint-Louis de la Pitié-Salpêtrière, parte dell'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière e progettata da Libéral Bruant. In questo contesto monumentale, l'applicazione audio AR progettata è stata concepita come strumento di valorizzazione narrativa interna, articolata in *hotspot* tematici associati ai bracci della pianta radiale (Figg. 2-3). Inquadrando con lo *smartphone* i *marker* presenti nei vari ambienti della cappella, è possibile attivare contenuti sonori spazializzati (narratori invisibili,

[1] ich.unesco.org
[2] www.insiteprin2022.org

as a tool for digital placemaking [Basaraba, 2023] capable, through immersive technologies and contextualised audio, of triggering processes of re-signification of places, evocative of collective memories, reinforcing the bond between users and the spatial context, and contributing to the rediscovery and enhancement of the local identity of places.

The immersive sound experience helps to trigger the emotional engagement necessary to perceive a space as a place of significance and defines new forms of territorial storytelling, through which tangible and intangible heritage is made accessible via contextualised narrative experiences.

This regenerative process, triggered by a design approach based on intangible tools capable of generating immersive, inclusive and non-invasive experiences, builds on previous research undertaken within the relevant disciplinary field [La Rocca et al., 2025]. This approach was tested and subsequently systematised methodologically following two workshops organised as part of the PRIN 2022 INSITE[2] research activities, in collaboration with the Université Paris-Saclay and with the involvement of students from the Institut Universitaire de Technologie de Cachan. The activities carried out, the results obtained and the methodological workflow that was formalised are outlined in the following section.

The methodological workflow: the ARS and RESONANCE workshops

The first testing, carried out as part of the ARS (Augmented Reality Soundscape) workshop, took place in Cachan along the Bièvre river promenade. The aim was to assess how an AR audio application could contribute to the perceptual regeneration of a public space that had recently undergone physical redevelopment, strengthening its identity through the sonic reconstruction of historical activities linked to the river.

Following an initial phase of reading the urban context, the workshop involved the design of a marker-based AR audio appli-

[1] ich.unesco.org
[2] www.insiteprin2022.org

ricostruzioni ambientali storiche, musica emozionale) che restituiscono la complessità architettonica e funzionale del complesso.

Il *workshop* RESONANCE si inserisce nel solco del precedente progetto VOX HORTUS [Fistola & Zingariello, 2024], sviluppato con l'obiettivo di dare voce alle opere d'arte del celebre artista Mimmo Paladino all'interno dello spazio urbano dell'Hortus Conclusus di Benevento. In continuità con tale esperienza, anche nella Chapelle

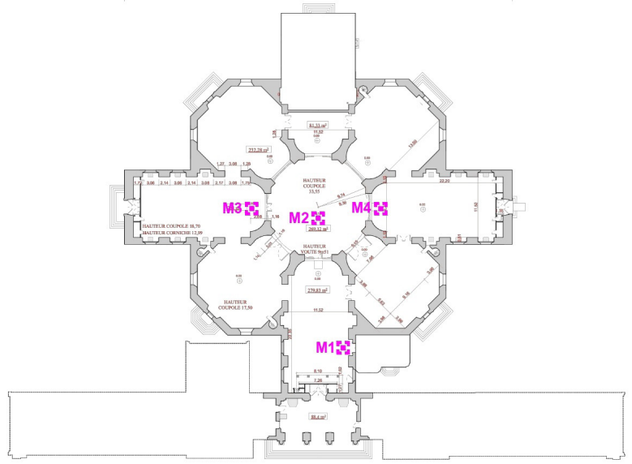


Fig. 2: Pianta della Chapelle Saint-Louis de la Pitié-Salpêtrière con posizionamento dei marker.

Fig. 2: Plan of the Chapelle Saint-Louis de la Pitié-Salpêtrière showing the location of the markers.

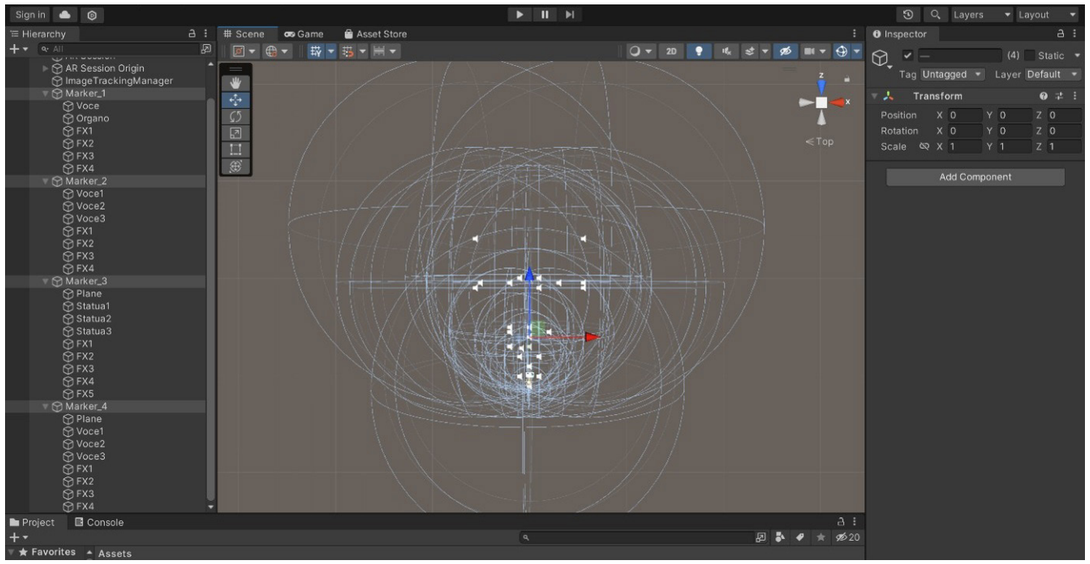


Fig. 3: Ambiente di sviluppo Unity con la struttura gerarchica dei marker e delle relative sorgenti audio spazializzate.

Fig. 3: Unity development environment showing the hierarchical structure of the markers and their corresponding spatialised audio sources.

cation, developed in the Unity environment using AR Foundation, compatible with Android devices equipped with ARCore: framing a specially designed image as a marker triggers spatialised audio content associated with specific urban elements. As the user moves freely through the space, they experience a dynamic variation in sound intensity: as they approach the selected element, the looped sound (narration, ambient sounds, musical tracks) gradually increases; as they move away, it fades until it disappears. This process reinforces the three-dimensional perception and gives the user an active role in the exploration. The app does not merely describe the space, but makes it narratively traversable, transforming the experience into an immersive and dynamic one (Fig. 1).

A further experiment was carried out as part of the RESONANCE project for the Chapelle Saint-Louis de la Pitié-Salpêtrière, which forms part of the Hôpital de la Pitié-Salpêtrière and was designed by Libéral Bruant. In this monumental environment, the AR audio application was conceived as a tool for enhancing the narrative experience within the space, organised into thematic hotspots associated with the arms of the radial layout (Figs. 2–3). By pointing a smartphone at the markers located in the various areas of the chapel, users can activate spatialised audio content (invisible narrators, historical

Saint-Louis de la Pitié-Salpêtrière, il processo attivato mediante l'approccio tecnologico adottato non altera il contesto fisico del patrimonio, ma ne amplifica la leggibilità simbolica e spaziale.

A partire da quanto sperimentato attraverso i due *workshop* e le precedenti ricerche, è stato possibile delineare un *workflow* metodologico articolato in tre macro-fasi tra loro interconnesse, ciascuna riferita a una specifica dimensione spaziale: reale, virtuale e aumentata.

Fase 1: Lettura del contesto

La prima fase del *workflow* si svolge nello spazio reale e consiste nell'analisi dell'ambiente urbano/architettonico fisico. L'obiettivo è raccogliere tutte le informazioni necessarie per replicare spazialmente e percettivamente lo spazio in ambiente virtuale e per pianificare il posizionamento dei contenuti aumentati. La fase 1 a sua volta si articola in quattro momenti principali.

- Identificare le entità urbane e architettoniche rilevanti: individuare gli oggetti e gli elementi urbani e architettonici significativi che saranno coinvolti nell'esperienza aumentata. Questa selezione prevede un'analisi storica e percettiva del luogo.
- Posizionare il *marker* (punto 0,0,0): decidere dove collocare il *marker* fisico che fungerà da origine del sistema di riferimento spaziale. Il punto 0,0,0 è il fulcro attorno al quale si organizza l'intera esperienza AR.
- Misurare le distanze dal *marker*: rilevare con precisione le distanze di ciascuna entità identificata rispetto al *marker*. Questi dati metrici saranno fondamentali per la costruzione accurata del *set* digitale nella fase successiva.
- Composizione del contenuto audio: parallelamente alla raccolta dei dati spaziali, si procede alla composizione dei contenuti audio che verranno associati agli oggetti urbani e architettonici nell'esperienza aumentata finale.

Fase 2: Progettazione dell'applicazione AR *marker-based*

La seconda fase si svolge nello spazio virtuale e riguarda lo sviluppo tecnico dell'applicazione AR. Utilizzando i dati raccolti durante l'ispezione del sito, viene costruito un ambiente digitale che replica lo spazio fisico, integrando le tecnologie necessarie al tracciamento e alla visualizzazione aumentata. La fase 2 viene realizzata mediante strumenti di sviluppo per la realtà aumentata che consentono la progettazione e l'implementazione dell'applicazione in formato .apk; in particolare, sono stati utilizzati i seguenti componenti.

- Unity: è il motore di sviluppo utilizzato per costruire il set digitale che replica lo spazio fisico rilevato durante l'ispezione del sito. Permette di posizionare con precisione i contenuti audio associati agli oggetti reali, rispettando le coordinate misurate sul campo.
- AR *foundation*: è un *framework* sviluppato per Unity che consente di realizzare applicazioni di realtà aumentata mediante *image tracking*. Consente all'applicazione di riconoscere il *marker* fisico posizionato nello spazio reale e di ancorare correttamente i contenuti digitali in audio all'ambiente circostante.
- ARCore: è la piattaforma Google per la realtà aumentata su dispositivi Android. Gestisce il tracciamento del movimento e la comprensione dell'ambiente garantendo un'esperienza AR fluida e stabile durante la fruizione nello spazio urbano/architettonico.
- ARsoundscape.apk: è l'applicazione finale che integra tutti i componenti sviluppati nelle fasi precedenti. Contiene i contenuti audio georeferenziati e le logiche di attivazione AR. Può essere installata su qualsiasi dispositivo Android compatibile con ARCore.

environmental reconstructions, evocative music) that conveys the architectural and functional complexity of the complex.

The RESONANCE workshop follows on from the previous VOX HORTUS project [Fistola & Zingariello, 2024], which was developed with the aim of giving a voice to the artworks of the famous artist Mimmo Paladino within the urban space of the Hortus Conclusus in Benevento. Building on this experience, at the Chapelle Saint-Louis de la Pitié-Salpêtrière too, the process initiated through the technological approach adopted does not alter the physical context of the heritage site, but amplifies its symbolic and spatial legibility. Building on the experiences acquired through the two workshops and previous researchers, it has been possible to outline a methodological workflow structured into three interconnected macro-phases, each relating to a specific spatial dimension: real, virtual and augmented.

Phase 1: Context analysis

The first phase of the workflow takes place in the real world and consists of analysing the physical urban/architectural environment. The aim is to collect all the information needed to spatially and perceptually replicate the space in a virtual environment and to plan the positioning of the augmented content. Phase 1 is, in itself, divided into four main steps.

- Identifying relevant urban and architectural entities: identifying significant urban and architectural objects and elements that will be involved in the augmented experience. This selection involves a historical and perceptual analysis of the site.
- Position the marker (point 0,0,0): decide where to place the physical marker that will serve as the origin of the spatial reference system. Point 0,0,0 is the focal point around which the entire AR experience is organised.
- Measuring distances from the marker: precisely measuring the distances of each identified entity relative to the marker. These metric data will be essential for the accurate construction of the digital set in the next phase.
- Composition of audio content: in parallel with the collection of spatial data, work proceeds on the composition of the audio content that will be associated with the urban and architectural objects in the final augmented experience.

Fase 3: Uso aumentato dello spazio

La terza e ultima fase porta l'esperienza nello spazio aumentato, dove il digitale e il fisico coesistono. Gli utenti possono fruire l'esperienza di un audio AR direttamente nell'ambiente urbano e architettonico, utilizzando dispositivi comuni di largo consumo.

Il risultato di tale *workflow* rappresenta una procedura operativa replicabile in contesti differenti, capace di preservare e valorizzare il *Cultural Heritage* senza ricorrere a interventi fisici permanenti e, al contempo, di restituire ai luoghi una nuova leggibilità simbolica e spaziale.

Conclusioni

I risultati delle sperimentazioni condotte consentono di riconoscere nell'*Augmented Soundscape* un ambito di ricerca significativo per l'evoluzione delle pratiche di valorizzazione del *Cultural Heritage*, in particolare per quanto riguarda la restituzione e la comunicazione delle componenti immateriali del patrimonio.

In tale prospettiva, l'*Augmented Soundscape* può essere interpretato come uno strumento operativo riconducibile alle più recenti pratiche di *placemaking* digitale, nella misura in cui interviene sui processi di attribuzione di significato che trasformano uno spazio in un luogo culturalmente riconoscibile.

Un elemento di particolare interesse riguarda inoltre la natura accessibile delle tecnologie impiegate. L'utilizzo di dispositivi mobili ampiamente diffusi consente di integrare l'esperienza aumentata nelle pratiche quotidiane di attraversamento e scoperta dei contesti culturali, eliminando le barriere tecnologiche spesso associate alla fruizione di applicazioni AR. L'esperienza aumentata è progettata infatti per essere accessibile a tutti: non sono necessari visori o *hardware* specializzati; uno *smartphone* o un *tablet* di uso quotidiano è sufficiente per accedere all'applicazione ARsoundscape.apk e vivere pienamente l'esperienza AR nello spazio urbano e architettonico.

Il principio di accessibilità, che ha guidato l'intera sperimentazione, amplia il potenziale applicativo dell'approccio proposto e ne rafforza la sostenibilità operativa in contesti differenti.

In questa direzione, ulteriori sviluppi della ricerca potranno contribuire, attraverso nuove sperimentazioni, alla definizione di strumenti valutativi in grado di misurare l'impatto dell'esperienza proposta su cittadini e turisti, analizzandone gli effetti in termini di *visitor engagement* e approfondendo il ruolo delle tecnologie immersive nei processi contemporanei di *placemaking* e di valorizzazione sostenibile del patrimonio culturale.

Phase 2: Design of the marker-based AR application

The second phase takes place in the virtual space and involves the technical development of the AR application. Using the data collected during the site inspection, a digital environment is constructed that replicates the physical space, incorporating the technologies required for tracking and augmented visualisation. Phase 2 is carried out using augmented reality development tools that enable the design and implementation of the application in .apk form; specifically, the following components were used.

- Unity: this is the development engine used to build the digital set that replicates the physical space surveyed during the site inspection. It allows the audio content associated with real-world objects to be positioned precisely, in line with the coordinates measured on site.
- AR Foundation: this is a framework developed for Unity that enables the creation of augmented reality applications using image tracking. It enables the application to recognise the physical marker positioned in the real world and to correctly anchor the digital audio content to the surrounding environment.
- ARCore: is Google's platform for augmented reality on Android devices. It handles motion tracking and environmental understanding, ensuring a fluid and stable AR experience when used in urban/architectural spaces.
- ARsoundscape.apk: this is the final application that integrates all the components developed in the previous steps. It contains the georeferenced audio content and the AR activation logic. It can be installed on any ARCore-compatible Android device.

Phase 3: Augmented use of space

The third and final phase takes the experience into an augmented space, where the digital and the physical coexist. Users can enjoy an AR audio experience directly with-

Bibliografia

Basaraba N. (2023). The emergence of creative and digital place-making: A scoping review across disciplines. In *New Media & Society*, vol. 25, n. 6, pp. 1470-1497. London: SAGE Publications.

Ellery P. J., Ellery J., & Borkowsky M. (2021). Toward a theoretical understanding of placemaking. In *International Journal of Community Well-Being*, vol. 4, n. 1, pp. 55-76. Cham: Springer.

Fistola R., Fabbri F., & Zingariello I. (2024). La rifunzionalizzazione "aumentata" della smart city: Spazi e contenuti ibridi digitali. In Ranzato M., Garau C. (a cura di). *Innovazione, tecnologie e modelli di configurazione spaziale: Atti della XXV Conferenza Nazionale SIU "Transizioni, giustizia spaziale e progetto di territorio"*. Cagliari, 15-16 giugno 2023, vol. 1, pp. 86-93. Roma-Milano: Planum Publisher & Società Italiana degli Urbanisti.

Fistola R., & Zingariello I. (2024). Beyond the smart city: The urban digital twin for the augmented city: The Vox Hortus project. In Marucci A., Zullo F., Fiorini L., Saganeiti L. (a cura di). *Innovation in urban and regional planning. INPUT 2023*. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 467, pp. 204-210. Cham: Springer.

La Rocca R. A., Fistola R., Zingariello I., & Fabbri F. (2025). Urban regeneration using the sound: The project Augmented Reality Soundscape (ARS). In Borgogno-Mondino E., Zamperlin P. (a cura di). *Geomatics for green and digital transition. ASITA 2024*. Communications in Computer and Information Science, vol. 2463, pp. 365-376. Cham: Springer.

Partarakis N., Katsantonis M. N., & Zidianakis E. (2026). A systematic review of extended reality (XR) applications in cultural heritage. In *Heritage*, vol. 9, n. 6, p. 215. Basel: MDPI.

in the urban and architectural environment, using standard consumer devices.

The result of this workflow is an operational procedure that can be replicated in different contexts, capable of preserving and enhancing cultural heritage without requiring permanent physical interventions, whilst at the same time restoring a new symbolic and spatial significance to these places.

Conclusions

The results of the experiments carried out suggest that the Augmented Soundscape represents a significant area of research for the evolution of practices aimed at promoting Cultural Heritage, particularly with regard to the representation and communication of the intangible components of that heritage.

From this perspective, the Augmented Soundscape can be interpreted as an operational tool linked to the latest practices in digital placemaking, given that it influences the processes of meaning-making that transform a space into a culturally recognisable place.

Another aspect of particular interest is the accessibility of the technologies used. The use of widely available mobile devices makes it possible to integrate the augmented experience into everyday practices of exploring and discovering cultural contexts, removing the technological barriers often associated with using AR applications. The augmented experience is, in fact, designed to be accessible to everyone: no headsets or specialised hardware are required; an everyday smartphone or tablet is sufficient to access the ARsoundscape.apk application and fully experience the AR in urban and architectural spaces.

The principle of accessibility, which has guided the entire experiment, broadens the potential applications of the proposed approach and reinforces its operational sustainability in different contexts.

In this regard, further research developments may contribute, through new experiments, to the definition of assessment tools capable of measuring the impact of the proposed experience on citizens and tourists, analysing its effects in terms of visitor engagement and exploring the role of immersive technologies in contemporary processes of placemaking and the sustainable enhancement of Cultural Heritage.