

COLLANA
3D MODELING & BIM

PROLIFERAZIONI

A CURA DI TOMMASO EMPLER,
ADRIANA CALDARONE, ALEXANDRA FUSINETTI

PUBLICA

ISBN 9788899586591

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 2025 - Proliferazioni

© PUBLICA, Alghero, 2025

ISBN 9788899586591

Pubblicazione Ottobre 2025

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: Pasquale Micelli, Silvia Ridolfi
Crediti immagine di copertina: Rinaldo D'Alessandro

PUBLICA

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

PROLIFERAZIONI

Il volume raccoglie i contributi, dei relatori e degli studiosi, pervenuti in occasione del *Workshop 3DModeling&BIM. Proliferazioni*, che si è svolto a Roma in data 17-18 aprile 2025.

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. Proliferations*, which took place in Rome on April 17th-18th 2025.

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

Summary

PRESENTAZIONE 16

Introduction

Tommaso Empler

IL MODELLO 3D TRA DOCUMENTAZIONE E VALORIZZAZIONE CULTURALE 22

3D Model Between Documentation
and Cultural Valorization

Alexandra Fusinetti

“L’ASCOLTO DEL TEMPO”: LA MODELLAZIONE HBIM PER LA CONSERVAZIONE E LA VALORIZZAZIONE DEL PATRIMONIO STORICO 28

“Listening to the time”: HBIM modelling for the conservation
and enhancement of historical heritage

Simona Alauria, Laura Baratin

LA COMPUTER GRAFICA PER LA RAPPRESENTAZIONE 3D DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO 46

Computer Graphics for the 3D Representation
of Architectural Heritage

Gianluca Barile

IL BIM NELL’EDILIZIA SANITARIA: RIQUALIFICAZIONE FUNZIONALE E STRUTTURALE DEL CORPO F DEL P.O. ONCOLOGICO A. BUSINCO DI CAGLIARI 56

BIM in healthcare construction: functional and structural
redevelopment of building F at the A. Businco Oncology
Hospital in Cagliari

Massimiliano Benga, Maria Antonia Russo

AI STYLE TRANSFER. UTILIZZO E CONTROLLO DI WORKFLOW NODALI PER L'ESPRESSIVITÀ DEL DISEGNO ARCHITETTONICO	66
---	-----------

AI Style transfer. Use and Control of Node-Based Workflows
for the Expressiveness of Architectural Drawing

Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Andrea Miglioni, Chiara Mommi

MUSE. VERSO UN DIGITAL TWIN PER LA FRUIZIONE MUSEALE	76
---	-----------

MUSE. Towards a Digital Twin for Museum Enjoyment

*Flavia Camagni, Andrea Casale, Bruno Fanini, Elena Ippoliti,
Sofia Menconero, Noemi Tomasella*

FISICO-DIGITALE E RITORNO: LA MODELLAZIONE COME ATTO CELEBRATIVO DEL DESIGN ITALIANO	88
---	-----------

From Physical to Digital and Back:
Modeling as a Tribute to Italian Design

Vittoria Castiglione

STRATEGIE DI MODELLAZIONE PARAMETRICA PER LO STUDIO DEL FORTE DI SANT'ANDREA NELLA LAGUNA DI VENEZIA	100
---	------------

Parametric Modelling approaches for the study
of St. Andrea Fortress in the Venetian Lagoon

Luca Chiavacci, Alberto Pettineo

STANDARDIZZAZIONE DEI MODELLI BIM 7D PER STUDI LCA: UNA METODOLOGIA BASATA SUL LIVELLO DI FABBISOGNO INFORMATIVO	114
---	------------

Standardizing 7D BIM models for LCA studies:
a methodology based on the Level of Information Need

Giorgia Cipriani

L'HOTEL PALACE A MERANO: IPOTESI PER UNA CONOSCENZA INTEGRATA DIGITALE	126
---	------------

The Hotel Palace in Merano:
insights for integrated digital knowledge

Alberto Cristofolini, Elena Bernardini, Giovanna A. Massari, Alessandro Zuanni

**IL BAROCCO RITROVATO: LA RICOSTRUZIONE
VIRTUALE DELLE FASI SETTECENTESCHE DELLA
CATTEDRALE DI COSENZA COME STRUMENTO DI
COMPRENSIONE E DIVULGAZIONE**

138

The rediscovered baroque: the virtual reconstruction of the 18th-century phases of the cathedral of Cosenza as a tool for understanding and dissemination

Rinaldo D'Alessandro

**DOCUMENTAZIONE E RESTAURO DELLA LOGGIA DEI
VINI DI VILLA BORGHESE: IL PROCESSO HBIM**

150

Documentation and restoration of the Loggia dei Vini in Villa Borghese: the HBIM process

Serena Caldarelli, Maurizio Dalena

**DIGITALIZZAZIONE E MODELLAZIONE 3D PER
LA VALORIZZAZIONE E LA FRUIZIONE URBANA:
IL CASO DI TOLFA**

164

Digitization and 3D Modeling for Urban Enhancement and Accessibility: The Case of Tolfa

Mara Gallo, Marco Canciani, Alessandro D'Accolti, Giuseppe Fioravanti

**LA LOGICA DELLE SCALE NEOCLASSICHE:
PROLIFERAZIONI DELLA MODELLAZIONE
3D NELL'APPROCCIO HBIM**

176

The logic of neoclassical staircases: proliferation of 3D modeling within the HBIM approach

Elisabetta Caterina Giovannini, Davide Mastroianni

**RICOSTRUZIONE TEMPORALE 3D DEL CASINO
DI CACCIA QUATTROCENTESCO DEI MOZZONI A
BISUSCHIO TRAMITE FONTI D'ARCHIVIO**

190

A 3D Reconstruction of Mozzoni's Fifteenth-Century Hunting Lodge Using Archival Sources

Dina Jovanovic, Daniela Oreni

DIGITAL HUMANITIES FOR HBIM/GIS: SMART PARK FOR SMART CITY	202
---	-----

Digital Humanities for HBIM/GIS: Smart Park for Smart City

Emanuela Lanzara, Alessia del Vecchio

PROPOSTA DI METODO PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELLE INFORMAZIONI IN AMBIENTE H-BIM: IL CASO DI CASTEL VISCARDO	216
---	-----

A Methodological Framework for Evaluating Information Quality
in H-BIM Environments: The Case Study of Castel Viscardo

Valentina Marceddu, Sara Tarola

STANDARD CATALOGRAFICI COME GUIDA DALL'ACQUISIZIONE AL BIM DEI BENI CULTURALI	228
--	-----

Cataloguing standards as a guide
from acquisition to BIM of cultural assets

Luca Martelli, Giulia Flenghi, Michele Russo

DIGITALIZZAZIONE E CONSERVAZIONE DI PORTA SAN PAOLO TRAMITE METODOLOGIA HBIM	244
---	-----

Digitalization and conservation of
Porta San Paolo through HBIM methodology

Daria Fedele, Marco Piccinini, Ludovica Prosciutti, Stefano Tognazzi

PROTOCOLLI SPERIMENTALI PER LA DIGITALIZZAZIONE DEL PATRIMONIO DIPINTO: LE TELE DELLA COLLEZIONE BARBERINI	250
---	-----

Experimental Protocols for the Digitisation of Painted Heritage:
The Canvases of the Barberini Collection

Alessandra Meschini, Jessica Romor, Marta Salvatore

CUMA. SPACE INFORMATION MODELLING	266
--	-----

Cuma.
Space information modelling

*Leopoldo Repola, Giovanni Varriale, Silvia Ilacqua, Diego Di Martire, Fabio Pagano,
Maria Alessandra Letizia*

**ACQUISIZIONI IMAGE-BASED PER UNA GESTIONE IN
MODALITÀ IMMERSIVA DELLA QUARTA DIMENSIONE
NEI PROCESSI BIM/HBIM** 280

Image-based Acquisitions for Immersive Management of the
Fourth Dimension in BIM/HBIM Processes

Maria Laura Rossi, Leonardo Paris

MUSE: IL RILIEVO DEL MOVIMENTO 290

MUSE: The survey of the movement

Danilo Avola, Gaia Maselli, Annalisa Massini, Daniele Pannone, Luca J. Senatore

**H-BIM PER LA PROGETTAZIONE E LA GESTIONE
DELL'EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA: UN CASO
STUDIO SU UN EDIFICIO ATER A SULMONA** 302

H-BIM for the Design and Management of Public Housing: A
Case Study on an ATER Building in Sulmona

Alessandra Tata, Elena Pallotta

**H-INFRA-BIM DELLE GRANDI DERIVAZIONI
IDROELETTRICHE: SFIDE E OPPORTUNITÀ** 314

H-InfraBIM of large hydropower diversions:
challenges and opportunities

Gianvito Marino Ventura, Francesca Maria Ugliotti

**BIM NELLE PUBBLICHE AMMINISTRAZIONI: UNA
BARRIERA O UN CATALIZZATORE PER LA
DIGITALIZZAZIONE?** 328

BIM in Public Administrations:
A Barrier or a Catalyst for Digitalization?

Michele Zucco, Matteo Del Giudice, Mariapaola Vozzola

**RICOSTRUZIONE 3D DA VIDEO MONOCULARI
E A 360° A BASSA RISOLUZIONE IN SITI DEL
PATRIMONIO CULTURALE CON L'IA** 340

3D Reconstruction from Low-Resolution Monocular
and 360° Video in Cultural Heritage Sites with AI

Francesca Condorelli

**APPROCCIO SCAN-TO-BIM INTEGRATO CON
PROCESSI DI DECOSTRUZIONE GEOMETRICA**

352

ScanToBIM approach integrated by geometric
deconstruction processes

Riccardo Tavolare, Valeria Cera

**APPROCCI MULTISCALARI E METODOLOGIE
HBIM PER LA CONOSCENZA SUL PATRIMONIO
MINORE STORICO E MODERNO**

364

Multiscalar approaches and HBIM methodologies for the
knowledge on historic and modern minor heritage

Raffaele Pontrandolfi, Antonio Bixio

**PROCEDURE HBIM PER IL RILIEVO DI
VILLA FLORIO MASERI A PERSEREANO**

380

HBIM Procedure for the Survey of
Villa Florio Maseri in Persereano

Alberto Sdegno, Ferdinand Rexhaj

PRESENTAZIONE DELLA XI EDIZIONE DEL WORKSHOP 3D MODELING & BIM

Introduction to the 11th Edition of 3D Modeling & BIM Workshop

Tommaso Empler

Direttore del Workshop 3D Modeling & BIM

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

Email

tommaso.empler@uniroma1.it

APPROCCIO SCAN-TO-BIM INTEGRATO CON PROCESSI DI DECOSTRUZIONE GEOMETRICA

ScanToBIM approach integrated by geometric
deconstruction processes

Authors

Riccardo Tavolare¹, Valeria Cera²

¹Politecnico di Bari, Dipartimento DICATECh, Bari, Italy

²Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Architettura, Napoli, Italy

Email

riccardo.tavolare@poliba.it

valeria.cera@unina.it

Keywords

SCANTOBIM,
HBIM,
POINT CLOUDS,
SEMANTIC MODELLING,
COMPUTATIONAL GEOMETRY

Abstract

Lo studio sperimenta l'adozione di un algoritmo in grado di integrarsi nel flusso *Scan-to-BIM* per la ricostruzione automatica di elementi tridimensionali. Il metodo sperimentale, fondato sull'analisi e sulla de-costruzione geometrica dei punti rappresentativi, individua un processo di geometria computazionale basato sull'estrazione di generatrici e direttrici, e sulla loro analisi funzionale nel processo di genesi tridimensionale. Il sistema si integra nei flussi di lettura e rappresentazione informativa dei sistemi architettonici complessi.

This study explores the use of an algorithm integrated into the scan-to-BIM workflow for the automatic reconstruction of three-dimensional elements. The experimental method is based on the analysis and geometric deconstruction of representative points and identifies a computational geometry process grounded in the extraction of generators and directrices, along with their functional analysis in the three-dimensional generation process. The system is integrated into the reading and information representation flows of complex architectural systems.

Introduzione e stato dell'arte (V.C.)

La digitalizzazione di un ambiente costruito, come attività di ricostruzione informativa di un'opera architettonica reale, rappresenta un complesso processo di lettura ed interpretazione basato sulla scomposizione formale e funzionale di un sistema edilizio, correlata agli obiettivi ed usi che il modello informativo dovrà assolvere.

In questo contesto, il processo *Scan-to-BIM* (quale percorso di modellazione 3D da nuvole di punti) si è affermato come una metodologia in grado di supportare il complesso processo di rappresentazione geometrica, partendo da rilievi tridimensionali acquisiti con *laser scanning* o fotogrammetria.

Sebbene le nuvole di punti *reality-based* costituiscano una base di rilievo dettagliata, essendo sono prive di struttura semantica e relazionale. I dati acquisiti, sebbene dotati di un'elevata densità geometrica, non supportano operazioni tipiche dei sistemi informativi, come la strutturazione gerarchica o la gestione delle relazioni spaziali [1, 2]. Il modello *BIM*, al contrario, fondando la sua grammatica su un approccio integrato da linguaggi e semantiche relazionali [3], basa la propria funzionalità sulla capacità rappresentativa orientata ad oggetti, in grado di codificare un'opera tramite componenti riutilizzabili, definiti da proprietà e attributi che ne caratterizzano il significato.

Partendo da questo contesto operativo, si è cercato di contestualizzare lo stato dell'arte attraverso la consultazione dell'archivio Scopus, attraverso le parole chiavi "*scan to bim*", "*scantobim*", "*scan-2bim*", "*scan-to-bim*", considerando le pubblicazioni più recenti comprese tra il 2022 e 2025, in ambito architettonico ed ingegneristico.

Come è possibile osservare nella Fig. 1 tra le tematiche associate a questo processo, la ricostruzione 3D rappresenta uno dei topic centrali, intercettando un collegamento con gli ambiti legati all'intelligenza artificiale.

L'evidenza che lo *Scan-To-BIM*, associato alla ricostruzione 3D e alla AI, rappresentano uno dei temi più trainanti della ricerca attuale, conferma una profonda trasformazione epistemologica e operativa

Introduction and state of the art (V.C.)

The digitalisation of the built environment, understood as the informative reconstruction of an actual architectural work, represents a complex process of reading and interpretation. This process is based on the formal and functional decomposition of the building system and is shaped by the intended objectives and applications of the resulting information model.

In this context, the scan-to-BIM process (as 3D modelling from point clouds) has established itself as a methodology capable of supporting the complex process of geometric representation, starting from three-dimensional surveys acquired by laser scanning or photogrammetry.

While reality-based point clouds constitute a detailed survey base, they are devoid of semantic and relational structure. Despite the acquired data have a high geometric density, they do not support operations typical of information systems, such as hierarchical structuring or the management of spatial relations [1]. The BIM model, whose grammar is founded on an approach enriched by relational languages and semantics [3], operates through an object-oriented representational paradigm. This enables the encoding of a building through reusable components defined by properties and attributes that convey their semantic meaning.

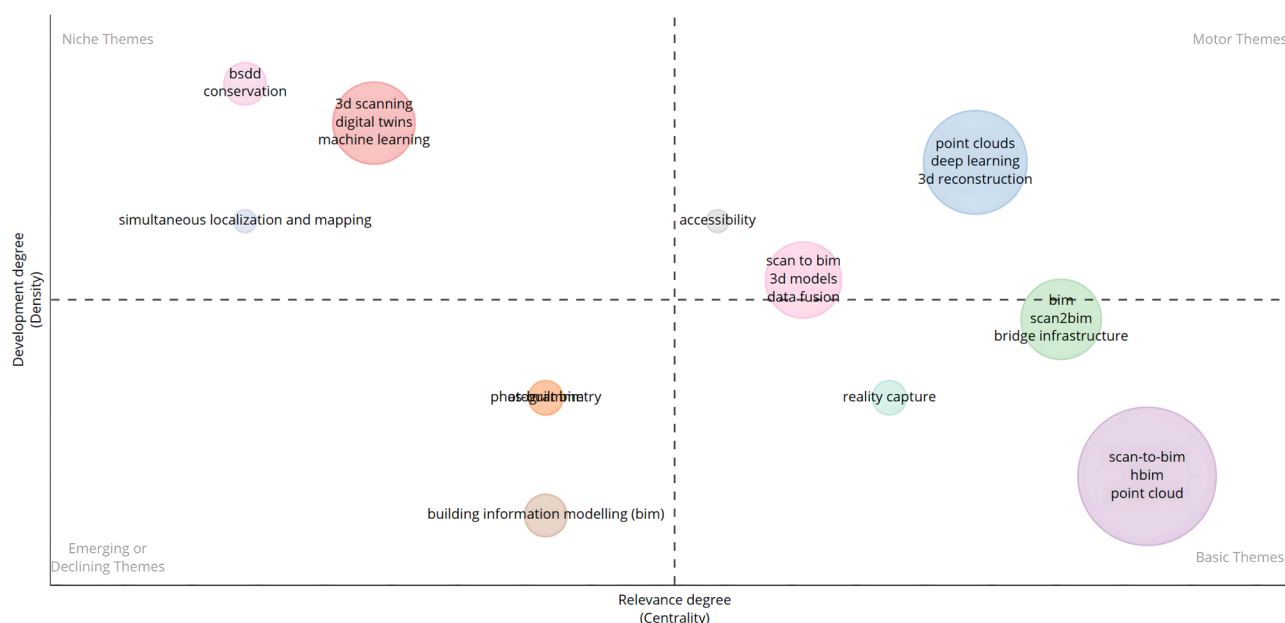


Fig. 1: Analisi tematiche di ricerca correlate allo Scan-To-BIM.

Fig. 1: Research topics related to Scan-To-BIM.

nel campo della digitalizzazione dell'ambiente costruito, non limitata ad una mera evoluzione tecnica, ma caratterizzata da un cambiamento di paradigma nella concezione stessa del rilievo, della modellazione e della rappresentazione.

Un processo *Scan-to-BIM* può essere schematizzato in un flusso di lavoro costituito dalle seguenti attività [4]:

- *Data capture*: fase di acquisizione strumentale in grado di generare una nuvola di punti.
- *Semantic segmentation*: fase di post-elaborazione, in cui la nuvola di punti viene caratterizzata da attributi in grado di estenderne il significato, oltre gli aspetti morfometrici, tramite una suddivisione in classi o gruppi.
- *BIM model*: fase di generazione del modello tramite l'utilizzo di schemi dati interoperabili *openBIM*.

In questa strutturazione operativa, la fase di modellazione *BIM* rappresenta ad oggi la fase più onerosa, necessitando dell'intervento manuale di operatori specializzati in grado, non solo di conoscere gli strumenti di *BIM authoring* disciplinari, ma anche di condividere capacità scompositive e interpretative di una architettura, seppure codificata in un medium digitale.

L'urgenza di individuare approcci migliorativi in tale ambito risulta ancora più evidente considerando la crescente necessità di adeguare e ammodernare gli edifici esistenti, migliorandone le prestazioni e la sostenibilità, attraverso la ricerca di flussi operativi ottimizzati [5].

La ricerca ha messo in luce due sostanziali approcci operativi, che si applicano a due fasi differenti del processo *Scan-to-BIM*: il primo basato sull'ottimizzazione e predisposizione della nuvola di punti in una forma strutturata, classificata; il secondo orientato al processo di ricostruzione topologica dei singoli elementi.

Considerando il primo orientamento, l'evoluzione delle capacità computazionali degli attuali elaboratori e la disponibilità di modelli di AI programmabili in modo sempre più semplificato, ha contribuito ad alimentare delle ricerche operative [6, 7] che adottano automatismi computazionali legati al riconoscimento di elementi costitutivi l'opera, mediante l'utilizzo di apprendimento automatico [8]. Tali paradigmi ensemble si basano generalmente sull'identificazione preliminare di features caratterizzanti gli elementi che si intende ricercare nella nuvola di punti [9].

La diffusione di questi approcci, pur mostrando delle ottime performance nelle metriche di classificazione o regressione, non hanno ancora dimostrato una capacità di generalizzazione sufficiente a rendere il processo di riconoscimento svincolato dal contesto di *training* in cui viene concepito [10, 11].

Anche l'adozione di metodi di *deep learning* [12], sebbene sostituisca le attività di ingegnerizzazione delle features con la configurazione parametrica di modelli che meglio si adattano alla configurazione dei criteri di similarità e dei filtri appresi [13], continua ad evidenziare alcune limitazioni nell'ambito architettonico storico, a causa dall'enorme variabilità formale e stilistica dei componenti costituenti tali opere.

Altri approcci si basano sull'implementazione di principi di geometria computazionale e analisi spaziale dei punti, mediante l'utilizzo di algoritmi di *fitting* o di *clustering* non supervisionato [14–16] in grado di segmentare, in modo specifico, singoli elementi o gruppi di elementi sulla base di similarità geometriche [17, 18].

Altre linee metodologiche si sono concentrate sulla possibilità di ricostruzione automatica delle geometrie direttamente da nuvole di punti.

In particolare, alcuni studi [1, 8, 19, 20] hanno sperimentato metodologie di ricostruzione automatizzata di geometrie, partendo da

Building on this operational context, a review of the state of the art was conducted through the Scopus database, using the keywords "scan to BIM", "scantobim", "scan2bim", and "scan-to-BIM". The search focused on the most recent publications (2022–2025) within the fields of architecture and engineering.

As shown in Fig. 1, among the topics associated with this process, 3D reconstruction emerges as a central theme, revealing a significant connection with areas related to artificial intelligence.

The fact that Scan-to-BIM, in connection with 3D reconstruction and artificial intelligence, represents one of the most prominent themes in current research highlights a profound epistemological and operational transformation in the digitalisation of the built environment. This transformation goes beyond a mere technical evolution and is characterised by a paradigm shift in the very conception of surveying, modelling, and representation.

A Scan-to-BIM process can be structured as a workflow consisting of the following main phases [4]:

- Data capture: the acquisition phase, in which instruments are used to generate a point cloud.
- Semantic segmentation: the post-processing phase, where the point cloud is enriched with attributes that extend its meaning beyond morphometric data, by classifying it into semantic classes or groups.
- BIM modelling: the generation phase, in which the model is constructed using interoperable openBIM data schemas.

Within this operational framework, the BIM modelling phase currently represents the most demanding step, as it requires the manual intervention of specialised operators. These professionals must not only be proficient in disciplinary BIM authoring tools, but also possess the ability to interpret and decompose architectural forms—even when encoded within a digital medium.

The need for improved approaches in this domain becomes even more pressing in light of the increasing demand to adapt and modernise existing buildings, enhancing their performance and sustainability through the development of optimised operational workflows [5].

porzioni di nuvole di punti. Le ricerche hanno dimostrato promettenti capacità di restituzione geometrica limitativamente a specifiche tipologie di elementi, generalmente muri, pavimenti e aperture.

La scelta tipologica degli elementi su cui si basano tali studi, solleva l'urgenza di estendere tali applicazioni a contesti più complessi, la cui caratterizzazione morfometrica risulti vincolante alla rappresentabilità stilistica degli elementi, come avviene all'interno di contesti storici.

Soluzione proposta (R.T.)

La nuvola di punti, concepita come codifica digitale di un processo di lettura acritica, può essere descritta matematicamente come una matrice multidimensionale in grado di riprodurre la morfologia degli elementi attraverso una discretizzazione spaziale, correlata alla densità e al livello di completezza superficiale utilizzato [21].

La traduzione di un rilievo in oggetti informativi, necessita di una specifica fase di lettura e generazione mediante l'utilizzo di descrittori geometrici, conformi agli standard interoperabili propri del *BIM* [1]. Tale orientamento metodologico manifesta una chiara preferenza per l'impiego di generatori parametrici, in quanto strumenti in grado di restituire modelli informativi adattivi e semanticamente strutturati, rispetto a semplici ricostruzioni *mesh*, le quali, pur offrendo un'elevata fedeltà geometrica, risultano limitate in termini di manipolabilità, interoperabilità e astrazione concettuale.

L'approccio metodologico qui proposto, si basa su una pre-elaborazione della nuvola di punti orientata all'isolamento degli elementi architettonici, attraverso l'impiego di strategie diversificate di segmentazione, implementabili mediante tecniche di *deep learning* e *machine learning*. In particolare, è stato sviluppato un algoritmo denominato *IFCrealty* in ambiente Python per l'identificazione e parametrizzazione automatica del generatore geometrico *IFC* più idoneo per la modellazione 3D di un elemento architettonico.

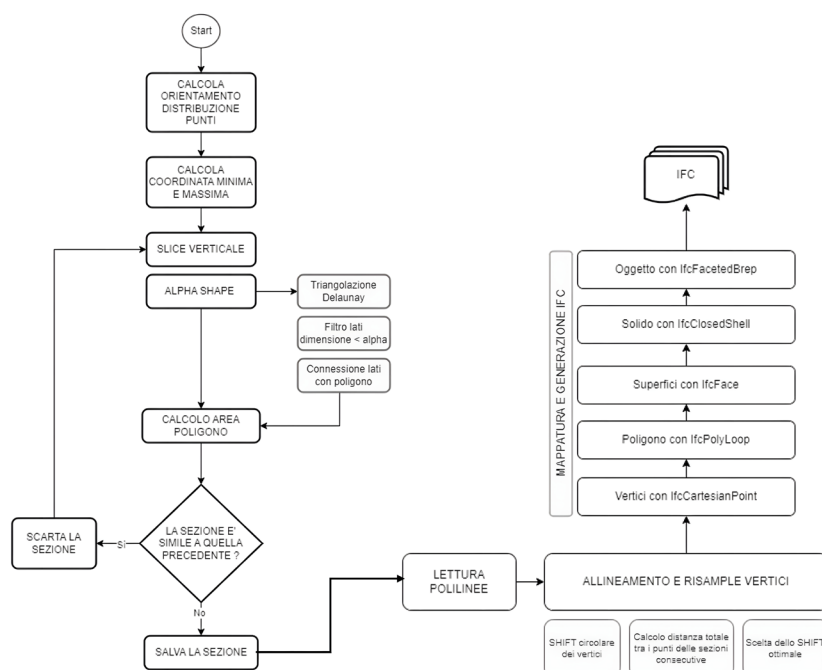


Fig.2: Workflow implementato nella sperimentazione.

Fig. 2: Workflow implemented in the developed algorithm.

The research identified two main operational strategies, applicable to different stages of the scan-to-BIM process: the first focuses on optimising and structuring the point cloud into a classified dataset; the second is oriented toward the topological reconstruction of individual architectural elements.

In relation to the first orientation, the evolution of computational power and the growing availability of increasingly accessible, programmable AI models have fostered operational research efforts [6, 7] that employ computational automata for the recognition of constituent architectural elements through machine learning techniques [8]. These ensemble approaches are generally based on the preliminary identification of features that characterise the elements to be detected within the point cloud data [9].

Although such approaches perform well in terms of classification and regression metrics, they have yet to demonstrate a sufficient generalisation capacity to decouple the recognition process from the specific training context in which the models are developed [10, 11].

Even the adoption of deep learning methods [12], which replaces feature engineering with the parametric tuning of models optimised to fit similarity criteria and learned filters [13], continues to face limitations when applied to historical architectural contexts, due to the significant formal and stylistic variability of the components comprising such heritage structures.

Other approaches rely on the implementation of principles from computational geometry and spatial point analysis, employing fitting techniques or unsupervised clustering algorithms [14–16] capable of segmenting individual elements or groups of elements based on geometric similarity [17, 18].

Additional methodological lines have explored the automated reconstruction of geometries directly from point clouds. In particular, several studies [1, 8, 19, 20] have proposed methods for reconstructing geometries from specific portions of point cloud data. These studies have demonstrated promising geometric reconstruction capabilities, although typically limited to specific types of elements, most commonly walls, floors, and voids.

The typological focus of these studies underscores the urgent need to extend such applications to more complex architectural



Fig.3: Categorie di colonne costituenti il dataset sperimentale.

Fig. 3: Column types used in the analysis dataset.

Il codice opera mediante l'analisi delle caratteristiche spaziali e morfologiche dell'oggetto in esame, valutando metriche di congruenza formale e aderenza geometrica, arrivando a generare una rappresentazione 3D coerente, preservandone, per quanto possibile, la sua definizione stilistica (Fig. 2).

In questa fase sperimentale si è scelto di applicare l'algoritmo all'elemento colonna, in quanto distintivo di un lessico costruttivo e simbolico dell'architettura sacra, caratterizzato da una morfologia che si configura secondo principi ricorrenti ma variabili, determinati da fattori funzionali, stilistici e culturali.

In particolare, si sono isolate 7 tipologie di colonne, includendo le parti base, fusto e capitello, con caratteristiche decorative e morfometriche differenti (Fig. 3).

Nel primo step, l'algoritmo si occupa della segmentazione parziale dei punti appartenenti alle varie parti di colonna, così da scomporla in base, fusto e capitello. Tale scomposizione viene eseguita mediante l'uso dell'algoritmo RANSAC *Random Sample Consensus* [22], rappresentando una tecnica robusta di stima parametrica capace di individuare, in modo iterativo e parametrico, l'appartenenza

contexts, in which morphometric characterisation is intrinsically tied to the stylistic representability of the elements—as is often the case in historical architecture.

Proposed solution (R.T.)

The point cloud, understood as the digital encoding of an uncritical reading process, can be mathematically described as a multidimensional matrix that reproduces the morphology of elements through spatial discretisation, influenced by the density and surface completeness of the acquired data [21].

Translating survey data into information-rich objects requires a specific interpretation and generation phase that employs geometric descriptors aligned with

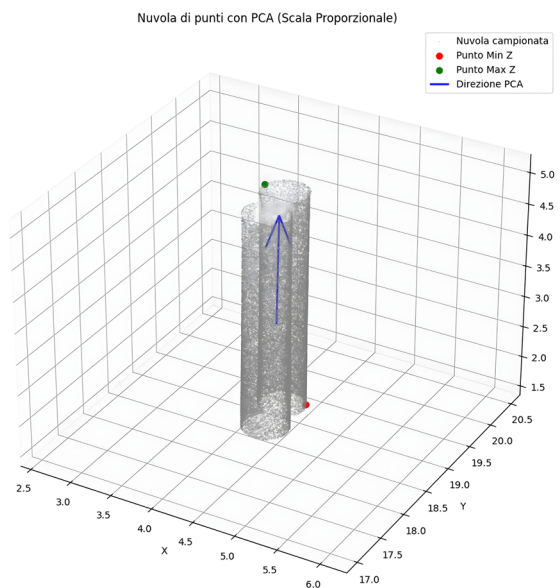
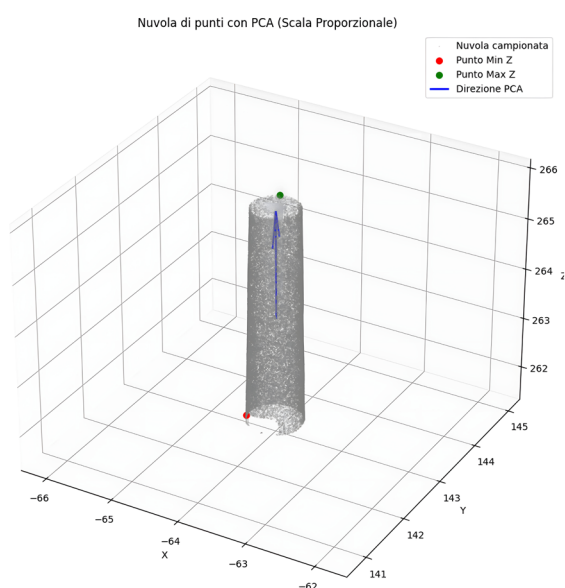


Fig.4: Calcolo punti di massimo e minimo e individuazione direttrice dominante

Fig. 4: Maximum and minimum points and calculation of the predominant direction

dei punti ad una struttura geometrica cilindrica, per quanto attiene il fusto, e ad un cuboide parametrico, per quanto riguarda la base. Il capitello viene isolato per differenza.

Per la generazione tridimensionale del fusto, l'algoritmo implementato provvede all'individuazione automatica dei punti estremi, corrispondenti alle coordinate di minima e massima lungo l'asse longitudinale dell'elemento, nonché alla determinazione dell'orientamento spaziale del medesimo (Fig. 4).

A partire da tali parametri, è determinata la direttrice assiale, ovvero l'asse principale di sviluppo del fusto colonnare. Il processo genera, poi, una serie di sezioni trasversali, ortogonali all'asse stesso, che consentono di campionare in modo sistematico la geometria del volume in esame.

Le sezioni vengono successivamente sottoposte ad un'analisi comparativa per la conservazione delle sole sezioni geometriche significativamente distintive. Questa fase consente di individuare la tipologia di generatrice che caratterizza l'elemento, isolando quelle che presentano variazioni morfologiche rilevanti sul piano spaziale o dimensionale, così da garantire un'efficace riduzione del rumore informativo ed una più efficiente riproduzione parametrica.

Tale operazione, inoltre, rientra in una logica di *quality assurance* [23] volta alla ottimizzazione e conservazione delle sole informazioni strutturalmente e formalmente rilevanti per la descrizione dell'oggetto.

Il numero di sezioni rimanenti caratterizzerà la scelta del costruttore geometrico utilizzato, fra quelli disponibili nello schema IFC 4.3 (Fig. 5).

Prima della generazione 3D, l'algoritmo procede con l'ottimizzazione dei vertici di ciascuna generatrice, così da garantire la coerenza topologica e la regolarità del modello generato, con particolare attenzione alla uniformità della distribuzione dei punti e al mantenimento dell'ordinamento sequenziale dei vertici lungo ciascun profilo.

L'obiettivo principale è la prevenzione di effetti di torsione (*twisting effects*) nella superficie interpolata, assicurando così una ricostruzione geometrica stabile e formalmente congruente con la configurazione originaria del manufatto architettonico.

BIM interoperability standards [1]. This methodological approach privileges parametric generators over mesh reconstructions, favoring adaptive and semantically structured models over purely geometric fidelity. It begins with a pre-processing phase of the point cloud, where architectural elements are isolated through segmentation strategies, enabled by deep learning or machine learning techniques.

In particular, an algorithm named IFC-reality was developed within the Python environment to enable the automatic identification and parameterisation of the most appropriate IFC geometric generator for the 3D modelling of architectural elements.

The modelling workflow relies on geometric deconstruction, which disassembles the object into morphological components to reveal formal patterns and inform parametric representation.

The algorithm analyses the spatial and morphological characteristics of the element under consideration, assessing metrics of formal congruence and geometric fidelity. This process ultimately leads to the generation of a coherent 3D representation that aims to preserve, as far as possible, the stylistic identity of the original element (Fig. 2).

In this phase, the algorithm was applied to the column, a key element in the constructive and symbolic lexicon of sacred architecture, shaped by recurring yet variable morphological principles. Specifically, seven types of columns were selected,

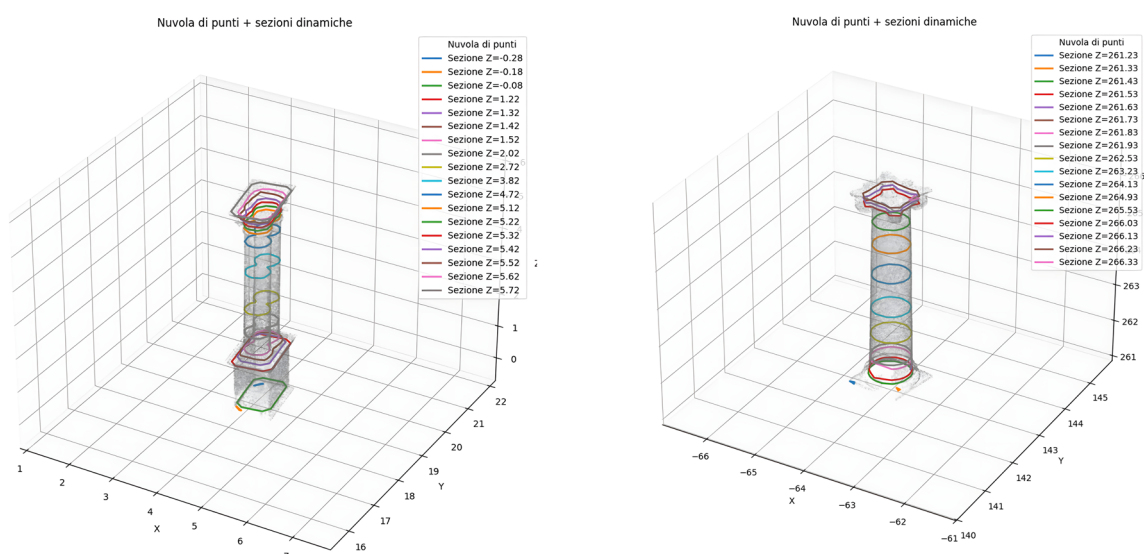


Fig.5: Individuazione delle sezioni generatrici dominanti

Fig. 5: Determination of the dominant generatrices along the directrix

Risultati conseguiti (R.T.)

La sperimentazione ha evidenziato la capacità dell'algoritmo di generare correttamente tutte le tipologie di colonne selezionate per la sperimentazione, realizzando modelli 3D coerenti con le specifiche dello schema IFC.

La verifica di tale riproduzione è stata eseguita mediante due approcci distinti: uno sintattico, basato sulla validazione del contenuto informativo; ed un altro geometrico e formale, basato sull'analisi di deviazione geometrica del modello rispetto alla nuvola di punti originaria.

La prima validazione è stata eseguita mediante il servizio messo a disposizione da *buildingSMART International* finalizzato alla verifica della correttezza formale, semantica e strutturale dei file secondo gli standard internazionali di interoperabilità.

Tali controlli si articolano in diverse categorie, ciascuna corrispondente a un livello specifico di analisi e conformità normativa.

In primo luogo, i controlli sintattici si concentrano sulla verifica della conformità del file IFC alla sintassi del formato *STEP Physical File*, verificando che la struttura dati sia formalmente corretta e conforme ai requisiti del formato, garantendo la leggibilità del file da parte dei *software* interoperabili.

Segue l'esecuzione dei controlli relativi alla integrità sintattica IFC, mediante i quali si accerta che il file adotti una versione aggiornata dello schema, con attenzione al rispetto dei vincoli formali e delle dichiarazioni espresse secondo il linguaggio di specifica EXPRESS, utilizzato per la definizione semantica delle entità e delle relazioni all'interno del modello.

Il servizio prevede inoltre la verifica delle regole di aderenza alle best practices promossi da *buildingSMART* (Fig. 6).

Nel processo di modellazione 3D automatizzata la riproduzione delle porzioni maggiormente complesse, quali i capitelli e apparati decorativi presenti su alcuni fusti, ha inevitabilmente comportato un approccio di sintesi morfologica.

Tale strategia si è resa necessaria considerando che i dettagli ornamentali non risultano sempre riconducibili ai generatori Brep o a forme primitive standardizzate.

Come anticipato, si è scelto di escludere dalle modalità di codifica geometrica l'adozione di *mesh*, considerandole limitative da un punto di vista parametrico, a causa delle difficoltà nell'editing formale e per l'elevato carico computazionale che richiede tale rappresentazione.

L'algoritmo sviluppato ha operato, pertanto, una semplificazione controllata delle geometrie, finalizzata alla conservazione delle caratteristiche formali salienti pur garantendo la compatibilità con i vincoli computazionali e le esigenze di interoperabilità propri del flusso *Scan-to-BIM*.

Nonostante questa sintesi, l'accuratezza del modello è stata mantenuta entro margini accettabili: l'analisi metrica ha evidenziato una deviazione media inferiore a 5 cm rispetto al riferimento geometrico (*ground truth*), con un'incidenza massima di outlier limitata al 2,5%.

Tali valori rientrano nei range di tolleranza comunemente accettati nella modellazione di oggetti architettonici complessi per scopi di documentazione, restauro o interoperabilità digitale, confermando la solidità metodologica dell'approccio adottato.

each including the base, shaft, and capital, and exhibiting distinct decorative and morphometric characteristics (Fig. 3).

In the initial phase, the algorithm performs a partial segmentation of the point cloud corresponding to the various parts of the column, breaking it down into base, shaft, and capital. This decomposition is achieved using the RANSAC (Random Sample Consensus) algorithm [22], a robust parametric estimation method that iteratively identifies geometric primitives. In particular, it detects cylindrical structures for the shaft and parametric cuboids for the base. The capital is isolated by subtraction.

For the three-dimensional reconstruction of the shaft, the algorithm automatically identifies its extremities by detecting the minimum and maximum coordinates along the element's longitudinal axis. It also determines the spatial orientation of the component. Based on these parameters, the axial direction, corresponding to the principal axis of the column shaft, is computed (Fig. 4).

The process subsequently generates a series of cross-sections orthogonal to the previously computed axis, enabling a systematic sampling of the geometry of the volume under examination.

These sections are then subjected to a comparative analysis aimed at preserving only those that are geometrically distinctive. This step allows for the identification of the type of geometric generator that best characterises the element, isolating sections that exhibit significant spatial or dimensional variations. The objective is to reduce informational noise and ensure a more efficient and accurate parametric reconstruction.

This approach aligns with a quality assurance framework [23], which prioritises the retention of information that is structurally and formally relevant to the description of the object.

The number and distribution of the remaining sections inform the selection of the most appropriate geometric constructor from those defined in the IFC 4.3 schema (Fig. 5).

Prior to 3D generation, the algorithm performs an optimisation step on the vertices of each generator, ensuring the topological consistency and geometric regularity of the resulting model. Particular attention is given to maintaining a uniform distribution of points and preserving the sequential ordering of vertices along each profile.

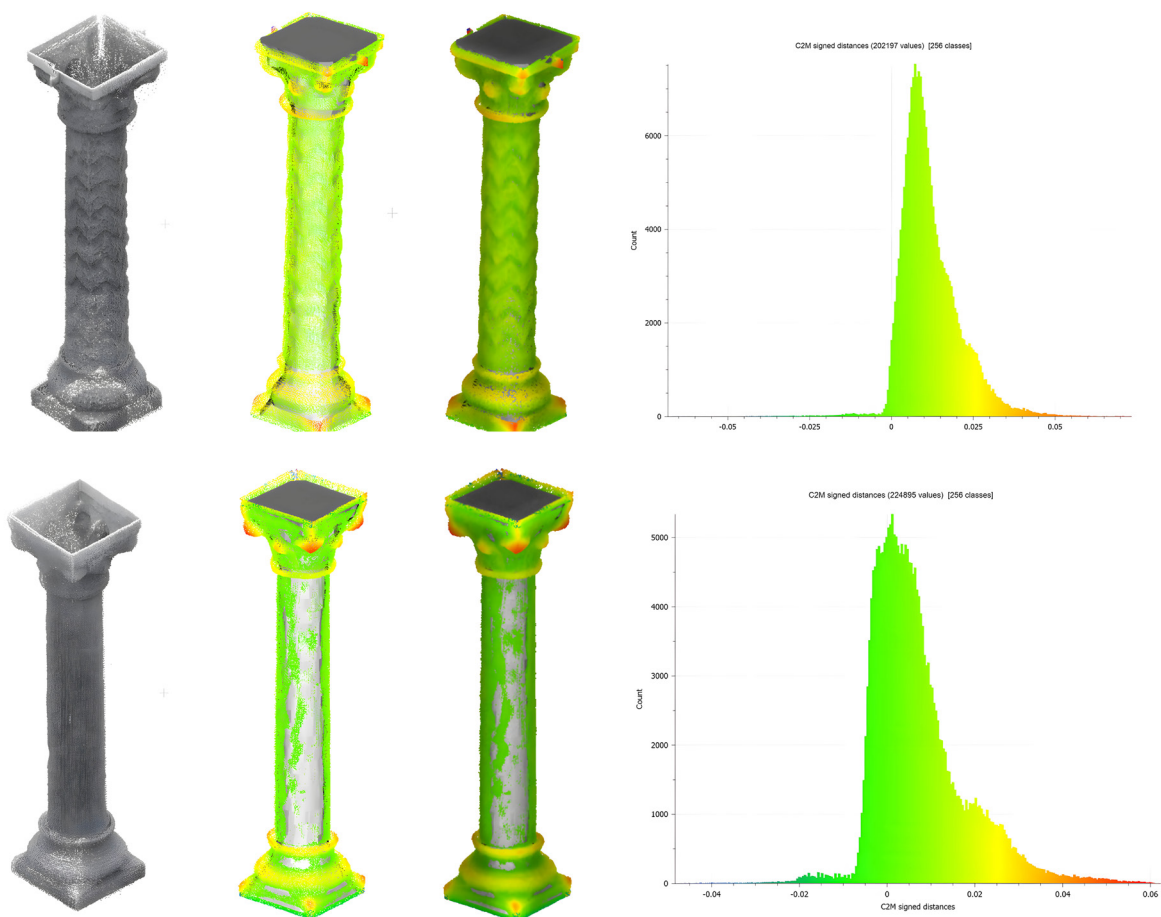


Fig. 5: Modello informativo della centrale idroelettrica di Calcinere
 Fig. 5: Information model of Calcinere hydropower plant.

Conclusioni (R.T.,V.C.)

Lo studio condotto ha consentito di concepire e validare un approccio automatizzato *Scan-to-BIM* finalizzato alla ricostruzione 3D di elementi colonnari, attraverso l'analisi di alcuni prototipi appartenenti a 7 diverse tipologie morfologiche. L'algoritmo ha dimostrato una buona capacità di approssimazione formale generando elementi conformi allo standard interoperabile, garantendo la coerenza semantica dei dati secondo le più recenti specifiche internazionali di interoperabilità.

Nella sperimentazione sono emerse alcune criticità riferibili alla complessità superficiale degli elementi decorativi.

In una prospettiva di evoluzione metodologica, l'approccio proposto si configura come potenzialmente estendibile ad ulteriori categorie di elementi architettonici, con l'intento di sviluppare un flusso di modellazione automatizzata accessibile in *open access*.

Tale orientamento risulta coerente con i principi di diffusione, condivisione e riuso della conoscenza scientifica propri della ricerca contemporanea.

In questo quadro, la ricerca mira a consolidare e ampliare la sperimentazione in atto, estendendo la base operativa a un insieme più articolato di oggetti e tipologie, al fine di testare la robustezza e la generalizzabilità del processo proposto.

Ciò consentirà di verificarne la trasferibilità in contesti morfologicamente e funzionalmente eterogenei, contribuendo alla definizione di un paradigma replicabile e interoperabile per l'automazione informativa nel dominio architettonico.

The primary objective of this step is to prevent twisting artifacts in the interpolated surface, thereby enabling a stable geometric reconstruction that remains formally consistent with the original configuration of the architectural artefact.

Achievements (R.T.)

The experimentation demonstrated the algorithm's ability to correctly generate all the selected column types, producing 3D models that are consistent with the specifications of the IFC schema.

The validation of these outputs was conducted through two complementary approaches: a syntactic validation, focused on the integrity of the information container, and a geometric-formal validation, based on the analysis of the model's geometric deviation from the original point cloud.

The syntactic validation was carried out using the official service provided by buildingSMART International, which verifies the formal, semantic, and structural

correctness of IFC files according to international interoperability standards. These checks are organised into multiple categories, each corresponding to a different level of analysis and regulatory compliance.

The first level consists of syntax verification of the IFC file in relation to the STEP Physical File format, ensuring that the data structure is formally correct and compliant with the format specifications. This step ensures that the file can be reliably interpreted by interoperable software systems.

Subsequently, IFC schema integrity checks are performed to verify that the file adopts an up-to-date version of the reference schema (Fig. 6).

In the automated 3D modelling process, the reconstruction of more complex portions, such as capitals and the decorative features on certain shafts, necessarily involved a morphological synthesis approach.

This strategy was essential, given that ornamental details are not always reducible to B-rep generators or standardised primitive geometries.

As previously discussed, the adoption of mesh-based representations was deliberately excluded due to their limitations in parametric modelling. Meshes typically present challenges in terms of formal editability and impose a high computational load, making them less suitable for workflows requiring semantic and geometric interoperability.

The developed algorithm therefore implemented a controlled simplification of geometries, aimed at preserving the salient formal features of each element while ensuring compatibility with the computational constraints and interoperability requirements of the scan-to-BIM process.

Despite this abstraction, the model's accuracy remained within acceptable thresholds: metric analysis revealed an average deviation of less than 5 cm from the geometric reference (ground truth), with a maximum outlier incidence of only 2.5%. These values fall within the tolerance ranges commonly accepted in the modelling of complex architectural elements for documentation, restoration, or digital interoperability purposes, thus confirming the methodological robustness of the proposed approach.

Conclusions (R.T.,V.C.)

The study enabled the design and validation of an automated Scan-to-BIM approach for the 3D reconstruction of columnar elements, tested across multiple prototypes representing seven distinct morphological types. The algorithm demonstrated strong formal approximation capabilities, generating elements compliant with the IFC interoperable standard and ensuring semantic consistency in accordance with the latest international interoperability specifications.

During the experimentation, some critical issues emerged, particularly concerning the surface complexity of ornamental components.

From a methodological perspective, the proposed approach is potentially extendable to additional categories of architectural elements, with the long-term objective of developing an open-access, automated modelling workflow.

This orientation aligns with contemporary research principles of openness, knowledge dissemination, and scientific data reuse.

Within this framework, the research aims to consolidate and expand the current experimentation by extending its operational scope to a broader range of architectural objects and typologies.

This will enable a more rigorous assessment of the algorithm's robustness and generalisability, and will support the evaluation of its applicability in morphologically and functionally diverse contexts. Ultimately, the study contributes to the definition of a replicable and interoperable paradigm for information automation in the architectural domain.

Bibliografia

- [1] NEŽERKA, V. & ZBÍROVSKÝ, S. (2025) Cloud2bim: An Open-Source Automatic Pipeline for Efficient Conversion of Large-Scale Point Clouds into Ifc Format. doi:10.2139/ssrn.5085725
- [2] EASTMAN, C., FISHER, D., LAFUE, G., et al (1974) *An Outline of the Building Description System*.
- [3] RASHDI, R., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J., ARIAS, P. & QIU, Z. (2022) Scanning Technologies to Building Information Modelling: A Review. IN-FRASTRUCTURES (Basel)
- [4] CATUOGNO, R., RUSSO ERMOLLI, S. & CAMPI, M. (2016) *Scan to BIM: interdisciplinarietà negli interventi di riqualificazione del patrimonio costruito storico*. DEI, Roma, pp 382–404. ISBN 9788849619317
- [5] GRILLI, E., MENNA, F. & REMONDINO, F. (2017) A Review Of Point Clouds Segmentation And Classification Algorithms. INT ARCH PHOTOGRAMM REMOTE SENS SPATIAL INF SCI XLII-2/W3:339–344. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-339-2017>
- [6] RUSSO, M., GRILLI, E., REMONDINO, F., et al (2021) Machine Learning for Cultural Heritage Classification. Representation Challenges Augmented Reality and Artificial Intelligence in Cultural Heritage and Innovative Design Domain. <https://doi.org/10.3280/oa-686.33>
- [7] SONG, W., LUO, J., ZHAO, D., et al (2023) A-Scan2BIM: ASSISTIVE SCAN TO BUILDING INFORMATION MODELING. CoRR. <https://doi.org/10.48550>
- [8] CROCE, V., CAROTI, G., DE LUCA, L., et al (2021) From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning. REMOTE SENS (Basel) 13:461. <https://doi.org/10.3390/rs13030461>
- [9] CAMILLI, F., TIEPLOVA, D. & BARBIER, J. (2023) Fundamental limits of overparametrized shallow neural networks for supervised learning
- [10] BARBIERO, P., SQUILLERO, G. & TONDA, A. (2020) Modeling Generalization in Machine Learning: A Methodological and Computational Study. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.15680>
- [11] PATIL, J. & KALANTARI, M. (2025) Automatic Scan-to-BIM – The Impact of Semantic Segmentation Accuracy. Buildings 15:. <https://doi.org/10.3390/buildings15071126>
- [12] YEMI HUSSAIN, N. (2024) Deep Learning Architectures Enabling Sophisticated Feature Extraction and Representation for Complex Data Analysis. INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE SCIENCE AND RESEARCH TECHNOLOGY (IJISRT) 2290–2300. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24OCT1521>
- [13] SCHNABEL, R., WAHL, R. & KLEIN, R. (2007) Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. COMPUTER GRAPHICS FORUM 26:214–226. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x>

[14] TARSHA-KURDI, F., LANDES, T. & GRUSSENMEYER, P. (2008) Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from LiDAR data. *THE PHOTOGRAMMETRIC JOURNAL OF FINLAND* 21:97–109. halshs-00278397v2f

[15] OH, S., LEE, D., KIM, M., et al (2021) Building component detection on unstructured 3d indoor point clouds using ransac-based region growing. *REMOTE SENS (Basel)* 13:1–20. <https://doi.org/10.3390/rs13020161>

[16] SHI, BQ., LIANG, J. & LIU, Q. (2011) Adaptive simplification of point cloud using k-means clustering. *CAD COMPUTER AIDED DESIGN* 43:910–922. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.04.001>

[17] YANG, X., MATSUYAMA, K., KONNO, K. & TOKUYAMA, Y. (2015) Feature-preserving simplification of point cloud by using clustering approach based on mean curvature. *THE SOCIETY FOR ART AND SCIENCE* 14:117–128

[18] GOURGUECHON, C., MACHER, H. & LANDES, T. (2022) Automation Of As-Built Bim Creation From Point Cloud: An Overview Of Research Works Focused On Indoor Environment. In: *INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES - ISPRS ARCHIVES*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp 193–200

[19] WANG, B., CHEN, Z., LI, M., et al (2024) Omni-Scan2BIM: A ready-to-use Scan2BIM approach based on vision foundation models for MEP scenes. *Autom Constr* 162:. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105384>

[20] CHEN, S., FAN, G. & LI, J. (2023) Improving completeness and accuracy of 3D point clouds by using deep learning for applications of digital twins to civil structures. *ADVANCED ENGINEERING INFORMATICS* 58:102196. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102196>

[21] FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C. (1981) Random sample consensus. *COMMUNACM* 24:381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>

[22] GONZÁLEZ-LLUCH, C., COMPANY, P., CONTERO, M., et al (2017) A survey on 3D CAD model quality assurance and testing tools. *COMPUTER-AIDED DESIGN* 83:64–79. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.10.003>